Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Тульский государственный университет»

16+
ISSN 2071-6168

ИЗВЕСТИЯ ТУЛЬСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Выпуск 11

Часть 2

Тула
Издательство ТулГУ
2016

УДК 621.86/87 **ISSN 2071-6168**

Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Вып. 11. Ч. 2. Тула: Изд-во ТулГУ, 2016. 592 с.

Рассматриваются научно-технические проблемы машиностроения и машиноведения, технологии и оборудования обработки металлов давлением, информатики, вычислительной техники, обработки и защиты информации, управления качеством, стандартизации и сертификации, приборостроения, метрологии и информационно-измерительных приборов и систем, военно-специальных наук, электротехники, технологий и оборудования обработки металлов резанием.

Материалы предназначены для научных работников, преподавателей вузов, студентов и аспирантов, специализирующихся в проблематике технических наук.

Редакционный совет

М.В. ГРЯЗЕВ – председатель, ***В.Д. КУХАРЬ*** – зам. председателя, ***В.В. ПРЕЙС*** – главный редактор, ***А.А. МАЛИКОВ –*** отв. секретарь, ***И.А. БАТАНИНА, О.И. БОРИСКИН, М.А. БЕРЕСТНЕВ, В.Н. ЕГОРОВ, О.Н. ПОНАМОРЕВА, Н.М. КАЧУРИН, В.М. ПЕТРОВИЧЕВ***

Редакционная коллегия

О.И. Борискин (отв. редактор), С.Н. Ларин (зам. отв. редактора), Б.С. Яковлев (отв. секретарь), И.Л. Волчкевич, Р.А. Ковалев, М.Г. Кристаль, А.Д. Маляренко (Республика Беларусь), А.А. Сычугов, Б.С. Баласанян (Республика Армения), А.Н. Чуков

Подписной индекс 27851
по Объединённому каталогу «Пресса России»

Сборник зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор). ПИ № ФС77-61104 от 19 марта 2015 г.

«Известия ТулГУ» входят в Перечень ведущих научных журналов и изданий, выпускаемых в Российской Федерации, в которых должны быть опубликованы научные результаты диссертаций на соискание учёной степени доктора наук

© Авторы научных статей, 2016
© Издательство ТулГУ, 2016

УДК 536.531

НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ РАСЧЕТА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ «СОПРОТИВЛЕНИЕ-НАПРЯЖЕНИЕ» ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ И РЕГИСТРАЦИИ ТЕМПЕРАТУРЫ В ПРОЦЕССЕ ШЕВИНГОВАНИЯ-ПРИКАТЫВАНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

А.А. Маликов, А.В. Сидоркин

Рассмотрены узловые моменты расчета преобразователя «сопротивление-напряжение», используемого в составе измерительной системы, предназначенной для непрерывного многоканального измерения и регистрации температуры вращающихся частей технологических систем. Уделено существенное внимание процедуре подбора номиналов элементов, задействованных в измерительной схеме.

Ключевые слова: измерение, преобразователь, расчет, температура, сопротивление, напряжение, термометр сопротивления, операционный усилитель, резистор.

Для осуществления процесса измерения температуры вращающегося объекта технологической системы – инструмента – шевера-прикатника, подробно рассмотренного в статьях [1 – 3], в составе измерительной системы, помимо собственно объекта измерения и установленных на нем термометров сопротивления, присутствуют преобразователь «сопротивление-напряжение» и аналогово-цифровой преобразователь, сопряженный с ПЭВМ посредством интерфейса USB – USB-осциллограф. При этом, расчет преобразователя «сопротивление-напряжение» имеет ряд особенностей, рассмотрению сущностных аспектов которых и посвящена настоящая статья.

На рис. 1 приведена электрическая принципиальная схема одноканального двухкаскадного устройства, состоящего из преобразователя «сопротивление-напряжение» и масштабного усилителя. Целесообразность

построения данной схемы обоснована рядом соображений, подробно рассмотренным в статье [4]. При этом, за основу схемы принято конструктивное решение, описанное проф. В.С. Гутниковым в своей книге [5].

Первоначальной целью расчета является определение величины сопротивлений резисторов *R1*, *R2* и *R3* (см. рис. 1):

$$U_{\text{вых}} = -\frac{U_0}{1+\dfrac{R3}{R2}}\left(\frac{R3}{R2}+\frac{Rt}{R1}\right). \qquad (1)$$

Обратим внимание на выражение (1). Примем значение выходного напряжения преобразователя равным нулю – $U_{\text{вых}}$=0. Для этого приравняем выражение (1) к нулю. Чтобы выполнялось указанное равенство, хотя бы один из сомножителей выражения (1) должен быть равен нулю.

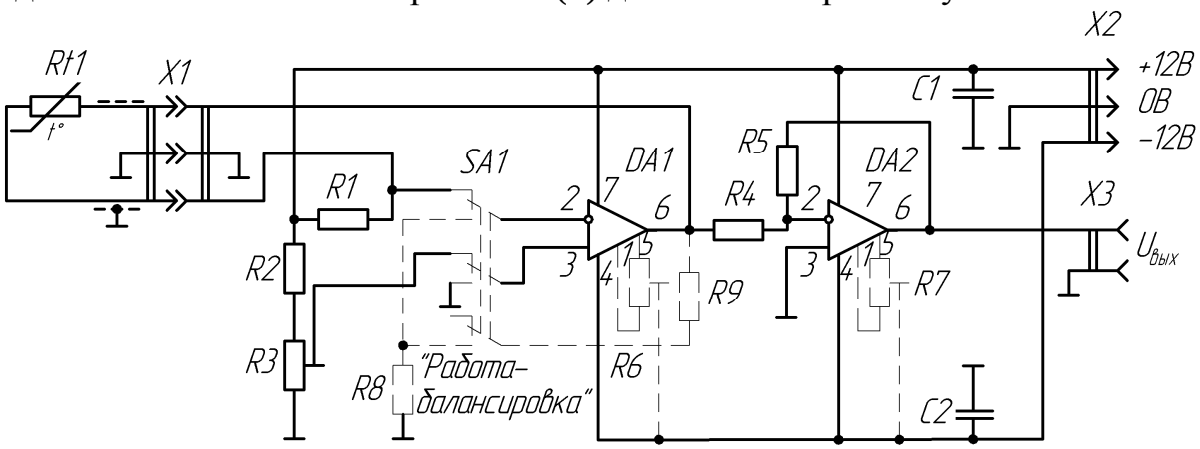


Рис. 1. Схема преобразователя «сопротивление-напряжение» с масштабным усилителем

Рассмотрим ситуацию, когда левый сомножитель (стоящий перед скобкой) равен нулю. Это возможно только лишь при U_0=0 или *R3*/*R2*=-1. Выполнение каждого из этих условий противоречит физическому смыслу работы рассматриваемой схемы. Поэтому левый сомножитель выражения равным нулю быть не может.

Рассмотрим ситуацию, когда нулю будет равно значение правого сомножителя выражения (1) (стоящего в скобках):

$$\frac{R3}{R2}-\frac{Rt}{R1}=0.$$

Изменение знака продиктовано тем, что приведенные соотношения сопротивлений всегда будут являться положительными числами.

Тогда, для обеспечения заданного условия должно выполняться соотношение:

$$\frac{R3}{R2}=\frac{Rt}{R1}. \qquad (2)$$

Рассмотрим следующую ситуацию работы преобразователя. Операционный усилитель, охваченный глубокой отрицательной обратной связью (которая обеспечивается термометром сопротивления), подключен инверсным входом через резистор *R1* к источнику опорного напряжения U_0. Прямой вход усилителя, при этом подключен к точке с нулевым потенциалом (земле) (рис. 2).

Если один из входов операционного усилителя имеет нулевой потенциал, то и на другом входе он должен также соответствовать нулю [5]. При этом будет справедливо выражение:

$$U_{\text{вых}} = -\frac{Rt}{R1}U_0. \qquad (3)$$

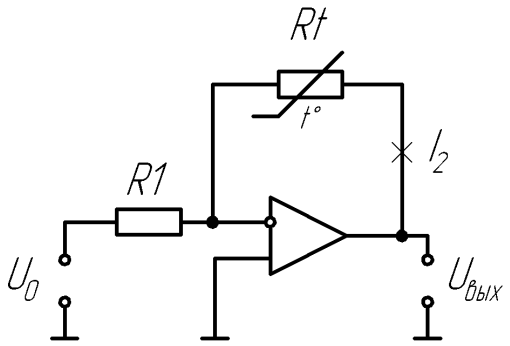


Рис. 2. Схема к расчету величины сопротивления R1

Исходя из выражения (3) нетрудно определить ток I_2 (А), протекающий через термометр сопротивления *Rt* (Ом):

$$I_2 = -\frac{U_0}{R1}.$$

Известно, что величину тока, проходящего через любые резистивные датчики, в особенности через термометры сопротивления, следует ограничивать. Это объясняется тем, что ток, проходящий через чувствительный элемент датчика (зачастую, выполненный в виде проволоки или пленки микронных сечений), вызовет его разогрев, и как следствие, изменение сопротивления. При этом, погрешность измерения такой схемы может достигать очень больших величин. Для каждого конкретного типа термометра сопротивления величина такого допустимого тока [$I_{\text{доп}}$] оговаривается в технической документации на него. В частности, для термометра типа ТЭП 018 она не должна превышать [$I_{\text{доп}}$]=2 мА. Можно также воспользоваться общепринятым правилом, изложенным, в частности, в книге [6], которое рекомендует ограничивать значение допустимого тока, протекающего через измерительные цепи датчиков на уровне [$I_{\text{доп}}$]=1 мА. К слову, в большинстве отечественных и импортных измерительных приборов, имеющих возможность измерения сопротивления, не пределе измерения 200 Ом, измерительный ток, проходящей через цепь, равен 1 мА.

Таким образом, величина сопротивления резистора *R1* (Ом) может быть определена из выражения:

$$R1 = \frac{U_0}{[I_{\text{доп}}]}. \quad (4)$$

Суммарную величину сопротивления резисторов *R2* и *R3* можно определить, исходя из условий максимально допустимого тока [$I_{\text{доп. д.}}$], проходящего через цепь *R2-R3* резистивного делителя. Рекомендуется ограничивать значение этой величины на уровне [$I_{\text{доп. д.}}$]=10 мА. Так как превышение рассматриваемого значения тока может привести к повышенному нагреву элементов делителя, изменению величины их сопротивления и дрейфу «нуля» всей рассматриваемой измерительной схемы. Это может внести существенные ошибки в результаты измерений, как в краткосрочной, так и долгосрочной перспективах. Таким образом, искомая величина может быть определена из выражения:

$$R2 + R3 = \frac{U_0}{[I_{\text{доп.д.}}]}. \quad (5)$$

В то же время, величина сопротивления *R3* (Ом) может быть легко выражена из соотношения (2):

$$R3 = \frac{Rt \cdot R2}{R1}. \quad (6)$$

Тогда, оперируя выражениями (2, 5 и 6) может быть найдена величина сопротивления *R2* (Ом):

$$R2 = \frac{U_0}{[I_{\text{доп.д.}}]\left(1 + \frac{Rt}{R1}\right)}. \quad (7)$$

В качестве примера произведем расчет сопротивлений резисторов *R1*, *R2* и *R3* для преобразователя, в измерительную цепь которого включен платиновый термометр сопротивления модели ТЭП 018-05 с номинальным начальным сопротивлением при t=0 °С $Rt_{\text{нач}}$=100 Ом [7]. Согласно техническим условиям БЫ6.036.012 ТУ, максимально допустимый ток, проходящий через чувствительный элемент термометра [$I_{\text{доп}}$]=2 мА. Тогда, при опорном напряжении $U_{\text{о}}$=12 В, воспользовавшись зависимостью (4), определяется сопротивление резистора *R1* – 6 кОм.

По справочнику [8], в качестве *R1*, может быть выбран резистор МЛТ (либо иностранный аналог) с номинальным сопротивлением $R1_{\text{ном}}$=6,2 кОм, номинальной мощностью рассеивания $P_{\text{ном}}$=0,25 Вт и допуском на сопротивление $\Delta R1_{\text{ном}}$=±5%.

Воспользовавшись зависимостями (7 и 6) определяются расчетные значения сопротивлений резисторов *R2* и *R3*. Установим максимально допустимый ток, проходящей через цепь делителя *R2-R3* [$I_{\text{доп. д.}}$]=10 мА. Тогда: *R2*=1180,95 Ом и *R3*=19,05 Ом.

Дальнейшая процедура подбора номинальных значений сопротивлений *R2* и *R3* из существующего ряда определяется выбранной конструкцией резистивного делителя, следовательно, является поливариантной. Поэтому здесь ее приводить нецелесообразно.

Воспользовавшись зависимостью (1), может быть произведен проверочный расчет преобразователя. Расчет считается выполненным корректно, если условие $U_{вых} \approx 0$ В, при $Rt_{нач}=100$ Ом соблюдается.

Аналогично может быть рассчитана величина напряжения на выходе преобразователя $U_{вых}$ при сопротивлении платинового термометра *Rt*, соответствующему температуре $t=100\ ^{o}C$. Для этого может быть использованы индивидуальная или групповая градуировочная характеристика конкретной модели термометра [7], либо таблица А2 из ГОСТ 6651-2009 [9]. Для термометра с начальным сопротивлением $R_0=100$ Ом и температурным коэффициентом термопреобразователя сопротивления $\alpha=0{,}0391\ ^{o}C^{-1}$, сопротивление $Rt_{100\ ^{o}C}=139{,}11$ Ом. Тогда $U_{вых\ 100\ ^{o}C}=-0{,}0745$ В.

Очевидно, что для многих регистрирующих приборов эта величина слишком мала. В частности, для рассмотренной ранее [3] модели USB-осциллографа уровень полезного сигнала, получаемого с выхода преобразователя, становится сопоставимым с уровнем его собственных шумов. Поэтому, становится очевидным, необходимость применения в составе преобразователя «сопротивление-напряжение» масштабного усилителя. Для нашего случая, коэффициент масштабирования удобно принять $K_У=20$. Руководствуясь рекомендациями, приведенными в статье [4], по справочнику [8] в качестве резистора *R4* (см. рис. 1) выбирается аналогичный *R1* тип.

Тогда расчетное значение сопротивления резистора *R5* (Ом) может быть легко определено из следующей зависимости:

$$R5 = R4 \cdot K_{У}.$$

Для рассматриваемого нами случая *R5*=36 кОм. По справочнику [8] может быть подобран резистор с номинальным сопротивлением $R5_{ном}=36$ кОм имеющий идентичные с резистором *R4* тип и основные параметры.

Наиболее наглядно эффективность использования масштабного усилителя, в составе рассматриваемого преобразователя, можно проследить на графике (рис. 3).

Для термометров сопротивления семейства ТЭП 018, имеющих ряд сопротивлений $Rt_{нач}$: 15; 25; 34; 46; 60; 100; 500 Ом, авторами произведен расчет оптимальных параметров преобразователя «сопротивление-напряжение» с масштабным усилителем, результаты которого представлены в виде таблицы.

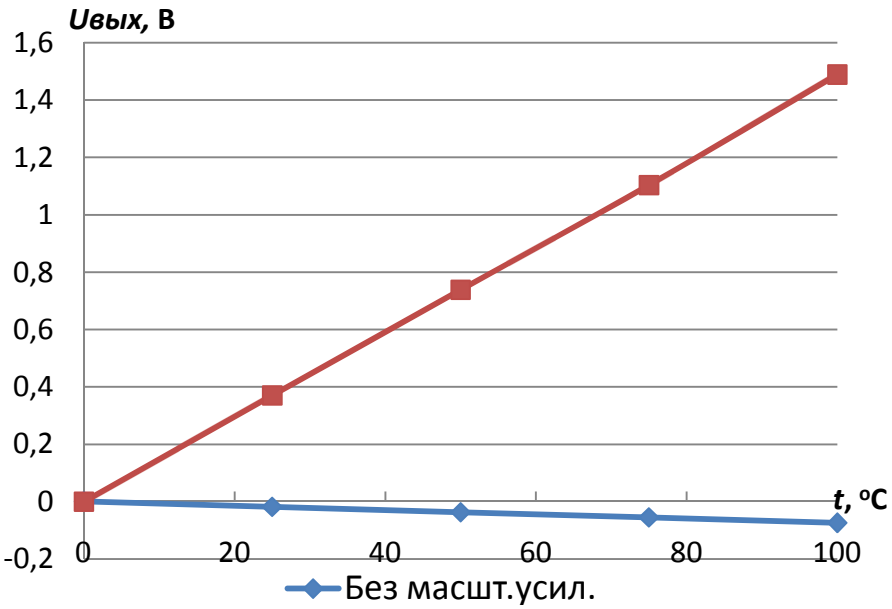


Рис. 3. Зависимость величины выходного напряжения преобразователя $U_{вых}$ от температуры, измеряемой термометром сопротивления t

Расчет основных параметров устройства для ряда термометров сопротивления типа ТЭП 018

№ п/п	Сопр. $Rt_{нач}$, Ом	Параметры преобразоватля		Параметры масштабного усилителя			Напр. на вых. $U_{вых\ 100\ ^oC}$ при $Rt_{100\ ^oC}$
		Расчетное сопр., Ом		*К*у	Принятое сопр. $R_{ном}$, кОм		
		R2	*R3*		*R4*	*R5*	
1	15	1197,10	2,9	100	2	200	1,132422
2	25	1195,18	4,82	100	2	200	1,884337
3	34	1193,46	6,54	50	2	100	1,2795
4	46	1191,16	8,84	50	2	100	1,727762
5	60	1188,5	11,5	41	2	82	0,899425
6	100	1180,95	19,05	20	1,8	36	1,489524
7	500	1110,45	89,55	5	2	10	1,750746

Как видно из данных, представленных в таблице, для всего, достаточно широкого, диапазона номинальных сопротивлений $Rt_{нач}$ термометров, могут быть подобраны такие значения сопротивлений резисторов *R2… R5*, при которых напряжение на выходе устройства будет находится в пределах, удобных для его дальнейшего преобразования и последующей регистрации.

Список литературы

1. Маликов А.А., Сидоркин А.В. Некоторые особенности практической реализации процесса дискретной регистрации температуры вращающихся частей технологических систем // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2015. Вып. 8. Ч. 2. С. 78-86.

2. Сидоркин А.В. Технологическая оснастка для измерения температуры в зоне обработки цилиндрических колес шевингованием-прикатыванием // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2013. Вып. 8. С. 68-73.

3. Маликов А.А., Сидоркин А.В. Особенности многоканального измерения и регистрации температуры в процессе шевингования-прикатывания цилиндрических зубчатых колес// Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2016. Вып. 3. С. 149-156.

4. Маликов А.А., Сидоркин А.В. Особенности реализации преобразователя «сопротивление-напряжение» для измерения и регистрации температуры в процессе шевингования-прикатывания цилиндрических зубчатых колес // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2016. Вып. 7. Ч. 1. С. 43-48.

5. Гутников В.С. Интегральная электроника в измерительных устройствах. 2-е изд., перераб. и доп. Л.: Энергоатомиздат, 1988. 304 с.

6. Преображенский В.П. Теплотехнические измерения и приборы: учебник для ВУЗов. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Энергия, 1978. 704 с.

7. Маликов А.А., Сидоркин А.В. Некоторые особенности градуировки плоских термометров сопротивления // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2015. Вып. 8. Ч. 2. С. 132-138.

8. Дубровский В.В., Иванов Д.М., Пратусевич Н.Я. [и др.]. Резисторы: справочник. Под ред. И.И. Четверткова и В.М. Терехова. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Радио и связь, 1991. 528 с.

9. ГОСТ 6651-2009. Термопреобразователи сопротивления из платины, меди и никеля. Общие технические требования и методы испытаний. Взамен ГОСТ 6651-94; введ. 2009-12-15. М.: Стандартинформ, 2011. 27 с.

Маликов Андрей Андреевич, д-р. техн. наук, проф., зав. кафедрой, andrej-malikov@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Сидоркин Андрей Викторович, канд. техн. наук, доц., инженер УНИР, alan-a@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

SOME ASPECTS OF THE CALCULATION OF CONVERTER "RESISTANCE-VOLTAGE" FOR MEASURING AND RECORDING TEMPERATURES DURING SHAV-ROLLING OF CYLINDRICAL GEARS

A.A. Malikov, A.V. Sidorkin

Examined key aspects of the calculation of the transducer "resistance-voltage" used as part of the measuring system for continuous multi-channel measuring and recording the temperature of the rotating parts of technological systems. Paid considerable attention to the selection procedure denominations elements involved in the measuring circuit.

Key words: measurement, converter, calculation, temperature, resistance, voltage, resistance thermometer, an operational amplifier, a resistor.

Malikov Andrey Andreevich, doctore of technical sciences, professor, head of departament, andrej-malikov@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Sidorkin Andrey Victrovich, candidate of technical sciences, docent, engineer, alan-a@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 621.0:519.873

МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ «ЯЧЕЙКА-НАКОПИТЕЛЬ» МЕТОДОМ ПУТЕЙ ПРИ АБСОЛЮТНО НАДЕЖНОМ НАКОПИТЕЛЕ

М.В. Заморенов, В.Я. Копп, О.В. Филиппович, Д.В. Заморёнова

Приведен метод путей, позволяющий моделировать процесс функционирования полумарковских систем. Выполнено моделирование процесса функционирования структуры «ячейка-накопитель». Выполнено сравнение предложенного метода моделирования и известного метода, основанного на уравнениях марковского восстановления.

Ключевые слова: полумарковская система, метод путей, ячейка-накопитель.

При стохастическом моделировании полумарковских (ПМ) систем часто возникают задачи, требующие определения не только стационарных характеристик, но и функций распределения (ФР) случайных величин, которыми являются времена пребывания, как в отдельных состояниях, так и в подмножествах состояний. Так, например, такие задачи возникают при построении моделей производственных и информационных систем со сложной, иерархически подчиненной структурой [1, 2]. В этих случаях, как правило, при построении модели верхнего уровня иерархии необходимо, чтобы были известны ФР, описывающие функционирование элементов нижних уровней иерархии, причем эти ФР являются исходными данными

для построения модели верхнего уровня (вертикальные связи). Следует отметить, что и внутри каждого уровня иерархии для учета влияния элементов друг на друга при их стыковке необходимо знать ФР отдельных элементов (горизонтальные связи).

Целью статьи является построение модели структуры «ячейка-накопитель», позволяющей находить точное решение для определения ФР времени пребывания ПМ системы в подмножестве работоспособных состояний.

Рассмотрим ПМ систему с общим фазовым пространством состояний M. Выделим в фазовом пространстве состояний M полумарковского процесса два подмножества M_+ и M_-, таких, что $M_+ \cup M_- = M$. Времена однократного пребывания в состояниях $S_i \in M_+$ являются случайными величинами α_i, имеющими математические ожидания m_i, функции $F_i(t)$ и плотности $f_i(t)$ распределения, с изображениями в комплексной области $F_i(s)$ и $f_i(s)$ соответственно.

Для достижения требуемого результата предлагается следующий метод, в дальнейшем называемый методом путей.

Первый шаг. Переход от системы с непрерывными состояниями к системе с дискретными состояниями $S_i \in M_+$. При этом определяются ФР F_i времен пребывания системы в новых дискретных состояниях, вероятности перехода P_{ij} из этих состояний в другие состояния (переходные вероятности) удельные частоты ρ_i попадания в состояния (стационарное распределение ВЦМ) и стационарные вероятности пребывания в состояниях (стационарное распределение ПМ процесса). Процедура проводится известными методами моделирования ПМ систем.

Второй шаг. Выделение всех возможных путей перехода системы из подмножества M_+ в подмножество M_-. Причем, каждое состояние системы входит в один или несколько путей сразу.

Третий шаг. На основании формулы полной вероятности и последующей свертки случайных величин [3] определяются ФР времен пребывания системы в каждом из путей, а также вероятности P_k^R каждого из путей.

Четвертый шаг. Находим ФР времени пребывания в M_+ вне зависимости от начального состояния, которая определяется, как взвешенная сумма (смесь) ФР каждого из путей. Коэффициентами смеси служат найденные на третьем шаге вероятности P_k^R реализации путей.

Рассмотрим использование метода путей для моделирования указанной системы.

Имеется производственная структура, содержащая технологическую ячейку (ТЯ) и накопитель (Н), позволяющий данной структуре функционировать некоторое случайное время после отказа ТЯ. Задача ставится следующим образом: по известным функциям распределения $F_{01}(t)$, $F_{10}(t)$ и $F_{12}(t)$ времен наработки на отказ ξ_0 и восстановление η_1 производственной ячейки, а также заданного временного резерва ξ_1, обеспечиваемого накопителем, являющихся случайными величинами общего вида [4], определить функцию распределения времени пребывания системы в подмножестве работоспособных состояний $M_+ = \{S_0, S_1\}$, являющегося временем наработки на отказ участка в целом. ФР $F_{01}(t)$, $F_{10}(t)$, $F_{12}(t)$ имеют плотности распределения $f_{01}(t)$, $f_{10}(t)$, $f_{12}(t)$. Отказ системы наступает в момент времени, когда время восстановления η_1 объекта после очередного нарушения его работоспособности превысит его резерв времени ξ_1 ($\eta_1 > \xi_1$), и продолжается до окончания восстановления объекта.

Система имеет следующие состояния: S_0 — ячейка исправна, продукция участком выдается, состояние работоспособное; S_1 — ячейка неисправна, резерв времени не израсходован, продукция участком выдается, состояние работоспособное; S_{2x} — ячейка неисправна, резерв времени израсходован, продукция участком не выдается, до восстановления ТЯ осталось время x, состояние не работоспособное (отказовое).

Граф состояний системы представлен на рис. 1.

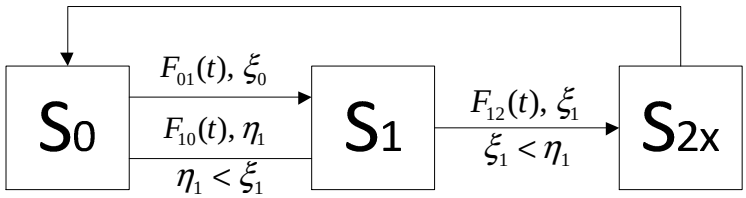


Рис. 1. Граф состояний для исходной системы

Для данной системы известно решение классическим методом последовательных приближений [5], позволяющее определить ФР $F_{отк}(t)$ времени наработки на отказ:

$$F_{отк}(t) = \int_0^t F_{01}(t-y)\overline{F}_{10}(y) f_{12}(y)dy + \int_0^t h(t-x)dx \int_0^x F_{01}(x-y)\overline{F}_{10}(y) f_{12}(y)dy, \quad (1)$$

где $h(x) = \sum_{n=1}^{\infty}\left[f_{01}(x) * \left(\overline{F}_{12}(x) \cdot f_{10}(x)\right)\right]$.

Получим решение предлагаемым точным методом определения ФР $F_{\Sigma}^{\theta}(t)$ времени наработки на отказ.

Первый шаг. Переход от системы с непрерывными состояниями к системе с дискретными состояниями.

Времена пребывания в состояниях

$$\theta_0 = \xi_0;\ \Theta_1 = (\xi_1 \wedge \eta_1); \Theta_{2x} = x. \tag{2}$$

На основании (2) определяем ФР времен пребывания в состояниях:

$$\begin{gathered} F_0(t) = F_{01}(t);\ \overline{F}_1(t) = \overline{F}_{01}(t)\overline{F}_{12}(t); \\ F_1(t) = 1 - \overline{F}_1(t) = 1 - \overline{F}_{01}(t)\overline{F}_{12}(t); \\ F_{2x}(t) = 1_x(t) = \begin{cases} 0, t < x; \\ 1, t \geq x. \end{cases} \end{gathered} \tag{3}$$

Вероятности переходов с учетом (3) определяются из выражений:

$$P_{01} = 1;$$

$$P\{(\xi_1 > \eta_1)\} = P_{10} = \int_0^{\infty} F_{10}(t) f_{12}(t) dt;$$

$$P\{S_1 \to S_{2x}\} = p_{1,2x} = \int_0^{\infty} f_{10}(u + x) f_{12}(u) du; \tag{4}$$

$$P\{S_{2x} \to S_0\} = p_{2x,0} = 1.$$

Стационарное распределение ВЦМ с учетом (3), (4) определяется по формуле [6] $\rho(x) = \int_x p(y, x)\rho(y) dy$ и имеет вид:

$$\begin{cases} \rho_0 = \int_0^{\infty} \rho_{2x} dx + \rho_1 \int_0^{\infty} F_{10}(t) f_{12}(t) dt; \\ \rho_1 = \rho_0; \\ \rho_{2x} = \int_0^{\infty} \rho_1 f_{10}(u + x) f_{12}(u) du; \\ \rho_0 + \rho_1 + \rho_{2x} = 1 - \textit{нормировочное условие}. \end{cases} \tag{5}$$

Выражая из системы (5) ρ_0, ρ_{2x}, имеем:

$$\rho_0 = \rho_1 = \int_0^{\infty} \rho_{2x} dx + \rho_0 \int_0^{\infty} F_{10}(t) f_{12}(t) dt;$$

$$\rho_{2x} = \int_0^{\infty} \rho_0 f_{10}(u + x) f_{12}(u) du.$$

Подставляя ρ_0, ρ_{2x} в условие нормировки, получим

$$\rho_0 + \rho_1 + \int_0^\infty \rho_{2x} dx = 2\rho_0 + \int_0^\infty \rho_{2x} dx = 1.$$

Тогда

$$\left[\rho_0 \int_0^\infty \int_0^\infty f_{10}(u+x) f_{12}(u) du dx + \rho_0 \int_0^\infty F_{10}(t) f_{12}(t) dt\right] + \rho_0 \int_0^\infty \int_0^\infty f_{10}(u+x) f_{12}(u) du dx = 1.$$

Учитывая, что

$$\int_0^\infty f_{12}(u) du \int_0^\infty f_{10}(u+x) dx = \int_0^\infty f_{12}(u) du \int_u^\infty f_{10}(z) dz,$$

а

$$\int_u^\infty f_{10}(z) dz = F_{10}(z)\Big|_u^\infty = 1 - F_{10}(u) = \overline{F}_{10}(u),$$

получим

$$\int_0^\infty f_{12}(u) du \int_u^\infty f_{10}(z) dz = \int_0^\infty f_{12}(u) \overline{F}_{10}(u) du = P\{\xi_1 < \eta_1\}.$$

Окончательно имеем:

$$\rho_0 = \rho_1 = \frac{1}{2 + P\{\xi_1 < \eta_1\}}; \tag{6}$$

$$\rho_{2x} = \frac{1}{2 + P\{\xi_1 < \eta_1\}} \cdot \int_0^\infty f_{10}(u+x) f_{12}(u) du.$$

Так как состояние S_{2x} содержит непрерывную компоненту x, то оно представляет собой множество непрерывных состояний. Суммируя удельные частоты попадания в непрерывное множество состояний S_{2x}, находим ρ_2 – частоту попадания во множество $2x$ в целом

$$\rho_2 = \int_0^\infty \rho_{2x} dx = \rho_0 \int_0^\infty \int_0^\infty f_{10}(u+x) f_{12}(u) du = \frac{1}{2 + P\{\xi_1 < \eta_1\}} \cdot P\{\xi_1 < \eta_1\} = \frac{P\{\xi_1 < \eta_1\}}{2 + P\{\xi_1 < \eta_1\}}.$$

Далее определим ФР $F_\theta(t)$ времени пребывания во множестве $2x$ в целом, вне зависимости от начального состояния, с помощью формулы усреднения [1]

$$F_\theta(t) = \frac{\int_{M_1} G_y(t) dy \int_{M_2} p(x, dy) \rho(dx)}{\int_{M_1} dy \int_{2_-} p(x, dy) \rho(dx)}, \tag{7}$$

где x – непрерывная составляющая множества M_-; y – непрерывная составляющая множества M_+; $\rho(dx)$ – частота попадания системы в состояния на интервале $[x, x+dx]$ непрерывного множства M_-; $p(x, dy)$ – плотность вероятности перехода из состояний непрерывного мноства M_- в состояния множества M_+ находящиеся на интервале $[y, y+dy]$; G_y – ФР времени выхода из состояний, находящихся на интервале $[y, y+dy]$, в множество M_-.

Подставляя в формулу (7) выражения для $p(x, dy)$ и $\rho(dx)$ из (5), (6), получим

$$F_{2x}^{\theta}(t) = \frac{\int_0^\infty dx \int_0^\infty f_{10}(u+x) f_{12}(u) 1_x(t) du}{\int_0^\infty dx \int_0^\infty f_{10}(u+x) f_{12}(u) du} = F_2(t).$$

Знаменатель (7) равен

$$\int_0^\infty dx \int_0^\infty f_{10}(u+x) f_{12}(u) du = P\{\xi_1 > \eta_1\}.$$

Числитель (7) имеет вид

$$\int_0^\infty \int_0^\infty f_{10}(u+x) f_{12}(u) 1_x(t) du dx = \int_0^\infty f_{12}(u) du \int_0^t f_{10}(u+x) dx. \qquad (8)$$

Учитывая, что

$$\int_0^t f_{10}(u+x) dx = \int_u^{t+u} f_{10}(z) dz = F_{10}(z)\Big|_u^{t+u} = F_{10}(t+u) - F_{10}(u), \qquad (9)$$

и подставляя (9) в (8), получим

$$\int_0^\infty f_{12}(u) du \int_0^t f_{10}(u+x) dx = \int_0^\infty f_{12}(u) [F_{10}(t+u) - F_{10}(u)] du =$$

$$= \int_0^\infty f_{12}(u) F_{10}(t+u) du - \int_0^\infty f_{12}(u) F_{10}(u) du.$$

Преобразовав полученный интеграл к виду

$$\int_0^\infty f_{12}(u) F_{10}(u) du = P\{\xi_1 > \eta_1\},$$

имеем

$$\int_0^\infty f_{12}(u) F_{10}(t+u) du - \int_0^\infty f_{12}(u) F_{10}(u) du = \int_0^\infty f_{12}(u) F_{10}(t+u) du - P\{\xi_1 > \eta_1\}.$$

Окончательно выражение для $F_{2x}^{\theta}(t)$ принимает вид

$$F_{2x}^{\theta}(t) = F_2(t) = \frac{\int_0^{\infty} f_{12}(u) F_{10}(t+u)du - P\{\xi_1 > \eta_1\}}{P\{\xi_1 > \eta_1\}}.$$

Так как $F_0(t);\ F_1(t)$ остались те же, что и ранее то, для перехода от системы с непрерывными состояниями к системе с дискретными состояниями осталось определить P_{12}, которое найдем, интегрируя выражение для $p_{1,2x}$ по x

$$P_{12} = \int_0^{\infty} p_{1,2x}dx = \int_0^{\infty} dx \int_0^{\infty} f_{10}(u+x) f_{12}(u)du = P\{\xi_1 > \eta_1\}.$$

Первый шаг выполнен. Граф состояний дискретной системы представлен на рис. 2.

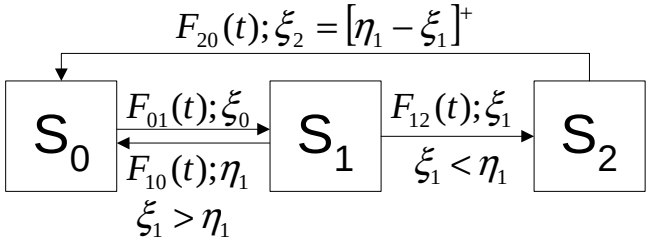


Рис. 2. Граф состояний дискретной системы

Второй шаг. Выделяем все пути выхода системы из подмножества

$$R_1 \to \{S_0 S_1\};$$
$$R_2 \to \{S_0 S_1 S_0 S_1\};$$
$$R_3 \to \{S_0 S_1 S_0 S_1 S_0 S_1\}\ldots$$

Остальные пути получаются при повторном попадании системы в состояния S_0 и S_1.

Третий шаг. Введем гипотезы реализации каждого из путей:

H_1 – система попала в состояния S_0 и S_1 по 1 разу;

H_2 – система попала в состояния S_0 и S_1 по 2 раза;

H_3 – система попала в состояния S_0 и S_1 по 3 раза;

H_n – система попала в состояния S_0 и S_1 по *n* раз.

Тогда вероятности реализации каждого из путей будут равны:

$$P(H_1) = P_1^2; \quad P(H_2) = \left(P_1^0\right)P_1^2;$$
$$P(H_3) = \left(P_1^0\right)^2 P_1^2; \quad P(H_n) = \left(P_1^0\right)^{n-1} P_1^2.$$

Определим плотности распределения времен пребывания системы в каждом из путей

$$f_{R1}(t)=(f_0(t)*f_1(t));$$
$$f_{R2}(t)=(f_0(t)*f_1(t))^{*(2)};$$
$$f_{R3}(t)=(f_0(t)*f_1(t))^{*(3)};$$
$$f_{Rn}(t)=(f_0(t)*f_1(t))^{*(n)},$$

где $*$ – знак операции свертки.

Четвертый шаг. Суммарная плотность распределения времени пребывания системы в подмножестве M_+ примет вид

$$f_\Sigma(t)=P_1^2(f_0(t)*f_0(t))+P_1^0P_1^2(f_0(t)*f_0(t))^{*(2)}+\ldots+$$
$$+\left(P_1^0\right)^{n-1}P_1^2(f_0(t)*f_0(t))^{*(n)}\ldots=P_1^2\sum_{i=1}^{\infty}\left(P_1^0\right)^{i-1}(f_0(t)*f_0(t))^{*(i)},$$

где $*$ – знак операции свертки.

Перейдя в область изображение по Лапласу, получим

$$f_\Sigma(s)=P_1^2\sum_{i=1}^{\infty}\left(P_1^0\right)^{i-1}(f_0(s)\cdot f_0(s))^i.$$

Учитывая, что полученное выражение представляет собой бесконечно убывающую геометрическую прогрессию со знаменателем ρ, и первым членом A_0 равными:

$$\rho=P_1^0\cdot f_0(s)\cdot f_1(s);$$
$$A_0=P_1^2\cdot f_0(s)\cdot f_1(s),$$

имеем

$$f_\Sigma(s)=\frac{P_1^2\cdot f_0(s)\cdot f_1(s)}{1-P_1^0\cdot f_0(s)\cdot f_1(s)}.$$

Исходными данными для моделирования служат ФР $F_{01}(t)$, $F_{10}(t)$ и $F_{12}(t)$ распределены по обобщенному закону Эрланга второго порядка с параметрами λ_1, λ_2; μ_1, μ_2; γ_1, γ_2 соответственно, причем

$$f_{01}(t)=\frac{\lambda_1\lambda_2(e^{-\lambda_1 t}-e^{-\lambda_2 t})}{\lambda_2-\lambda_1},$$

где λ_1=2,725 (ч$^{-1}$); λ_2=0,275 (ч$^{-1}$);

$$f_{10}(t)=\frac{\mu_1\mu_2(e^{-\mu_1 t}-e^{-\mu_2 t})}{\mu_2-\mu_1},$$

где μ_1=80 (ч$^{-1}$); μ_2=26,7 (ч$^{-1}$).

$$f_{12}(t)=\frac{\upsilon_1\upsilon_2(e^{-\upsilon_1 t}-e^{-\upsilon_2 t})}{\upsilon_2-\upsilon_1},$$

где υ_1=46,294 (ч$^{-1}$); υ_2=458,268 (ч$^{-1}$).

Результаты сравнения функций распределения $F_{\Sigma}^{\theta}(t)$ и $F_{отк}(t)$, полученных двумя методами представлены на рис. 3.

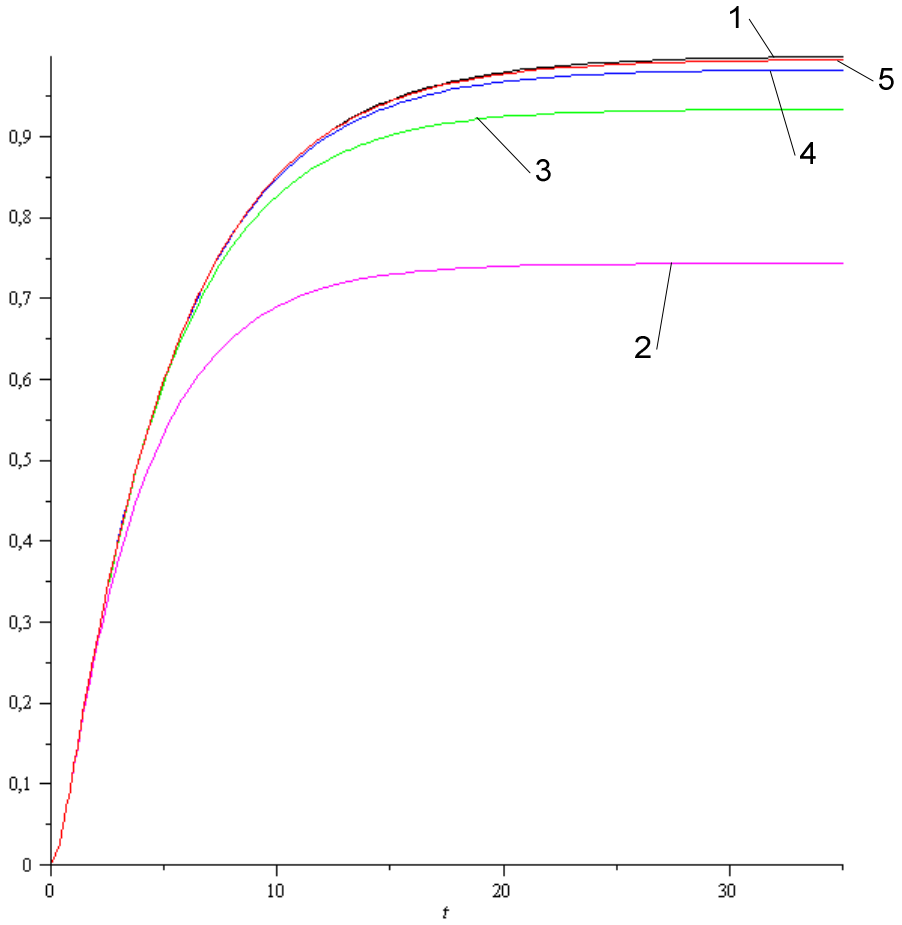


Рис. 3. Сравнение результатов моделирования классическим приближенным методом последовательных приближений (1) и предлагаемым точным методом: 1 – решение предлагаемым точным методом и приближенным методом при 15 приближениях; 2 – нулевое приближение; 3 – третье приближение; 4 – четвертое приближение; 5 – пятое приближение

Кривая 1 показывает, что результаты моделирования предложенным точным методом и приближенным (при 15 приближениях) практически совпадают. Кривые 2, 3, 4, 5 показывают стремление результата моделирования по формуле (1) к точному решению в зависимости от количества приближений.

Проведенные исследования подтвердили правильность предложенного метода, что открывает новые широкие возможности в области моделирования стохастических систем. В дальнейших исследованиях авторы собираются провести сравнение разработанного метода с классическим на примерах моделирования производственных и информационных систем.

Исследования выполнены при поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований № 15-01-05840.

Список литературы

1. Копп В.Я., Ю.Е. Обжерин, А.И. Песчанский Моделирование автоматизированных линий. Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2006. 240 с.

2. Моделирование систем контроля с обратными связями / В.Я. Копп, А.И. Балакин, А.А Скидан [и др.] // Зб. наук. праць СНУЯЕтаП. Вип.3(19). Севастополь: СНУЯЕтаП, 2006. С. 252 – 256.

3. Вентцель Е.С. Теория вероятностей: учебник для вузов. 6-е изд. стер. М.: Высш. шк., 1999. 576 с.

4. Королюк В.С., Турбин А.Ф. Процессы марковского восстановления в задачах надежности систем. Киев: Наук. думка, 1982. 236 с.

5. Филипович О.В., Копп В.Я., Галкина Л.В. Моделирование участков автоматизированных линий с учетом стохастического характера межоперационных заделов // Сб. науч. тр. СИЯЭиП. Севастополь: СИЯЭиП, 2001. Вып. 5. С. 213–217.

6. Королюк В.С. Стохастические модели систем / Отв. ред. А.Ф. Турбин. Киев: Наук. думка, 1989. 208 с.

Заморёнов Михаил Вадимович, канд. техн. наук, доц., zamoryonoff@gmail.com, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет,

Копп Вадим Яковлевич, д-р техн. наук, проф., v_kopp@mail.ru, Россия, Севастополь, Севастополь, Севастопольский государственный университет,

Филипович Олег Викторович, канд. техн. наук, доц., phiol@ukr.net, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет,

Заморёнова Дарья Викторовна, канд. техн. наук, доц., zamik@ukr.net, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет

MODELING OF THE STRUCTURE "CELL – STORAGE DEVICE" USING THE ROUTE METHOD WITH AN ABSOLUTELY SAFE STORAGE DEVICE.

M.V. Zamoryonov, V.Ya. Kopp, O.V. Filipovich, D.V. Zamoryonova

The route method, allowing to model the functioning process of the semi-Markov systems is described. The modeling of the functioning process of the structure "cell -drive" is accomplished. The comparison of the proposed modeling method and the one well-known, which is based on Markov renewal equations, is performed.

Key words: semi-Markov system, route method, the cell- storage device.

Zamoryonov Mikhail Vadimovich, candidate of technical sciences, docent, zamoryonoff@gmail.com, Russia, Sevastopol, Sevastopol National University,

Kopp Vadim Yakovlevich, doctor of technical sciences, professor, v_kopp@mail.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol National University,

Filipovich Oleg Viktorovich, candidate of technical sciences, docent, phiol@mail.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol national university,

Zamoryonova Darya Viktorovna, candidate of technical sciences, docent, zamik@ukr.net, Russia, Sevastopol, Sevastopol national university

УДК 62-251:532.542.4

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ В ПОДШИПНИКАХ ЖИДКОСТНОГО ТРЕНИЯ ПРИ СМАЗКЕ ДВУХФАЗНОЙ КИПЯЩЕЙ СРЕДОЙ

Л.А. Савин, А.В. Сытин, В.О. Тюрин

Проведено обоснование применения низкокипящих маловязких жидкостей в качестве смазочных материалов подшипников жидкостного трения. Рассмотрены основные теплофизические и трибологические свойства криогенных жидкостей, применяемых в качестве компонент топлив жидкостных ракетных двигателей и рабочих тел различных роторных агрегатов. Проведено формирование математической модели расчета потерь мощности на трение и прокачку смазочного материала в гидростатодинамическом подшипнике. Приведены результаты расчета потерь мощности в зависимости от температуры и давления подачи.

Ключевые слова: момент трения, коэффициент трения, потери мощности, фазовые превращения, низкокипящие маловязкие жидкости, паросодержание, поля давлений.

Критериями выбора смазочных материалов подшипников жидкостного трения могут быть различные факторы в зависимости от назначения машин и агрегатов. В ряде случаев в опорных узлах в качестве смазочных материалов используются рабочие тела машин – жидкие металлы, химически активные вещества, перекачиваемые компоненты топлива. Наблюдается определенная тенденция применения низкотемпературных

и криогенных жидкостей (жидкий кислород, водород, неон, аммиак и т. д.) в различных технических системах. Это в свою очередь связано с решением двух глобальных проблем: разработкой надежных экономичных роторных агрегатов длительного ресурса (двигателей, насосов, компрессоров, передач вращательного движения) и созданием промышленных установок для получения дешевых низкотемпературных жидкостей, в частности с использованием высокооборотных турбодетандеров, работающих на подшипниках жидкостного трения при смазке криогенными жидкостями, что предъявляет ряд новых требований к работоспособности опорных узлов. При использовании низкокипящих маловязких компонентов в качестве смазочных материалов возникают специфические явления в несущих слоях, которые связаны с фазовыми превращениями, повышенной турбулентностью и критическими течениями [1]. Это требует комплексного экспериментально-теоретического исследования влияния физических эффектов на характеристики течения, несущую способность, расход смазочного материала, также на энергетические показатели опор роторов.

Моделирование двухфазных течений. Фазовое состояние вещества зависит от совокупности теплофизических характеристик. В однофазной области, например в жидкости, для определения свойств требуется знание минимум двух параметров, в качестве которых могут выступать энтальпия, теплоемкость, энтропия и т. д. С точки зрения удобства поиска и наличия справочных данных наибольшее практическое распространение имеют давление P и температура T. На линии насыщения достаточно знать один параметр и значение паросодержания. На рис. 1 показана диаграмма фазового состояния в координатах (P–T). Процесс превращения жидкости в пар при увеличении температуры называется кипением, при резком уменьшении давления происходит паровая кавитация [2–4]. В подшипнике скольжения происходит одновременно увеличение температуры смазочного материала в результате диссипации и теплообмена, а также падение давления в результате дросселирования. Можно констатировать, что в данном случае фазовый переход происходит в результате вскипания и кавитации, что соответствует кривой A–D.

Применение маловязких сжимаемых криогенных жидкостей (жидкий водород имеет сжимаемость до 4 %) для смазки и охлаждения подшипников скольжения порождает комплекс задач, связанных с обеспечением устойчивости и работоспособности опор в условиях больших перепадов давлений и температур, значительных скоростей и нагрузок. Кроме того, в процессе течения низкотемпературных рабочих тел по гидравлическим трактам подшипника возможны фазовые превращения в результате вскипания и кавитации. Появление паровой фазы существенно изменяет свойства несущего смазочного слоя и влияет на динамические и энергетические характеристики роторно-опорных узлов [1,4].

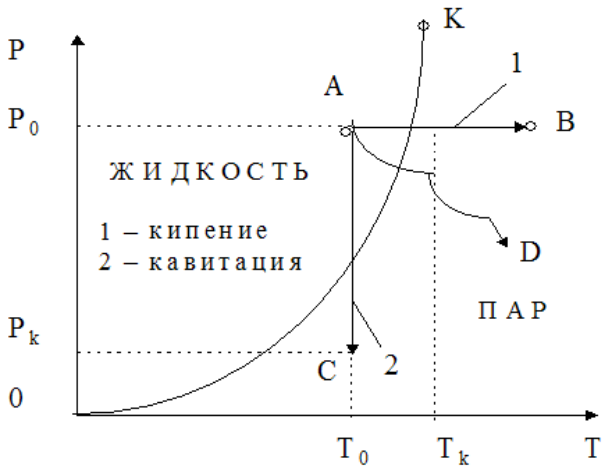


Рис. 1. Диаграмма состояния в координатах P – T (давление – температура)

Создание несущей способности и разделение опорных поверхностей в подшипниках жидкостного трения реализуется за счет трех основных физических эффектов: гидродинамического клина вследствие вязкостных свойств смазочного материала при сдвиговых течениях, гидростатического всплытия при напорных течениях смазки с использованием насосного оборудования и эффекта сжатия несущего слоя при радиальном движении вала с опорной поверхностью втулки подшипника. Следует заметить, что при смазке маловязкими средами при низких давлениях прокачки для обеспечения безызностного режима требуются высокие скорости вращения ротора. Кроме того, работа подшипников в гидродинамическом режиме требует высокой точности обработки и сборки, малые величины радиальных зазоров, чувствительность к силовым и температурным деформациям и износ на пусковых режимах. Более перспективным представляется вариант использования гидростатодинамических подшипников (ГСДП), в которых несущая способность формируется на основе комбинации эффекта гидродинамического клина и гидростатического всплытия в результате давления подачи от источника питания. ГСДП имеют высокие эксплуатационные свойства и представляют собой достаточно сложный объект математического моделирования, для расчета характеристик которого необходимо решать краевую задачу с встроенными источниками массы, энергии и расхода, которые являются дополнительными граничными условиями.

Необходимыми условиями существования устойчивого слоя смазки в ГСДП (рис. 2) является вязкость, смачиваемость и отсутствие скольжения смазочного материала по разделяемым опорным поверхностям. Избыточные давления в смазочной пленке формируют гидродинамические силы, которые передаются на вал и корпус подшипника и уравновешивают внешнюю нагрузку. На входе и выходе из подшипника давления могут

быть равны нулю, либо иметь вполне определенные величины давления подачи P_0 и противодавления в полости слива P_a. Градиент давления внутри смазочного слоя является переменным вследствие изменения радиального зазора, вязкости, плотности и других величин.

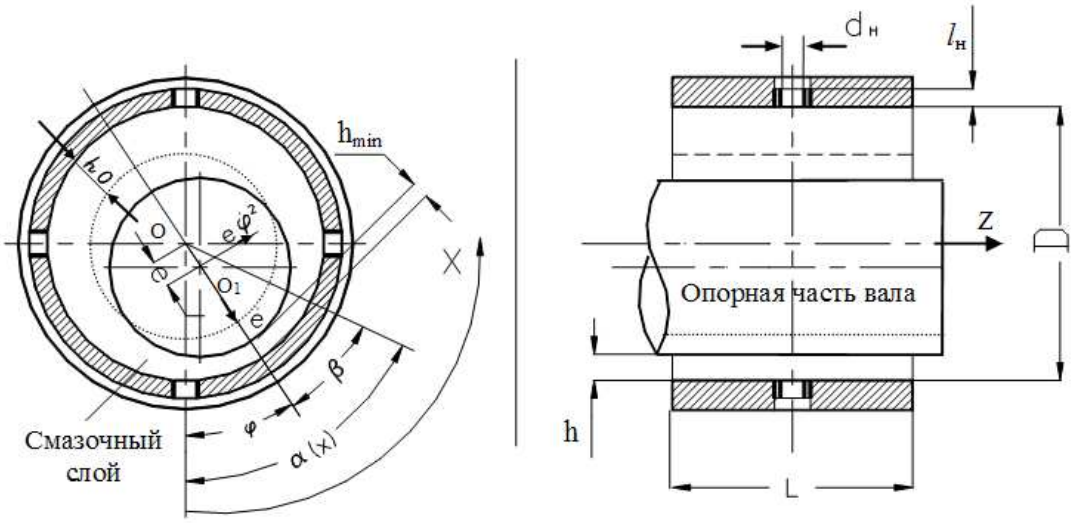


Рис. 2. Схема ГСДП

Описание течения двухфазной жидкости возможно на основе гетерогенной или гомогенной модели. Гетерогенная модель предполагает раздельное рассмотрение течения жидкой и газовой фаз, априорное задание структуры течения (пузырьковое, пробковое), а также энергомассообмен между ними [5]. В основу расчета в данной работе положена гомогенная модель, предполагающая возможность задания паросодержания X в каждой точке смазочного слоя:

$$X = \frac{i_m - i'}{i'' - i'},$$

где i_m – осредненное значение энтальпии, которое определяется при решении уравнения (2), м^2/с^2; i', i'' – энтальпия в жидкой и газовой фазах, м^2/с^2.

Осредненные значения двухфазного потока находим по свойствам фаз на линии насыщения и массовому паросодержанию. Взаимосвязь экстенсивных параметров двухфазной среды может быть получена на основании свойства аддитивности:

$$i_m = i' \cdot (1 - X) + i'' \cdot X; \qquad \rho_m = \frac{\rho' - \rho''}{\rho'' \cdot (1 - X) + \rho' \cdot X};$$

$$\mu_m = \mu' \cdot \left(1 + 2{,}5 \cdot \frac{X \cdot \rho_m}{\rho''} \cdot \frac{\mu'' + \frac{2}{5}\mu'}{\mu'' + \mu'} \right),$$

где ρ_m – осредненное значение плотности, кг/м^3; ρ', ρ'' – плотность в жидкой и газовой фазах, кг/м^3; μ_m, – осредненное значение коэффициента динамической вязкости, Па·с; μ', μ'' – коэффициент динамической вязкости в жидкой и газовой фазах, Па·с.

Приведенные в формулах значения фазовых составляющих берем на левой и правой пограничной кривой со стороны двухфазной области [6]. Это связано с тем, что кипение относится к фазовым переходам первого рода, для которых характерно скачкообразное изменение свойств при переходе через кривую фазового равновесия. Значения теплофизических параметров для газовой и жидкой фаз находим по таблицам [7,8].

Расчет полей давлений. Расчет стационарных и динамических характеристик подшипников основывается на определении полей даваления *P(x,z)* в смазочном слое, которые основываются на базовых уравнениях гидродинамической теории смазки: уравнения Рейнольдса и баланса энергий, а также соотношения для расчета гидродинамических и теплофизических параметров среды, которые замыкают систему дифференциальных уравнений. Наибольшие сложности связаны с решением обобщенного уравнения Рейнольдса для давлений на случай двухмерного турбулентного квазистационарного течения вязкой сжимаемой двухфазной среды с осредненными свойствами, в основу которого положены два фундаментальных уравнения гидромеханики, отражающие законы сохранения импульса и массы: уравнения Навье-Стокса и неразрывности. Для случая стационарного течения характеристики подшипников скольжения определяем при фиксированном положении вала в подшипнике (e=const, φ=0), а уравнение Рейнольдса имеет вид:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\rho h^3}{\mu k_x}\frac{\partial P}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\rho h^3}{\mu k_z}\frac{\partial P}{\partial z}\right)=3\omega D\frac{\partial(\rho h)}{\partial x}, \qquad (1)$$

где ρ – плотность, кг/м^3; h – радиальный зазор, м; μ – коэффициент динамической вязкости, Па·с; k_x, k_z – коэффициенты турбулентности; P – давление, Па; ω – угловая скорость вращения ротора, рад/с; D – диаметр подшипника, м.

Моделирование подшипников скольжения в условиях вскипания и двухфазного состояния смазки представляет собой неизотермическую задачу. Цель включения уравнения энергии в расчетную модель состоит в необходимости учета влияния фазового перехода на анизотропию термодинамических и теплофизических свойств смазочного материала. В наиболее общем случае уравнение энергий характеризует изменение энергии в фиксированной точке смазочного слоя в результате совершения механической работы сжатия при радиальных колебаниях вала dP/dt, теплопроводности внутри слоя $div(\lambda gradT)$ и за счет диссипации при сдвиговом и напорном течениях μΦ. В случае течения двухфазной

кипящей среды целесообразно рассмотреть уравнение энергий в форме энтальпий. При стационарном варианте решения задачи сжатие слоя не учитывается, а изменение энергии вследствие теплообмена. В этом случае уравнение энергий имеет вид:

$$\rho\left(V_x \frac{\partial i}{\partial x} + V_z \frac{\partial i}{\partial z}\right) = \mu\left[\left(\frac{\partial V_x}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial V_z}{\partial y}\right)^2\right], \quad (2)$$

где i – энтальпия, м^2/с^2; V_x, V_z – проекции скорости, м/с.

В системе уравнений (1–2) определению подлежат следующие параметры: давление, температура (энтальпия), плотность, вязкость, теплоемкость, коэффициенты турбулентности. Для замыкания системы (равенство числа неизвестных числу уравнений) используется ряд дополнительных соотношений: функция зазора $h(x) = h_0 - e \cdot \cos(\alpha(x))$, аппроксимационная зависимость теплофизических параметров, коэффициенты турбулентности k_x и k_z [9]

$$k_x = 1 + 0{,}044 \cdot (k^{*2} \cdot \mathrm{Re})^{0{,}725}; k_z = 1 + 0{,}0247 \cdot (k^{*2} \cdot \mathrm{Re})^{0{,}65}.$$

Решение системы уравнений выполнялось на основе метода конечных разностей с использованием алгоритма продольно-поперечной прогонки. Алгоритм расчета полей давлений подшипника скольжения с парожидкостной смазкой включает следующие операции:

1. Задание исходных данных для расчета (геометрические и рабочие параметры подшипника, начальные поля давлений и температур, точность расчета, густота размерной и временной сеток).

2. Определение теплофизических и термодинамических свойств смазочного материала на основании аппроксимационных зависимостей или интерполяции табличных значений.

3. Решение уравнения баланса энергий с целью определения поля энтальпий в смазочном слое.

4. Расчет давлений в питающих камерах путем решения уравнения баланса расходов.

5. Определение поля давлений путем решения уравнения Рейнольдса.

6. Организация циклов путем сравнения давлений на предыдущих и последующих итерациях с целью получения решения с заданной точностью.

7. Процедура решения построена согласно итерационной схеме, использующей общий критерий сходимости

$$\left(\left(m^n - m^{n-1}\right) / m^n\right) \le \xi,$$

где n – порядковый номер итерации; m – значение сравниваемого параметра; ξ – выбранная точность решения i-го уравнения.

Потери мощности на трение. Энергетические потери в ГСДП связаны со сдвиговыми и напорными течениями, которые проявляются в результате трения внутри смазочного слоя и окружающими поверхностями. Потери мощности являются одной из характеристик подшипников наряду с несущей способностью, расходом смазочного материала и комплексом динамических характеристик. В общем случае потери мощности ΔN в ГСДП связаны с потерями на трение N_f и потерями на прокачку N_p

$$\Delta N = N_f + N_p = \frac{\omega D}{4}\int_0^L dz \int \left(\frac{\omega \mu k_x D}{h} + h\frac{\partial P}{\partial x} \right) dx + P_0 Q,$$

где ω – угловая скорость вращения, рад/с; D – диаметр вала, м; L – длина вала, м; μ – коэффициент динамической вязкости, Па·с; k_x – коэффициент турбулентности; h – величина радиального зазора, м; P – уровень давления, Па; P_0 – давление подачи, Па; Q – объемный расход, м^3/с.

Расчет ΔN проводился в каждой точке смазочного слоя с учетом значений поля давлений *P(x,z)*. Выполненные вычислительные эксперименты показали удовлетворительную работу программы в широком диапазоне изменения параметров. Исключение составляют области высоких частот вращения (n>30000 об/мин), значительных дисбалансов (q>5·10^{-4} кг·м) и больших степеней паросодержания (X>0,5). При наличии этих факторов в отдельных случаях наблюдалась неустойчивая сходимость задачи, проявляющаяся в резком увеличении времени счета. Математическая и программная модель расчета *P(x,z)* и *T(x,z)* прошли верификацию на основе сравнения теоретических результатов с экспериментальными данными [1, 10]. Расхождение результатов по давлениям в определенных точках смазочного слоя не превышало 10 %, а по температурам – 7–8 %, что соответствует абсолютному значению T<<1^{0}C. Следует отметить, что экспериментально было зафиксировано уменьшение температуры в смазочном слое по длине подшипника всвязи с началом вскипания (рис. 3) [11, 12]. Начало кипения в несущем слое можно определить по резкому снижению температуры, которая в каждой точке будет равна температуре кипения при данном давлении. При T_o=340 К вскипание начинается близко к торцу подшипника, с повышением T_o до 350 К начинается фазовый переход и соответственно падение температуры смещается ближе к линии питающих камер.

Результаты вычислительных экспериментов с использованием разработанных математической и программной моделей представлены на рис. 4, 5. Вполне логично, что в зоне жидкостной смазки с увеличением температуры происходит уменьшение потерь на трение вследствие физической закономерности снижения вязкости при нагревании. С переходом в двухфазную зону (на рисунках граница фазового состояния

показана штриховой линией) происходит изменение характера зависимости в связи с появлением пара, вязкость которого значительно меньше, что в конечном счете изменяет интегральную вязкость в смазочном слое. Следует отметить, что снижение потерь на трение в водородной среде (см. рис. 5) происходит значительно быстрее, чем в более вязком кислороде. На представленных графиках не представлены рехзультаты в паровой среде, в которой с ростом температуры происходит увеличение вязкости. В сверхкритической области, которая расположена выше критической точки на диаграмме $P - T$ и за штриховой линией (см. рис. 4, 5), изменения теплофизических свойств среды и характера зависимости N_f от температуры происходит плавно, без видимых перепадов кривизны [11].

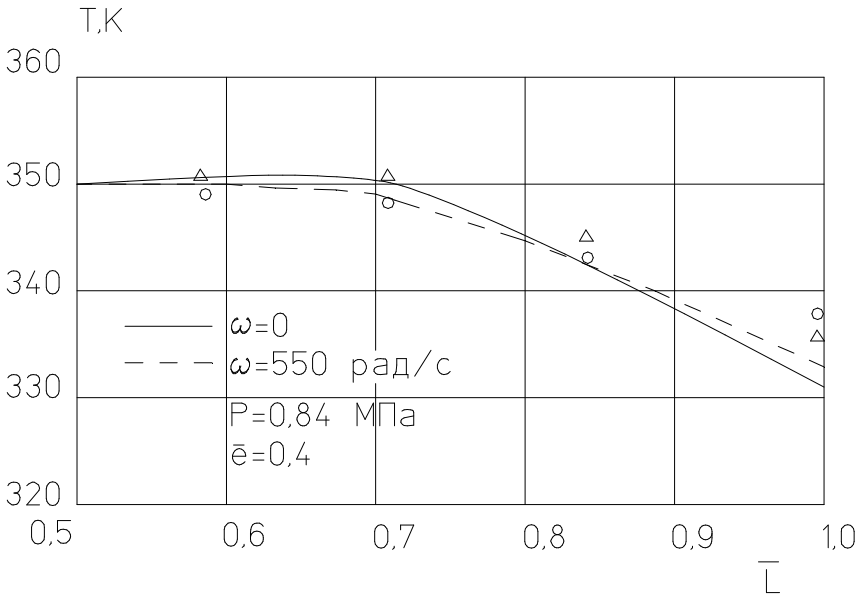


Рис. 3. Изменение температур по длине ГСДП

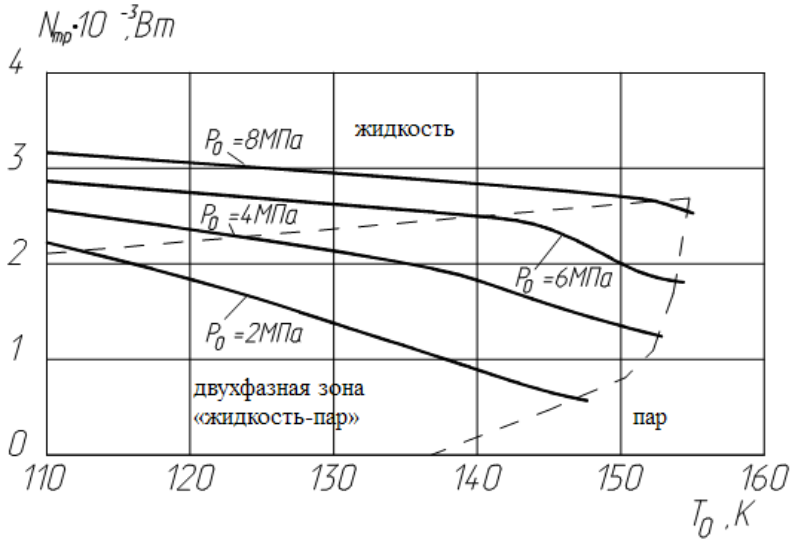


Рис. 4. Потери мощности в ГСДП при смазке кислородом

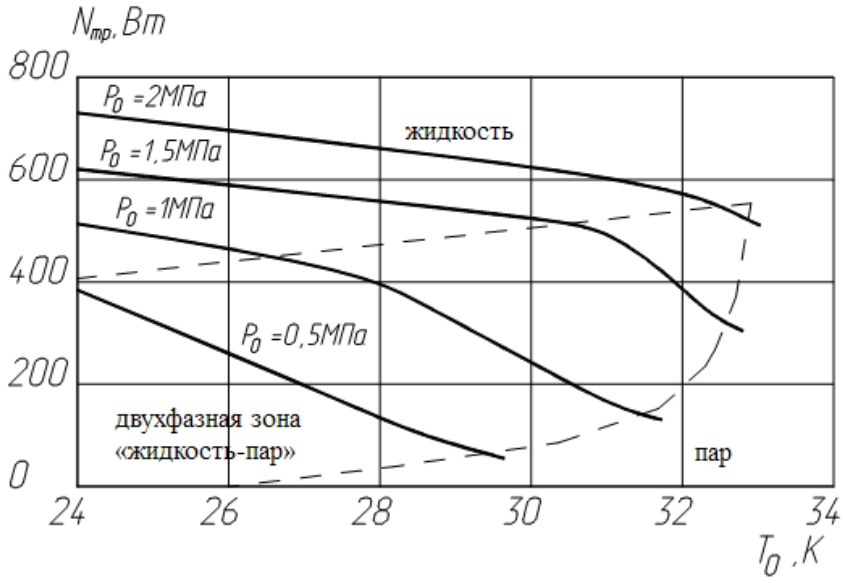


Рис. 5. Потери мощности в ГСДП при смазке водородом

Различия в теплофизических свойствах жидкого кислорода и водорода, прежде всего, в динамической вязкости и сжимаемости, определяют некоторые качественные и количественные расхождения в зависимости потерь на трение N_f в смазочном слое ГСДП от температуры и степени паросодержания. Можно констатировать, что функция $N_f = f(T, X)$ для кислорода имеет менее выраженный характер, чем для маловязкого и сжимаемого водорода. На рис. 4 изменения температуры в пределах 10 К приводит к снижению N_f на 3…4 % в жидкой зоне и на 10…15 % в двухфазной зоне. Причем уменьшение трения происходит примерно в линейной или близкой к ней зависимости от среднего паросодержания в смазочном слое. Для водорода (см. рис. 5) уменьшение N_f в диапазоне изменения температру 10 К более значительно и составляет 5…8 % в жидкой смазке и до 80 % в двухфазной зоне. Следует также отметить различие в интенсивности изменения зависимости N_f от температуры и паросодержания при различных значениях давлений. Вцелом можно отметить, что с ростом давлений происходит сужение области двухфазных течений (на рис. 4, 5 зона, ограниченная штриховой линией) и снижение зависимости N_f от температуры.

Заключение. Для оценки влияния вскипания и двухфазного состояния смазочного материала на энергетические характеристики радиальных ГСДП с жиклерным дросселированием был проведен комплекс теоретических и экспериментальных исследований. Основной целью физического эксперимента был сбор информации для проведения верификации математической модели, а также подтверждения эффекта снижения температуры по длине подшипника вследствие вскипания смазки при дросселировании и повышении температуры при диссипации энергии вращения. Была сформирована и численно реализована

неизотермическая модель смазочного процесса в ГСДП. Проведенный вычислительный эксперимент с использованием разработанной программы расчета позволил получить результаты, свидетельствующие о значительном влиянии вскипания и двухфазного состояния смазочного материала на несущую способность и потери мощности на трение. С появлением паровой фазы в несущем слое происходит уменьшение интегральной вязкости, что приводит к снижению уровня давлений и диссипации энергии сдвига. В двухфазной области снижение потерь на трение может составлять более 100 %. Несмотря на улучшение энергетических характеристик, вскипание смазки и появление паровой фазы следует рассматривать как негативное явление с точки зрения работоспособности ГСДП, так как помимо резкого уменьшения грузоподъемности, также происходит снижение уровня демпфирования и возможности появления нелинейных самовозбуждающихся колебаний.

Статья подготовлена в рамках выполнения проекта № 16-19-00186 «Планирование оптимальных по расходу энергии траекторий движения роторов мехатронных модулей в средах сложной реологии». Моделирование двухфазных напорно-сдвиговых течений проводилось по плану выполнения проекта № 9.101.2014/К «Гидродинамические эффекты в напорно-сдвиговых течениях сред сложной реологии в каналах переменной геометрии».

Список литературы

1. Савин Л.А., Соломин О.В. Моделирование роторных систем с опорами жидкостного трения: монография. М.: Машиностроение-1, 2006. 444 с.

2. Акуличев В.А. Кавитация в криогенных и кипящих жидкостях. М.: Наука, 1978. 280 с.

3. Кириллин В.А., Сычев В.В., Шейндлин А.Е. Техническая термодинамика. М.: Энергия, 1968. 472 с.

4. Дейч Э.М., Филиппов Г. Газодинамика двухфазных сред. М.: Энергия, 1968. 424 с.

5. Нигматуллин Р.И. Основы механики гетерогенных сред. М.: Наука, 1978. 336 с.

6. Савин Л.А., Соломин О.В. Расчет подшипников скольжения в условиях двухфазного состояния смазочного материала // Известия вузов. Машиностроение. № 2. 2004. С. 36-42.

7. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М., 1972. 720 с.

8. Рабинович В.А., Вассерман А.А., Недоступ В.И., Векслер Л.С. Теплофизические свойства неона, аргона, криптона и ксенона. М., Издательство стандартов, 1976. 636 с.

9. Константинеску В.Н. Газовая смазка. М.: Машиностроение, 1968. 718 с.

10. Савин Л.А., Соломин О.В. Динамика жесткого ротора на подшипниках скольжения, смазываемых криогенной жидкостью // Известия вузов. Машиностроение. № 4. 2004. С. 27-38.

11. Savin L., Solomin O. Applied theory of steam-liquid lubrication. IFToMM Sixth International Conference on Rotor Dynamics: Proceedings. Sydney, Australia, 2002. Vol. II. P. 637-645.

12. Savin L., Solomin O., Ustinov D. Rotor dynamics on friction bearing with cryogenic lubrication. Tenth World Congress on the Theory of Machines and Mechanisms. Finland, Oulu. 1999. Vol. 4. P. 1716-1721.

Савин Леонид Алексеевич, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой, savin@ostu.ru, Россия, Орел, Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева,

Сытин Антон Валерьевич, канд. техн. наук, доц., sytin@mail.ru, Россия, Орел, Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева,

Тюрин Валентин Олегович, асп., v7a7l@mail.ru, Россия, Орел, Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева

POWER LOSS IN FLUID-FILM BEARINGS
LUBRICATED WITH MULTIPHASE BOILING MEDIUM

L.A. Savin, A.V. Sytin, V.O. Tyurin

Justification of application of low-boiling low-viscosity fluids as lubricants for fluid-film bearings has been presented. The main thermophysical and tribological properties of criogenic fluids used as fuel components of liquid propellant rocket engines and various rotor machines have been investigated. A mathematical model has been formed to calculate power losses due to friction and pumping of a lubricant in a hybrid bearing has been carried out. The calculation results of power loss vs temperature and feeding pressure have been presented.

Key words: friction torque, friction coefficient, power loss, phase transition, low-boiling low-viscosity fluids, vapour content, pressure distribution

Savin Leonid Alekseevich, doctor of technical science, professor, manager of cathedra, savin@ostu.ru, Russia, Oryol, Oryol State University named after I.S. Turgenev,

Sytin Anton Valerievich, candidate of technical science, docent, sytin@mail.ru, Russia, Oryol, Oryol State University named after I.S. Turgenev,

Tyurin Valentin Olegovich, postgraduate, v7a7l@mail.ru, Russia, Oryol, Oryol State University named after I.S. Turgenev

УДК 621.833

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ПЕРСПЕКТИВНЫХ НАНОМАТЕРИАЛОВ

Д.Н. Ширшиков, М.С. Спирин, Ю.М. Зайцев

Проведен вычислительный алгоритм определения эффективных значений магнитных и диэлектрических проницаемостей магнитных нанокомпозитов на основе опаловых матриц.

Ключевые слова: электромагнитный процесс, магнитный нанокомпозит, 3D-периодическая структура, магнитная проницаемость, диэлектрическая проницаемость, опаловая матрица.

В последние годы резко возрос интерес к получению и исследованию перспективных наноструктур из магнитных нанокомпозитов на основе правильных упаковок диэлектрических наносфер (опаловые матрицы) из двуокиси кремния SiO_2с диаметрами 180...1200 нм. Опаловые матрицы на основе SiO_2 характеризуются существенными преимуществами перед другими подобными материалами, а именно: наличием широкого диапазона диаметров наносфер, возможностью получения массивных образцов, сравнительной легкостью изготовления структур, получивших название "инверсных опалов" – после заполнения межсферических пустот необходимыми материалами химическими методами вытравливаются наносферы SiO_2, при этом остается трехмерная нанорешетка введенных материалов. Дешевизна опаловых матриц и доступность изготовления делают их наиболее перспективным материалом для создания 3D-магнитных нанокомпозитов.

Представлен магнитный нанокомпонент на основе опаловой матрицы (рис. 1), который представляет 3D-периодическую структуру с ячейками a, b, c. На рис. 1 показано распространение свободного волнового электромагнитного процесса $(\vec{E}, \vec{H})$ в бесконечной 3D-периодической структуре магнитного нанокомпозита в направлении вектора $\vec{k} = (\cos\beta_x, \cos\beta_y \cos\beta_z)$. Магнитные наночастицы намагничены постоянным внешним магнитным полем $\vec{H}_{\text{вн}} = (H_0 \cos\alpha_x, H_0 \cos\alpha_y H_0 \cos\alpha_z)$, где $\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$ углы между вектором $\vec{H}_{\text{вн}}$ и координатными осями.

Свободный волновой процесс в периодической структуре в направлении вектора $\vec{k}$ можно рассматривать как наложение бесконечной совокупности плоских неоднородных волн

$$\vec{E}(\xi,\eta,\zeta) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \vec{\tilde{E}}_n(\xi,\eta)\exp(-i\Gamma_n\zeta),\ \vec{H}(\xi,\eta,\zeta) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \vec{\tilde{H}}_n(\xi,\eta)\exp(-i\Gamma_n\zeta)$$

с постоянными распространения $\Gamma_n = \Gamma_0 + \dfrac{2\pi n}{\Lambda}$, $n = \pm 1, \pm 2, ..., \pm\infty$.

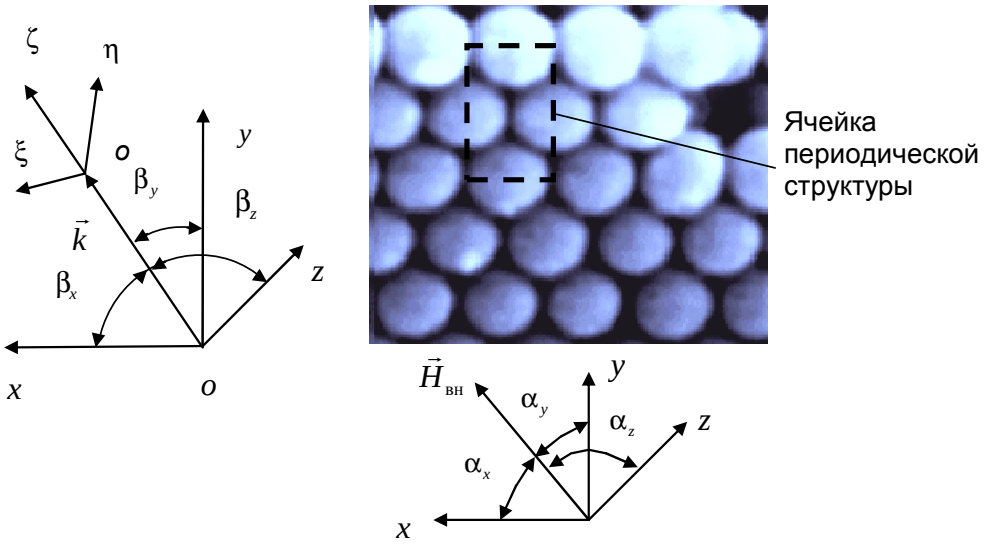


Рис. 1. Распространения свободного волнового процесса в бесконечной трехмерной периодической структуре: (β_x β_y β_z) – направление волнового процесса; (α_x α_y α_z) – направление внешнего постоянного магнитного поля $\vec{H}_{\text{вн}}$

Свободный электромагнитный процесс, в трехмерной периодической структуре (рис. 1) подчинен теореме Флоке в форме:

$$\begin{cases} \vec{E}(x+a,y,z) = \vec{E}(x,y,z)\exp(-i\varphi_x), \\ \vec{H}(x+a,y,z) = \vec{H}(x,y,z)\exp(-i\varphi_x), \\ \vec{E}(x,y+b,z) = \vec{E}(x,y,z)\exp(-i\varphi_y), \\ \vec{H}(x,y+b,z) = \vec{H}(x,y,z)\exp(-i\varphi_y), \\ \vec{E}(x,y,z+c) = \vec{E}(x,y,z)\exp(-i\varphi_z), \\ \vec{H}(x,y,z+c) = \vec{H}(x,y,z)\exp(-i\varphi_z), \end{cases} \qquad (1)$$

где $\varphi_x = \Gamma_n a\cos\beta_x$, $\varphi_y = \Gamma_n b\cos\beta_y$, $\varphi_z = \Gamma_n c\cos\beta_z$; $\beta_x, \beta_y, \beta_z$ - углы ориентации направления распространения волнового процесса.

Выделим в трехмерной периодической структуре элементарную ячейку с геометрическими размерами a, b, c (рис. 1) и представим ее отдельным блоком (рис. 2) с дескриптором в виде матрицы проводимости

$$\mathbf{b} = \mathbf{Y} \cdot \mathbf{a}, \qquad (2)$$

где векторы **a** и **b** составлены соответственно из коэффициентов $a_{n(\beta)}$ и $b_{k(\alpha)}$ ($\alpha, \beta = 1, 2, ...6$; $k, n = 1, 2, ...N$) рядов Фурье.

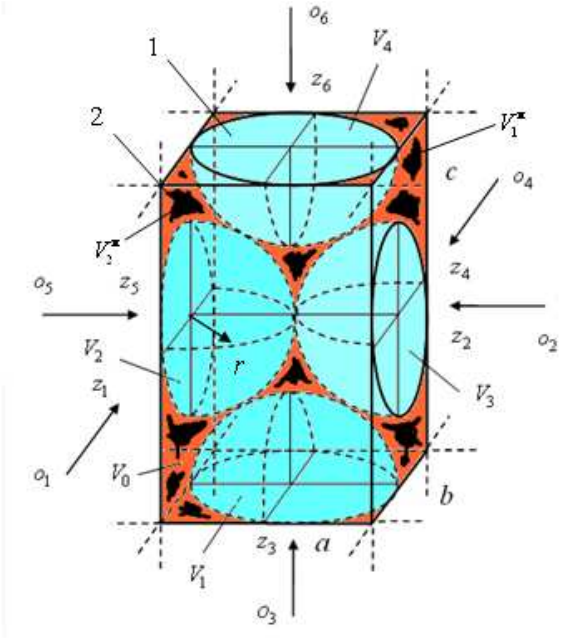


Рис. 2. Ячейки трехмерной периодической структуры в виде отдельного блоком:
1 – диэлектрические наносферы ($V = V_1 \cup V_2 \cup ... \cup V_4$)***; 2 – магнитные наночастицы*** ($V^{\text{м}} = V_1^{\text{м}} \cup V_2^{\text{м}} \cup ...$)***;*** V_0 ***– основная область,*** $o_\alpha z_\alpha$ $(\alpha = 1,2,...,6)$ ***– локальные системы координат для сечений*** S_α***;*** a, b, c ***– геометрические размеры параллелепипеда***

Условия теоремы Флоке в терминах матрицы проводимости принимают следующий вид:

$$\begin{cases} a_{n(4)} = a_{n(1)} \exp(-i\varphi_x),\ a_{n(5)} = a_{n(2)} \exp(-i\varphi_y), \\ a_{n(6)} = a_{n(3)} \exp(-i\varphi_z),\ b_{k(4)} = b_{k(1)} \exp(-i\varphi_x), \\ b_{k(5)} = b_{k(2)} \exp(-i\varphi_y),\ b_{k(6)} = b_{k(3)} \exp(-i\varphi_z),\ \ k,n = 1,2,...N_{\alpha,\beta}. \end{cases} \quad (3)$$

Подставляя (3) в (2), получаем характеристическое уравнение для определения постоянных распространения Γ_n волн в 3D-периодической структуре магнитного нанокомпозита:

$$\Delta(\Gamma_n) = \left| \mathbf{Y}_{AA} - \mathbf{H}^{-1} \cdot \mathbf{Y}_{BA} + \mathbf{Y}_{AB} \cdot \mathbf{H} - \mathbf{H}^{-1} \cdot \mathbf{Y}_{BB} \cdot \mathbf{H} \right| = 0 \quad (4)$$

где $\Delta(\Gamma_n)$ - определитель матрицы; $\mathbf{Y}_{AA}, \mathbf{Y}_{BA}, \mathbf{Y}_{AB}, \mathbf{Y}_{BB}$ - клетки матрицы проводимости $\mathbf{Y} = \begin{pmatrix} \mathbf{Y}_{AA} & \mathbf{Y}_{AB} \\ \mathbf{Y}_{BA} & \mathbf{Y}_{BB} \end{pmatrix}$ (A - индексы входных сечений автономного блока S_1, S_2, S_3; B - индексы входных сечений автономного блока S_4, S_5, S_6); $\mathbf{H} = \begin{pmatrix} \mathbf{h_x} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{h_y} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{h_z} \end{pmatrix}$ - диагональная матрица с элементами:

$h_{x(l\,j)} = -i\,\delta_{l\,j}\,\Gamma_n\,a\cos\beta_x$, $h_{y(l\,j)} = -i\,\delta_{l\,j}\,\Gamma_n\,b\cos\beta_y$, $h_{z(l\,j)} = -i\,\delta_{l\,j}\,\Gamma_n\,c\cos\beta_z$.

Предметом изучения в 3D-периодической структуре магнитного нанокомпозита является постоянная распространения волны Γ_0:

$$\Gamma_n = \Gamma_0 + \frac{2\pi n}{\Lambda}, \quad n = \pm 1, \pm 2, ..., \pm\infty.$$

Эффективная магнитная проницаемость магнитного нанокомпозита, является тензором

$$\tilde{\mu}^{\Sigma} = \begin{pmatrix} \mu^{\Sigma} & -i\mu_{\alpha}^{\Sigma} & 0 \\ i\mu_{\alpha}^{\Sigma} & \mu^{\Sigma} & 0 \\ 0 & 0 & \mu_z^{\Sigma} \end{pmatrix}, \tag{5}$$

а диэлектрическая проницаемость ε^{Σ} - скалярной величиной.

Методика определения эффективных значений магнитной проницаемости магнитных нанокомпозитов базируется на следующей гипотезе: в бесконечной среде нанокомпозита эффект Фарадея и эффект Куттон – Мутона наблюдаются также как в сплошной гиромагнитной среде. Это означает, что постоянные распространения волн [35] левой поляризации $\Gamma^{+} = \omega\sqrt{\varepsilon\,(\mu + \mu_{\alpha})}$, правой поляризации $\Gamma^{-} = \omega\sqrt{\varepsilon\,(\mu - \mu_{\alpha})}$, обыкновенной волны $\Gamma_{\square} = \omega\sqrt{\varepsilon\,\mu_z}$ и необыкновенной волны $\Gamma_{\perp} = \omega\sqrt{\varepsilon\,\dfrac{(\mu)^2 - (\mu_{\alpha})^2}{\mu}}$ в бесконечной сплошной гиромагнитной среде должны совпадать с аналогичными значениями постоянных распространения волн в трехмерной периодической структуре магнитного нанокомпозита.

Из гипотезы следует система уравнений для определения компонентов тензора магнитной проницаемости μ^{Σ}, μ_{α}^{Σ}, μ_z^{Σ} и диэлектрической проницаемости ε^{Σ} магнитного нанокомпозита:

$$\begin{cases} \Gamma_{\Sigma}^{+} = \omega\sqrt{\varepsilon^{\Sigma}(\mu^{\Sigma} + \mu_{\alpha}^{\Sigma})}, \\ \Gamma_{\Sigma}^{-} = \omega\sqrt{\varepsilon^{\Sigma}(\mu^{\Sigma} - \mu_{\alpha}^{\Sigma})}, \\ \Gamma_{\square}^{\Sigma} = \omega\sqrt{\varepsilon^{\Sigma}\mu_z^{\Sigma}}, \\ \Gamma_{\perp}^{\Sigma} = \omega\sqrt{\varepsilon^{\Sigma}\,\dfrac{(\mu^{\Sigma})^2 - (\mu_{\alpha}^{\Sigma})^2}{\mu^{\Sigma}}}, \end{cases} \tag{6}$$

где $\Gamma_{\Sigma}^{+}, \Gamma_{\Sigma}^{-}$, $\Gamma_{\square}^{\Sigma}$, $\Gamma_{\perp}^{\Sigma}$ – постоянные распространения волн в бесконечной трехмерной периодической структуре магнитного нанокомпозита, $\mu_z^{\Sigma} = 1$.

Эта система совместна (имеет решение) в случае, если для постоянных распространения волн $\Gamma_{\Sigma}^{+}, \Gamma_{\Sigma}^{-}$, $\Gamma_{\square}^{\Sigma}$, $\Gamma_{\perp}^{\Sigma}$ выполняется условие:

$$(\Gamma_{\perp}^{\Sigma})^2 - \frac{2(\Gamma_{\Sigma}^{+})^2(\Gamma_{\Sigma}^{-})^2}{(\Gamma_{\Sigma}^{+})^2 + (\Gamma_{\Sigma}^{-})^2} = 0. \qquad (7)$$

В этом случае значения $\mu^{\Sigma}, \mu_{\alpha}^{\Sigma}, \varepsilon^{\Sigma}$ можно определить из решения первых трех уравнений системы (6):

$$\begin{cases} \mu^{\Sigma} = \dfrac{(\Gamma_{\Sigma}^{+}/\omega)^2 + (\Gamma_{\Sigma}^{-}/\omega)^2}{2\varepsilon^{\Sigma}}, \\ \mu_{\alpha}^{\Sigma} = \dfrac{(\Gamma_{\Sigma}^{+}/\omega)^2 - (\Gamma_{\Sigma}^{-}/\omega)^2}{2\varepsilon^{\Sigma}}, \\ \varepsilon^{\Sigma} = (\Gamma_{\square}^{\Sigma}/\omega)^2. \end{cases} \qquad (8)$$

Для сплошной бесконечной гиромагнитной среды условие (7) выполняется, для среды магнитного нанокомпозита это условие в общем случае не выполняется. Постоянные распространения волн левой поляризации, правой поляризации, обыкновенной волны в бесконечной сплошной гиромагнитной среде совпадают с аналогичными значениями постоянных распространения волн в трехмерной периодической структуре магнитного нанокомпозита, а постоянные распространения необыкновенных волн могут и не совпадать. Это означает, что сплошной бесконечной гиромагнитной среде эффект Фарадея наблюдается также, как в среде магнитного нанокомпозита, а эффект Куттон – Мутона в сплошной гиромагнитной среде и среде магнитного нанокомпозита в общем случае проявляется несколько иначе. В волноводных СВЧ-циркуляторах используется принцип невзаимности, который базируется на эффекте Фарадея. Следовательно, выбор решения (8) системы уравнений (6) вполне обоснован.

Список литературы

1. Никольский В.В. Электродинамика и распространение радиоволн. М.: Наука. 1973. 608 с.

2. Никольский В.В. Декомпозиционный подход к задачам электродинамики / В.В. Никольский, Т.И. Никольская. М.: Наука. 1983. 297 с.

3. Никольский В.В. Проекционные методы в электродинамике // Сборник научно-методических статей по прикладной электродинамике. М.: Высшая школа, 1977. С. 4-23.

4. Гуревич А.Г. Ферриты на сверхвысоких частотах. М.: Гос. изд. физ.-мат. литер. 1960. 407с.

Ширшиков Дмитрий Николаевич, канд. техн. наук, доц., offside7611@rambler.ru, Россия, Пенза, Пензенский артиллерийский инженерный институт, филиал Военной академии материально технического обеспечения г. Санкт-Петербург,

Спирин Максим Сергеевич, канд. техн. наук, доц., offside7611@rambler.ru, Россия, Пенза, Пензенский артиллерийский инженерный институт, филиал Военной академии материально технического обеспечения г. Санкт-Петербург,

Зайцев Юрий Михайлович, адъюнкт кафедры, offside7611@rambler.ru, Россия, Пенза, Пензенский артиллерийский инженерный институт, филиал Военной академии материально технического обеспечения г. Санкт-Петербург

DETERMINATION OF MAGNETIC PERMEABILITY PROMISING NANOMATERIALS .

D.N. Shirshikov, M.S. Spirin, Y.M. Zaitsev

Computational algorithm for determining the effective values of the magnetic and dielectric constants of magnetic nanocomposites based on opal matrices .

Key words: electromagnetic process, the magnetic nanocomposite, 3D - periodic structure, permeability, permittivity, and opal matrix.

Shirshikov Dmitrij Nikolaevich, candidate of technical science, docent, offside7611@rambler.ru, Russia, Penza, Penza Artillery Engineering Institute, a branch of the Military Academy material and technical support of St. Petersburg,

Spirin Maksim Sergeevich, candidate of technical science, docent, offside7611@rambler.ru, Russia, Penza, Penza Artillery Engineering Institute, a branch of the Military Academy material and technical support of St. Petersburg,

Zaitsev Yury Mihajlovich, an associate of the department, offside7611@rambler.ru, Russia, Penza, Penza Artillery Engineering Institute, a branch of the Military Academy material and technical support of St. Petersburg

УДК 532.517.2:539.3

КОЛЕБАНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИ НЕРЕГУЛЯРНОЙ ПЛАСТИНЫ И ШТАМПА, ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ ДРУГ С ДРУГОМ ЧЕРЕЗ СЛОЙ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ

Е.С. Скородумов, Д.В. Кондратов, Е.Л. Кузнецова,
Л.И. Могилевич, В.С. Попов

Аналитически решена в плоской постановке задача о колебаниях ребристой пластины и абсолютно жесткого штампа, образующих стенки щелевого канала, заполненного слоем вязкой несжимаемой жидкости при заданном гармоническом законе вибрации основания канала. Вариационным методом получены уравнения динамики пластинки-полоски с односторонними ребрами. Для описания ребер использованы обобщенные функции Хевисайда. Сформирован комплекс безразмерных переменных рассматриваемой задачи и выделены малые параметры. Найдены законы прогибов пластины, перемещений штампа и распределения давления в слое вязкой несжимаемой жидкости. Построены амплитудная частотная характеристика штампа и частотозависимая функция распределения прогибов ребристой пластины-полоски. Получены соответствующие им фазовая частотная характеристика и частотозависимая функция распределения фазового сдвига относительно заданного инерционного возмущения основания. На основе расчетов показана важность учета второго и последующих членов разложения в ряд при проведении практических вычислений.

Ключевые слова: гидроупругость, ребристая пластина, штамп, математическое моделирование, плоский канал, изгибные колебания, вязкая жидкость, вибрация основания

Исследования колебаний упругих конструкций, взаимодействующих с жидкостью, составляют одно из современных направлений развития гидроупругости. В рамках данного направления можно выделить задачи по исследованию динамики вибрирующих упругих стенок плоского канала, заполненного жидкостью. В работе [1] решена задача об изгибных колебаниях стенки канала как балки-полоски, взаимодействующей с идеальной жидкостью, заполняющей канал, и на ее базе выполнено исследование причин возникновения вибрационной кавитации в жидкости. Однако, в данном подходе пренебрежение вязкостью жидкости не позволяет учесть демпфирования в рассматриваемой колебательной системе, которые обуславливают ограниченность амплитуд колебаний стенки канала на резонансной частоте. В работе [2] исследованы колебания-балки полоски, погруженной в идеальную несжимаемую жидкость со свободной поверхностью. При рассмотрении граничных условий для скоростей жидкости рассмотрены линеаризованные граничные условия, то есть они снесены на невозмущенную поверхность. В [3] исследованы колебания консольно-закрепленной пластины, находящейся в неограниченном объеме вязкой несжимаемой жидкости с изначальным заданием линеаризованных граничных условий на невозмущенной поверхности пластины. С другой сто-

роны, в [4] исследованы хаотические колебания пластины при ее взаимодействии с потоком идеальной несжимаемой жидкости с учетом граничных условий на возмущенной поверхности пластины без снесения их на невозмущенную поверхность. Аналогичные граничные условия рассмотрены на возмущенной поверхности цилиндрической оболочки, взаимодействующей с ударной волной в газе [5].

Исследованию демпфирования гармонически вибрирующей бесконечно длиной балки-полоски на слое вязкой сжимаемой и несжимаемой жидкости посвящены работы [6-8]. В данных работах показано, что демпфирующие свойства слоя жидкости, на котором лежит вибрирующая бесконечно длинная балка-полоска, существенным образом возрастают при уменьшении толщины слоя. Исследование взаимодействия вибрирующих дисков со слоем вязкой несжимаемой жидкости, находящейся между ними, выполнено в работе [9]. При этом показано, что упругие колебания стенок канала на резонансных частотах приводят к изменению давления в жидкости на несколько порядков и являются основной причиной вибрационной кавитации. В [10] рассмотрена аналогичная задача для двух вибрирующих пластин. Вибрация круглой пластины на свободной поверхности идеальной несжимаемой жидкости рассмотрена в [11]. При этом рассматривается область в жидкости, ограниченная жестким дном и цилиндрической поверхностью. Колебания круглой пластины, погруженной в воду со свободной поверхностью [12]. В работе [13] выполнено исследование гидроупругих колебаний балки в потоке вязкой жидкости применительно к пьезопреобразователям, которые могут использоваться для получения энергии от потока. В работе [14] поставлена и аналитически решена в плоской постановке задача изгибных гидроупругих колебаний однородной пластины, образующей стенку щелевого канала с пульсирующим слоем вязкой несжимаемой жидкости при заданном гармоническом законе пульсации давления на одном торце. В работах [15, 16] рассмотрена трехслойная стенка канала (пластина) при заданном гармоническом законе движения абсолютно жесткой стенки канала или противодавления в жидкости. Для решения задачи динамики пластины применен метод Бубнова-Галеркина в первом приближении.

С другой стороны, на практике широко применяются геометрически нерегулярные тонкостенные конструкции в виде пластин и оболочек, подкрепленных ребрами жесткости [17-19]. Работ по гидроупругости ребристых тонкостенных конструкций мало, например, в работе [20] рассмотрена постановка задачи гидроупругости кольцевого канала, одна из стенок, которого является цилиндрической оболочкой с внешними шпангоутами. В работе [21] рассмотрена задача взаимодействия пластины переменной толщины со сдавливаемым слоем жидкости. В данных работах, для описа-

ния геометрически нерегулярной тонкостенной конструкции использован подход, связанный с использованием аппарата обобщенных функций предложенный в [18].

Рассмотрим далее постановку и решение задачи гидроупругости ребристой пластины, взаимодействующей с жестким штампом через слой вязкой несжимаемой жидкости в условиях вибрации основания. Рассматриваемая механическая система (см. рис.1.) включает в себя: абсолютно жесткое тело, с упругим подвесом – штамп 1 и упругую ребристую пластину 2, между которыми находится слой вязкой несжимаемой жидкости 3. Указанные тела заключены в едином корпусе (он условно показан на рисунке пунктирными линиями), имеющем справа и слева торцевые полости, заполненные той же жидкостью, что и жидкость между штампом и пластиной. Давление жидкости в левой и правой торцевой полости постоянное p_0, а истечение жидкости в эти полости можно считать свободным. Штамп может перемещаться в вертикальном направлении за счет наличия упругой связи (пружина или магнитный подвес) с корпусом, установленным на вибрирующем основании. При этом частота колебаний штампа ω, а амплитуда его колебаний z_m. Вибрация основания происходит только в вертикальной плоскости. Длина и ширина штампа и пластины совпадают. Длина пластины b значительно больше ее ширины 2ℓ. Внутренняя поверхность пластины, находящаяся в контакте с жидкостью, является плоской, а внешняя поверхность имеет n ребер жесткости. Ребра расположены параллельно стороне b пластины. Толщина статора на участках, где отсутствуют ребра жесткости, равна h_0. Высота j-го ребра равна h_{pj}, а его ширина ε_j. Вязкая несжимаемая жидкость 3 полностью заполняет щелевой зазор между штампом и пластиной. Средняя толщина слоя жидкости в канале δ_0. Возбуждение колебаний штампа и изгибных колебаний пластины происходит за счет переносного виброускорения основания канала, при этом ее деформации считаются малыми. На торцах пластина свободно оперта на вибрирующее основание.

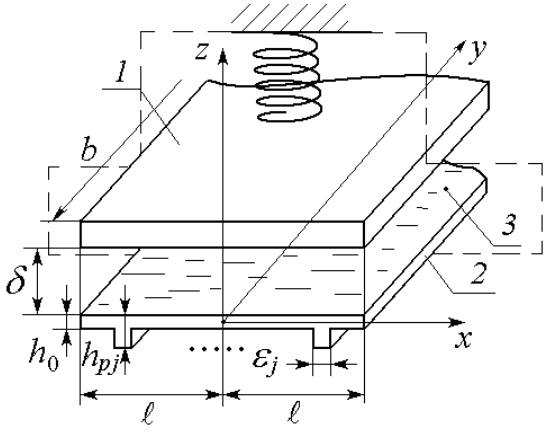


Рис. 1. Рассматриваемая механическая система

Будем учитывать далее, что в рассматриваемой механической системе присутствуют сильное демпфирование, обусловленное учетом вязкости жидкости. В свою очередь, наличие демпфирования приводит к достаточно быстрому затуханию переходных процессов с течением времени, влияние начальных условий перестает сказываться и возникают установившиеся гармонические колебания. Следовательно, при рассмотрении достаточно длительных во времени процессов общее решение неоднородных уравнений и начальные условия будем исключать с самого начала исследования [22].

Заданный закон движения вибрирующего основания представим в виде

$$z_0 = E_z f_0(\omega t), \;\; f_0(\omega t) = \sin(\omega t), \tag{1}$$

тогда ускорение вибрирующего основания можно записать как

$$\ddot{z}_0 = E_z \frac{d^2 f_0(\omega t)}{dt^2} = -E_z \omega^2 f_0(\omega t), \tag{2}$$

где E_z – амплитуда колебаний основания; ω – частота колебаний; t – время.

Принимая во внимание, что $b >> \ell$, далее рассмотрим плоскую задачу, введя декартову систему координат *Oxyz*, связанную со срединной поверхностью пластины.

Балка-пластинка имеет вдоль своей длины *n* поперечных ребер жесткости в виде ступеней параллельных оси *Oy* высотой h_{pj} и длиной ε_j. При этом текущее ребро имеет высоту h_{pj} и длину ε_j. Началу ребра будет соответствовать продольная координата начала ребра x_j. Таким образом, высота ребра скачкообразно изменяется при движении вдоль пластины по оси *Ox*. Нормальная к координатной поверхности координата z, верхней поверхности пластины постоянна:

$$z_1 = h_0/2. \tag{3}$$

Часть нижней поверхности пластины постоянна $z_2 = -h_0/2$, а расположенные вдоль оси *Ox* на интервалах $x_j - \varepsilon_j \le x \le x_j$ $(j = 1, 2, ..., n)$ ребра, ограниченны по высоте поверхностями

$$z_2 = -h_0/2 - h_{pj} + h_0 = -h_0/2 - \left(h_{pj}/h_0 - 1\right)h_0 = -h_0/2 - k_{1j}h_0,$$
$$k_{1j} = \left(h_{pj}/h_0 - 1\right). \tag{4}$$

Таким образом, нижняя поверхность претерпевает разрывы в точках оси *Ox*, соответствующих началу появления ребер и точках их окончания. Ступенчатый характер изменения высоты ребер можно описать при помощи разности двух функций Хевисайда [18]. Следовательно, вводя в рассмотрение разность функций Хевисайда общее уравнение, описывающие нижнюю поверхность ребристой пластины-полоски можно представить в виде

$$z_2 = -h_0/2 - \sum_j k_{1j} h_0 \Delta\Gamma_j(x),\ \ \Delta\Gamma(x) = \Gamma(x - x_j) - \Gamma(x - x_j - \varepsilon_j) \qquad (5)$$

С учётом гипотез Кирхгофа связи между напряжением и деформацией, деформацией и упругими перемещениями пластины имеют вид:

$$\sigma_x^z = \frac{E}{1-\mu_0^2}\varepsilon_x^z,\ \varepsilon_x^z = \frac{\partial U^z}{\partial x};\ U^z = U - z\frac{\partial W}{\partial x},\ W^z = W. \qquad (6)$$

Здесь E - модуль Юнга материала пластины; μ_0 - коэффициент Пуассона материала пластины, U, W - продольное перемещение и прогиб координатной поверхности.

Уравнения динамики ребристой пластинки-полоски получим при помощи вариационного интегрального принципа Гамильтона

$$\delta S = \int_{t_0}^{t_1} \left[\delta K - \delta\Pi - \delta A\right] dt = 0, \qquad (7)$$

где δK – вариация кинетической энергия системы; $\delta\Pi$ – вариация потенциальной энергии деформации системы; δA– вариация работы внешних сил.

$$\delta K = b\rho_0 \int_{-\ell}^{\ell}\int_{z_2}^{z_1}\left(\frac{\partial^2 U^z}{\partial t^2}\delta U^z + \left(\frac{\partial^2 W^z}{\partial t^2} + \ddot{z}_0\right)\delta W^z\right)dzdx =$$

$$= \rho_0 h_0 b \int_{-\ell}^{\ell}\left\{\left[(1+\Sigma k_{1j}\Delta\Gamma_j)\frac{\partial^2 U}{\partial t^2} + \frac{h_0}{2}\Sigma k_{2j}\Delta\Gamma_j\frac{\partial^3 W}{\partial x \partial t^2}\right]\delta U + \right.$$

$$\left. + \left[\begin{array}{c}(1+\Sigma k_{1j}\Delta\Gamma_j)\left(\dfrac{\partial^2 W}{\partial t^2} + \ddot{z}_0\right) - \\ -\dfrac{h_0}{2}\Sigma k_{2j}\Delta\Gamma_j\dfrac{\partial^3 U}{\partial x\partial t^2} - \dfrac{h_0^2}{12}(1+\Sigma k_{3j}\Delta\Gamma_j)\dfrac{\partial^4 W}{\partial x^2\partial t^2}\end{array}\right]\delta W\right\}dx +$$

$$+ \rho_0 h_0 b\left[\frac{h_0^2}{2}(1+\Sigma k_{1j}\Delta\Gamma_j)\frac{\partial^3 W}{\partial x\partial t^2} + \frac{h_0}{2}\Sigma k_{2j}\Delta\Gamma_j\frac{\partial^2 U}{\partial t^2}\right]\delta W\Big|_{-\ell}^{\ell}.$$

$$\delta\Pi = b\int_{-\ell}^{\ell}\int_{z_2}^{z_1}\sigma_x^z\delta\varepsilon_x^z dzdx = b\left(\begin{array}{l}\displaystyle\int_{-\ell}^{\ell}\left(-\frac{\partial T_x}{\partial x}\delta U - \frac{\partial^2 M_x}{\partial x^2}\delta W\right)dx + \\ \displaystyle + \left(T_x\delta U + \frac{\partial M_x}{\partial x}\delta W - M_x\delta\left(\frac{\partial W}{\partial x}\right)\right)\Big|_{-\ell}^{\ell}\end{array}\right),$$

$$T_x = \int_{z_2}^{z_1}\sigma_x^z dz = \frac{Eh_0}{1-\mu_0}\left[(1+\Sigma k_{1j}\Delta\Gamma_j)\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{h_0}{2}\Sigma k_{2j}\Delta\Gamma_j\frac{\partial^2 W}{\partial x^2}\right],$$

$$M_x = \int_{z_2}^{z_1} \sigma_x^z z dz = -\frac{Eh_0}{1-\mu_0}\left[\frac{h_0}{2}\Sigma k_{2j}\Delta\Gamma_j \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{h_0^2}{12}(1+\Sigma k_{3j}\Delta\Gamma_j)\frac{\partial^2 W}{\partial x^2}\right],$$

$$\delta A = b\int_{-\ell}^{\ell}(q_x \delta U + q_n \delta W)dx,$$

где $k_{2j} = (k_{1j})^2 + k_{1j}$, $k_{3j} = 4(k_{1j})^3 + 6(k_{1j})^2 + 3k_{1j}$, q_x, q_n - касательное и нормальное напряжение на поверхности пластинки-полоски со стороны вязкой несжимаемой жидкости, ρ_0 - плотность материала пластины.

Как известно, выражения под знаками интегралов по x определяют уравнение динамики ребристой пластины-полоски, выражения с двойной подстановкой по x определяют возможные варианты начальных и граничных условий уравнения динамики ребристой пластины. Таким образом, уравнения динамики ребристой пластины-полоски имеют вид

$$-\frac{Eh_0}{1-\mu_0}\frac{\partial}{\partial x}\left[(1+\Sigma k_{1j}\Delta\Gamma_j)\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{h_0}{2}\Sigma k_{2j}\Delta\Gamma_j \frac{\partial^2 W}{\partial x^2}\right] = q_x -$$

$$-\rho_0 h_0\left((1+\Sigma k_{1j}\Delta\Gamma_j)\frac{\partial^2 U}{\partial t^2} + \frac{h_0}{2}\Sigma k_{2j}\Delta\Gamma_j \frac{\partial^3 W}{\partial x \partial t^2}\right),$$

$$\frac{Eh_0}{1-\mu_0}\frac{\partial^2}{\partial x^2}\left[\frac{h_0}{2}\Sigma k_{2j}\Delta\Gamma_j \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{h_0^2}{12}(1+\Sigma k_{3j}\Delta\Gamma_j)\frac{\partial^2 W}{\partial x^2}\right] = q_n -$$

$$-\rho_0 h_0\left(\begin{array}{c}(1+\Sigma k_{1j}\Delta\Gamma_j)\left(\dfrac{\partial^2 W}{\partial t^2} + \ddot{z}_0\right) - \\ -\dfrac{h_0}{2}\Sigma k_{2j}\Delta\Gamma_j \dfrac{\partial^3 U}{\partial x \partial t^2} - \dfrac{h_0^2}{12}(1+\Sigma k_{3j}\Delta\Gamma_j)\dfrac{\partial^4 W}{\partial x^2 \partial t^2}\end{array}\right). \qquad (8)$$

Вариационному уравнению удовлетворяют условия свободного опирания на торцах пластинки-полоски

$$W = \frac{\partial U}{\partial x} = \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} = 0 \text{ при } x = \pm\ell. \qquad (9)$$

Выражения для напряжений q_n и q_x, действующих со стороны жидкости, представим в виде [4, 5, 18 - 20]

$$q_n = -p + 2\rho\nu\frac{\partial V_z}{\partial z} \quad \text{при} \quad z = W + \frac{h_0}{2} \qquad (10)$$

$$q_x = \rho\nu\left(\frac{\partial V_z}{\partial x} + \frac{\partial V_x}{\partial z}\right) \text{ при } z = W + \frac{h_0}{2}. \qquad (11)$$

Уравнения динамики штампа запишутся в виде

$$m_1(\ddot{z}_0+\ddot{z})+n_1 z=-b\int\limits_{-\ell}^{\ell} q_n\big|_{z=\delta_0+\frac{h_0}{2}+z_m f_z(\omega t)}\,dx, \qquad (12)$$

где m_1 – масса штампа; n_1 - коэффициент упругой жесткости подвеса (упругой связи) штампа; z – закон движения штампа; $f_z(\omega t)$ – гармоническая функция времени.

Уравнения динамики вязкой несжимаемой жидкости запишутся в виде [23, 24]

$$\frac{\partial V_x}{\partial t}+V_x\frac{\partial V_x}{\partial x}+V_z\frac{\partial V_x}{\partial z}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x}+\nu\left(\frac{\partial^2 V_x}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 V_x}{\partial z^2}\right),$$

$$\frac{\partial V_z}{\partial t}+V_x\frac{\partial V_z}{\partial x}+V_z\frac{\partial V_z}{\partial z}=-\ddot{z}_0-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial z}+\nu\left(\frac{\partial^2 V_z}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 V_z}{\partial z^2}\right), \qquad (13)$$

$$\frac{\partial V_x}{\partial x}+\frac{\partial V_z}{\partial z}=0,$$

где p – давление; ρ, ν – плотность и кинематический коэффициент вязкости жидкости; V_x, V_z – проекции скорости движения жидкости на оси координат.

Уравнения динамики жидкости дополняются условиями прилипания жидкости к стенкам канала [4, 5, 18 - 20]

$$V_x=0,\ V_z=\dot{z}\ \text{ при }\ z=\delta_0+\frac{h_0}{2}+z_m f_z(\omega t),$$

$$V_x=\frac{\partial U}{\partial t},\ V_z=\frac{\partial W}{\partial t}\ \text{ при }\ z=W+\frac{h_0}{2}, \qquad (14)$$

и условиями ее свободного торцевого истечения [23], заключающимися в совпадении давления жидкости на торце канала с давлением в правой и левой полости, с учетом давления за счет переносного виброускорения основания

$$p=p_0-\rho\ddot{z}_0(z-\delta_0-h_0/2-z_m f_z(\omega t))\ \text{ при }\ x=\pm\ell. \qquad (15)$$

Введем в рассмотрение безразмерные переменные и малые параметры задачи:

$$\zeta=(z-h_0/2)/\delta_0,\ \xi=x/\ell,\ \tau=\omega t,\ U=u_m U_1,\ W=w_m U_3, \qquad (16)$$

$$p=p_0+\frac{\rho\nu\, z_m\omega}{\delta_0\psi^2}P-\rho\ddot{z}_0(z-\delta_0-\frac{h_0}{2}-z_m f_z(\omega t)),\ V_z=z_m\omega U\zeta,$$

$$V_x=\frac{z_m\omega}{\psi}U\xi,\ \lambda=z_m/\delta_0<<1,\ \psi=\delta_0/\ell<<1,$$

где ψ – относительная толщина слоя жидкости; λ – относительная амплитуда колебаний штампа; P – безразмерное давление, u_m, w_m – амплитуды продольного перемещения и прогиба ребристой пластины.

Подставляя введенные безразмерные переменные (16) в уравнения динамики вязкой несжимаемой жидкости (13), получим запись данных уравнении в безразмерном виде

$$\frac{\omega h_0^2}{\nu}\left[\frac{\partial U_\xi}{\partial \tau}+\lambda\left(U_\xi\frac{\partial U_\xi}{\partial \xi}+U_\zeta\frac{\partial U_\xi}{\partial \zeta}\right)\right]=-\frac{\partial P}{\partial \xi}+\psi^2\frac{\partial^2 U_\xi}{\partial \xi^2}+\frac{\partial^2 U_\xi}{\partial \zeta^2}, \qquad (17)$$

$$\psi^2\frac{\omega h_0^2}{\nu}\left[\frac{\partial U_\zeta}{\partial \tau}+\lambda\left(U_\xi\frac{\partial U_\zeta}{\partial \xi}+U_\zeta\frac{\partial U_\zeta}{\partial \zeta}\right)\right]=-\frac{\partial P}{\partial \zeta}+\psi^2\left[\psi^2\frac{\partial^2 U_\zeta}{\partial \xi^2}+\frac{\partial^2 U_\zeta}{\partial \zeta^2}\right],$$

$$\frac{\partial U_\xi}{\partial \xi}+\frac{\partial U_\zeta}{\partial \zeta}=0,$$

при этом соответствующие им граничные условия прилипания жидкости к стенкам канала (14) и условия свободного истечения на торцах (15) примут вид

$$U_\xi=0,\ U_\zeta=\frac{df_z(\tau)}{d\tau}\ \text{ при }\ \zeta=1+\lambda f_z(\tau),$$

$$U_\xi=\psi\frac{u_m}{z_m}\frac{\partial U_2}{\partial \tau},\ U_\zeta=\frac{w_m}{z_m}\frac{\partial U_3}{\partial \tau}\ \text{ при }\ \zeta=\lambda\frac{w_m}{z_m}U_3, \qquad (18)$$

$$P=0\ \text{ при }\ \xi=\pm 1.$$

В рассматриваемой постановке с учетом тонкости слоя жидкости $\psi=\delta_0/\ell<<1$ и, следовательно, в нулевом приближении по ψ уравнения динамики жидкости (17) и соответствующие им граничные условия (18) существенно упрощаются, так как в них можно положить равными нулю члены порядка ψ и ψ^2.

Нормальное и касательное напряжения (10), (11), действующие на гладкую поверхность упругой ребристой пластины-полоски со стороны слоя жидкости в безразмерных переменных (10), примут вид

при $\zeta=\lambda\frac{w_m}{z_m}U_3$

$$q_n=-p_0-\frac{\rho\nu\, z_m\,\omega}{\delta_0\,\psi^2}\left(P-2\psi^2\frac{\partial U_\zeta}{\partial \zeta}\right)+\rho\delta_0\ddot{z}_0(\zeta-1-\lambda f_z(\tau)). \qquad (19)$$

при $\zeta=\lambda\frac{w_m}{z_m}U_3$.

$$q_x=\frac{\rho\nu\, z_m\,\omega}{\delta_0\,\psi}\left(\psi^2\frac{\partial U_\zeta}{\partial \xi}+\frac{\partial U_\xi}{\partial \zeta}\right) \qquad (20)$$

При сравнении полученных выражений для нормального и касательного напряжений, становится очевидным, что для тонкого слоя жидкости в щелевом канале выполняется условие $q_n >> q_x$. Следовательно, в рассматриваемой постановке можно пренебречь касательным напряжением на гладкой поверхности ребристой пластины по сравнению с нормальным напряжением. При этом нормальное напряжение (19), действующее на гладкой поверхности ребристой пластины-полоски, в нулевом приближении по ψ, примет следующий вид

$$q_n = -p_0 - \frac{\rho\nu\, w_m\, \omega}{\delta_0\, \psi^2} P + \rho\delta_0 \ddot{z}_0(\zeta - 1 - \lambda f_z(\tau)) \text{ при } \zeta = \lambda \frac{w_m}{z_m} U_3. \qquad (21)$$

Кроме того, принимая во внимание, что в предложенной постановке рассматриваются изгибные колебания ребристой пластины без учета распространения упругих волн и волновых процессов в жидкости в первом уравнении динамики пластины-полоски (8) исключим из рассмотрения силы инерции, как это предложено в [26] при исследовании задач гидроупругости.

Таким образом, из первого уравнения (8) с учетом сделанных замечаний находим связь между продольным перемещение и прогибом пластины.

$$\frac{\partial U}{\partial x} = -\frac{h_0}{2} \Sigma k_{1j} \Delta\Gamma_j \frac{\partial^2 W}{\partial x^2}, \qquad (22)$$

Подставляя нормальное напряжение (21) в уравнения динамики ребристой пластины-полоски (8) с учетом введенных безразмерных переменных и связи (22) получим уравнение ее изгибных колебаний в виде

$$\frac{E h_0^3 w_m}{12(1-\mu_0^2)\ell^4} \frac{\partial^2}{\partial \xi^2}\left[(1 + \Sigma(k_{3j} - 3k_{1j}k_{2j})\Delta\Gamma_j)\frac{\partial^2 U_3}{\partial \xi^2}\right] =$$

$$= -p_0 - \frac{\rho\nu z_m \omega}{\delta_0 \psi^2} P + \rho\delta_0 \ddot{z}_0(\lambda U_3 - 1 - \lambda f_z(\tau)) -$$

$$-\rho_0 h_0 w_m \omega^2 \left(\begin{array}{c} (1 + \Sigma k_{1j}\Delta\Gamma_j)\left(\dfrac{\partial^2 U_3}{\partial \tau^2} + \dfrac{\ddot{z}_0}{w_m \omega^2}\right) - \\ - \dfrac{h_0^2}{12\ell^2}(1 + \Sigma(k_{3j} - 3k_{1j}k_{2j})\Delta\Gamma_j)\dfrac{\partial^4 U_3}{\partial \xi^2 \partial \tau^2} \end{array} \right), \qquad (23)$$

с граничными условиями

$$U_3 = \frac{\partial U_2}{\partial \xi} = \frac{\partial^2 U_3}{\partial \xi^2} = 0 \text{ при } \xi = \pm 1. \qquad (24)$$

Как видно из (23), среди инерционных членов можно пренебречь слагаемым при коэффициенте $\frac{h_0^2}{12\ell^2} << 1$ в силу его малости. Заметим, что в уравнении (23) возможно осуществить переход к однородной пластинке для этого достаточно положить равными коэффициенты k_{1j}, k_{2j}, k_{3j} равными нулю.

С учетом сделанных выше замечаний, решение задачи сформулированной задачи гидроупругости (12), (17), (23) с граничными условиями (18), (24) проведем методом возмущений [25] по малому параметру λ, представляя его в виде асимптотического разложения

$$P = P_0 + \lambda P_1 + \cdots,\ U_\xi = U_{\xi 0} + \lambda U_{\xi 1} + \cdots,$$
$$U_\zeta = U_{\zeta 0} + \lambda U_{\zeta 1} + \cdots,\ U_3 = U_{30} + \lambda U_{30} + \cdots \qquad (25)$$

Подставляя разложения (25) в уравнения (12), (17), (23), выражение для нормального напряжения (21) и граничные условия (18), (24), в которых положены нулю члены порядка ψ и ψ^2, и рассматривая первый член разложения, получим линеаризованную задачу гидроупругости, включающую в себя

уравнение динамики жесткого штампа

$$m_1(\ddot{z}_0 + \ddot{z}) + n_1 z = 2b\ell p_0 + \frac{\rho\nu z_m\omega}{\delta_0\psi^2}\ell\int_{-1}^{1} P_0 d\xi, \qquad (26)$$

уравнения динамики тонкого слоя вязкой несжимаемой жидкости

$$\frac{\omega h_0^2}{\nu}\frac{\partial U_{\xi 0}}{\partial\tau} = -\frac{\partial P_0}{\partial\xi} + \frac{\partial^2 U_{\xi 0}}{\partial\zeta^2},\quad \frac{\partial P_0}{\partial\zeta} = 0,\quad \frac{\partial U_{\xi 0}}{\partial\xi} + \frac{\partial U_{\zeta 0}}{\partial\zeta} = 0, \qquad (27)$$

уравнение изгибных колебаний ребристой пластины-полоски

$$\frac{Eh_0^3 w_m}{12(1-\mu_0^2)\ell^4}\frac{\partial^2}{\partial\xi^2}\left[(1+\Sigma(k_{3j} - 3k_{1j}k_{2j})\Delta\Gamma_j)\frac{\partial^2 U_3}{\partial\xi^2}\right] =$$
$$= -p_0 - \rho\ddot{z}_0\delta_0 - \frac{\rho\nu z_m\omega}{\delta_0\psi^2}P_0 -$$
$$-\rho_0 h_0 w_m\omega^2(1+\Sigma k_{1j}\Delta\Gamma_j)\left(\frac{\partial^2 U_3}{\partial\tau^2} + \frac{\ddot{z}_0}{w_m\omega^2}\right), \qquad (28)$$

и граничные условия прилипания жидкости, снесенные на невозмущенные поверхности штампа и пластины

$$U_{\xi 0} = 0,\ U_{\zeta 0} = \frac{df_z(\tau)}{d\tau}\ \text{ при }\ \zeta = 1, \qquad (29)$$

$$U_{\xi 0} = 0,\ U_\zeta = \frac{\partial U_{30}}{\partial\tau}\ \text{ при }\ \zeta = 0, \qquad (30)$$

а также условия свободного истечения жидкости и закрепления пластины на торцах

$$P_0 = 0 \text{ при } \xi = \pm 1, \tag{31}$$

$$U_3 = 0, \quad \frac{\partial^2 U_3}{\partial \xi^2} = 0 \text{ при } \xi = \pm 1. \tag{32}$$

Для решения полученной задачи определяется частное решение неоднородных линейных уравнений в виде гармонических функций по времени с коэффициентами, зависящими от координат. Решение уравнений (27) с граничными условиями (29), (30), (31) представлены в виде $T_0 = A_T \cos\tau + B_T \sin\tau$. Здесь под T_0 понимаются $P_0, U_{\xi 0}, U_{\xi 0}, U_{30}$ коэффициенты A_T, B_T для P_0 и U_{30} зависят только от ξ, для $U_{\xi 0}, U_{\xi 0}$ они зависят от ξ и ζ. В результате найдено безразмерное давление в виде

$$P_0 = \frac{1}{2}\left(\xi^2 - 1\right)\left[2\varepsilon^2 \alpha(\omega) \frac{d^2 f_z}{d\tau^2} + 12\gamma(\omega) \frac{df_z}{d\tau} \right] +$$

$$+ \frac{w_m}{z_m} \int_{\xi}^{1} \int \left(2\varepsilon^2 \alpha(\omega) \frac{\partial^2 U_{30}}{\partial \tau^2} + 12\gamma(\omega) \frac{\partial U_{30}}{\partial \tau} \right) d\xi d\xi +$$

$$+ \frac{1}{2}(\xi - 1) \frac{w_m}{z_m} \int_{-1}^{1} \int \left(2\varepsilon^2 \alpha(\omega) \frac{\partial^2 U_{30}}{\partial \tau^2} + 12\gamma(\omega) \frac{\partial U_{30}}{\partial \tau} \right) d\xi d\xi \tag{33}$$

где

$$2\varepsilon^2 = \omega \delta_0^2 / \nu, \quad \gamma(\omega) = \frac{1}{6} \frac{\varepsilon^3 (\mathrm{sh}\varepsilon - \sin\varepsilon)}{\varepsilon^2 (\mathrm{ch}\varepsilon + \cos\varepsilon) - 2\varepsilon(\mathrm{sh}\varepsilon + \sin\varepsilon) + 2(\mathrm{ch}\varepsilon - \cos\varepsilon)},$$

$$\alpha(\omega) = \frac{\varepsilon(\varepsilon(\mathrm{ch}\varepsilon + \cos\varepsilon) - (\mathrm{sh}\varepsilon + \sin\varepsilon))}{\varepsilon^2 (\mathrm{ch}\varepsilon + \cos\varepsilon) - 2\varepsilon(\mathrm{sh}\varepsilon + \sin\varepsilon) + 2(\mathrm{ch}\varepsilon - \cos\varepsilon)}.$$

Форму прогиба ребристой пластины-полоски с учетом краевых условий (32) представим в виде

$$W = w_m U_{30} = w_m \sum_{k=1}^{\infty} (R_k^0 + R_k(\tau)) \cos \frac{2k-1}{2} \pi \xi. \tag{34}$$

Здесь R_k^0 – постоянный коэффициент, соответствующий постоянному уровню давления p_0; $R_k(\tau)$ – гармоническая функция времени τ.

Ограничиваясь в (34) n членами ряда и осуществляя подстановку (33), (34) в уравнения динамики штампа (26), ребристой пластины (28) с учетом заданного закона вибрации основания (2), и используя процедуру Бубнова-Галеркина для решения уравнений динамики ребристой пластины, были найдены законы движения вибратора и прогиб ребристой пластины в виде:

$$z = 2\ell bp_0/n_1 + E_z\omega^2\left(Q_{0c}(\omega)\frac{df_0}{d\tau} + Q_{0s}(\omega)\frac{d^2f_0}{d\tau^2}\right) =$$

$$= 2\ell bp_0/n_1 + E_z\omega^2\Pi_z(\omega)\sin(\omega t + \varphi_z(\omega)), \qquad (35)$$

$$w = w_m\sum_{k=1}^{n}\left\{\frac{p_0}{w_m}\frac{Det_k}{DetA_n} + \frac{E_z\omega^2}{w_m}\left[(A_{0k}^{(n)}(\omega) - \right.\right.$$

$$-[A_k^{(n)}(\omega)Q_{0s}(\omega) + B_k^{(n)}(\omega)Q_{0c}(\omega)])\frac{df_0}{d\tau} +$$

$$\left.\left. + \left[(B_{0k}^{(n)}(\omega) + [A_k^{(n)}(\omega)Q_{0c}(\omega) - B_k^{(n)}(\omega)Q_{0s}(\omega)])\frac{d^2f_0}{d\tau^2}\right]\right\}\cos\frac{2k-1}{2}\pi\xi = \cdot$$

$$= \sum_{k=1}^{\infty} p_0\frac{Det_k}{DetA_n}\cos\frac{2k-1}{2\ell}\pi x + E_z\omega^2\Pi_w(x,\omega)\sin(\omega t + \varphi_w(x,\omega)). \qquad (36)$$

где введены обозначения

$$\Pi_z(\omega) = \left(Q_{0c}{}^2(\omega) + Q_{0s}{}^2(\omega)\right)^{1/2},\ \mathrm{tg}\varphi_z(\omega) = -Q_{0c}(\omega)/Q_{0s}(\omega),$$

$$\Pi_w(x,\omega) =$$

$$= \left[\left(\sum_{k=1}^{n}\left(A_{0k}^{(n)}(\omega) - [A_k^{(n)}(\omega)Q_{0s}(\omega) + B_k^{(n)}(\omega)Q_{0c}(\omega)]\right)\cos\left(\frac{2k-1}{2\ell}\pi x\right)\right)^2 +\right.$$

$$\left. + \left(\sum_{k=1}^{n}\left(B_{0k}^{(n)}(\omega) + [A_k^{(n)}(\omega)Q_{0c}(\omega) - B_k^{(n)}(\omega)Q_{0s}(\omega)]\right)\cos\left(\frac{2k-1}{2\ell}\pi x\right)\right)^2\right]^{1/2},$$

$$\mathrm{tg}(\varphi_w(x,\omega)) =$$

$$= \frac{\sum_{k=1}^{n}\left([A_k^{(n)}(\omega)Q_{0s}(\omega) + B_k^{(n)}(\omega)Q_{0c}(\omega)] - A_{0k}^{(n)}(\omega)\right)\cos\left((2k-1)\pi x/2\ell\right)}{\sum_{k=1}^{n}\left(B_{0k}^{(n)}(\omega) + [A_k^{(n)}(\omega)Q_{0c}(\omega) - B_k^{(n)}(\omega)Q_{0s}(\omega)]\right)\cos\left((2k-1)\pi x/2\ell\right)}.$$

Выражения для Det_k, $DetA_n$, $A_{0k}^{(n)}$, $B_{0k}^{(n)}$, $A_k^{(n)}$, $B_k^{(n)}$ Q_{0c}, Q_{0s}, не приведены ввиду их громоздкости.

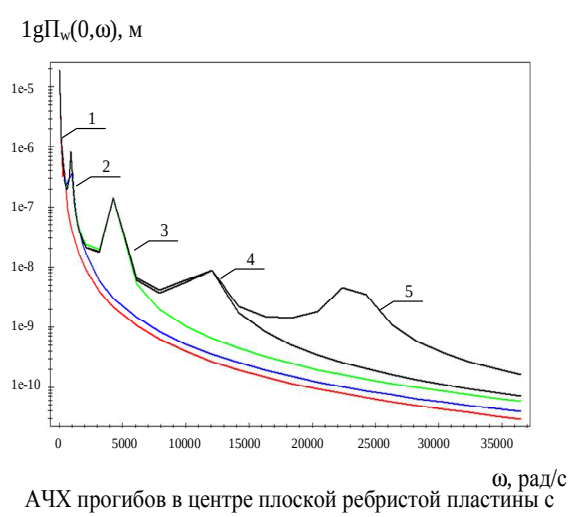
Найденные законы движения штампа и прогиба ребристой пластины позволяют исследовать напряженно-деформированное состояние пластины, давление в жидкости, а также использоваться для определения резонансных частот колебаний в рассматриваемой механической системе.

Заметим, что в выражениях (35), (36) первое слагаемое соответствует нагрузке от постоянного давления p_0, а второе слагаемое соответствует воздействию переносного виброускорения основания канала с амплитудой $E_z\omega^2$. Функция $\Pi_z(\omega)$ представляет собой амплитудную частотную характеристику штампа, а функцию $\Pi_w(x,\omega)$ можно рассматривать как частотозависимую функцию распределения амплитуд прогиба вдоль пластины, отнесенную к единице виброускорения. Аналогично, функция $\varphi_z(\omega)$ представляет собой амплитудную частотную характеристику штампа, а функцию $\varphi_w(x,\omega)$ можно рассматривать как частотозависимую функцию распределения фазового сдвига прогиба пластины. В случае фиксированного значения продольной координаты x, функции $\Pi_w(x,\omega)$ и $\varphi_w(x,\omega)$ представляют собой амплитудную частотную характеристику и фазовую частотную характеристику прогиба ребристой пластины. Таким образом, на базе расчетов функций $\Pi_z(\omega)$, $\varphi_z(\omega)$, $\Pi_w(x,\omega)$, $\varphi_w(x,\omega)$ можно исследовать колебания штампа и пластины, взаимодействующих друг с другом через слой вязкой несжимаемой жидкости, возбуждаемые переносным виброускорением основания.

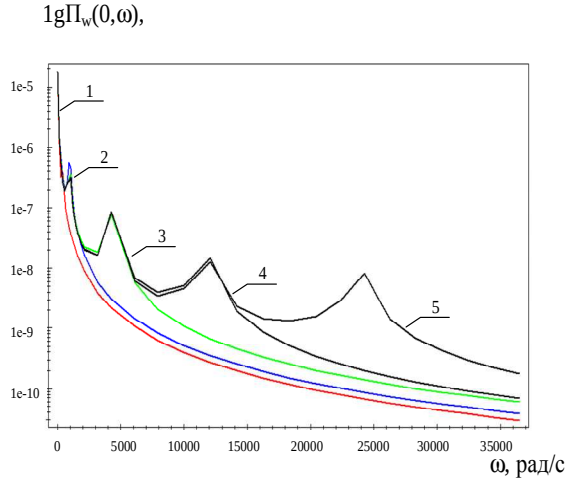
В качестве примера на рис. 2 приведем результаты расчетов амплитуд прогибов ребристой пластины-полоски в центре канала (x = 0), обусловленных переносным виброускорением основания с амплитудой $E_z\omega^2 = 1g$. Расчеты проводились для случаев n=1,2,…5 для варианта канала, образованного пластиной с двумя ребрами и параметрами: ℓ = 0,1 м; δ_0/ℓ = 0,08; b = 10; ρ_0 =2,7·10^3 кг/м^2; ρ = 1,84·10^3 кг/м^2; μ_0 =0,3; ν = 2,5·10^{-4} м^2/с; m_1 = 2,5 кг; n_1 = 9,5·10^7 кг/с^2, $h_{p1} = 1{,}1h_0$, ξ_1/ℓ = -0,4, ε_1/ℓ = 0,1, $h_{p2} = 1{,}1h_0$, ξ_2/ℓ = 0,3, ε_2/ℓ = 0,15, материал пластины – сплав Д16Т и для варианта канала, с указанными выше параметрами, но образованного пластиной с одним ребром: ξ_1/ℓ = -0,05, ε_1/ℓ = 0,1.

Расчеты показали, что в случае удержания 1-го члена ряда в (36) у ребристой пластины наблюдаются две резонансные частоты. Учет каждого последующего члена ряда приводит к появлению дополнительной резонансной частоты, расположенной выше предшествующих. Амплитуды, соответствующие дополнительным резонансным частотам, оказываются больше амплитуд на этих же частотах при удержании одного члена ряда. При этом, значение первой резонансной частоты практически не меняется. Поэтому, решение задачи в первом приближении по методу Бубнова-Галеркина будет корректно определять только нижний тон гидроупругих колебаний пластины, а для практических целей достаточно удержания первых 1-2 членов ряда в решении. При этом расчёты подтверждают введённое при постановке задачи предположение, что $z_m/\delta_0 << 1$. Наличие ребер жесткости у пластины-полоски приводит к уменьшению амплитуды и увеличению значений резонансных частот. В частности, в случае

ребристого статора резонансные частоты оказываются большими (до 2 - 3,3 раза), то есть происходит сдвиг резонансных частот в высокочастотную область.



АЧХ прогибов в центре плоской ребристой пластины с использованием материала Д16Т (виброускорение основания 1g) (одно ребро)
1 – при 1-м члене ряда; 2 – при 2-х членах ряда;
3 – при 3-х членах ряда; 4 – при 4-х членах ряда;
5 – при 5- членах ряда;



АЧХ прогибов в центре плоской ребристой пластины с использованием материала Д16Т (виброускорение основания 1g) (два ребра)
1 – при 1-м члене ряда; 2 – при 2-х членах ряда;
3 – при 3-х членах ряда; 4 – при 4-х членах ряда;
5 – при 5- членах ряда;

Рис. 2. Результаты расчетов амплитуд прогибов ребристой пластины-полоски в центре канала

Полученные в работе результаты и построенная математическая модель гидроупругих колебаний штампа и ребристой пластины могут быть использованы как для исследования резонансных колебаний ребристой пластины и жесткого штампа, являющимися стенками плоского канала, содержащего вязкую несжимаемую жидкость, так и для исследования напряженно-деформированного состояния ребристой стенки канала.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 15-01-01604а и гранта Президента РФ МД-6012.2016.8, МД-398.2017.8.

Список литературы

1. Индейцев Д.А., Полипанов И.С., Соколов С.К. Расчет кавитационного ресурса втулки судовых двигателей // Проблемы машиностроения и надежности машин. 1994. №4. С.59-64.

2. Haddara M.R., Cao S. A Study of the Dynamic Response of Submerged Rectangular Flat Plates // Marine Structures. 9. 1996. P. 913-933

3. Cassio T. Faria, Daniel J. Inman Modeling energy transport in a cantilevered Euler–Bernoulli beam actively vibrating in Newtonian fluid // Mechanical Systems and Signal Processing. 45. 2014. P. 317-329.

4. Avramov K.V., Strel'nikova E.A. Chaotic oscillations of plates interacting on both sides with a fluid flow // International Applied Mechanics. Vol. 50. № 3. 2014. P. 303-309.

5. Липницкий Ю.М., Ляхов В.Н., Фельдштейн В.А. Нестационарное взаимодействие ударной волны с упругой цилиндрической оболочкой // Ученые записки ЦАГИ. 1976. Т.VII. №1. С. 80-88.

6. Enelund M. Vibration and damping of a plate on a viscous fluid layer. Proceeding of the 13th International Modal Analysis Conference (IMAC). 1995. P. 261-267

7. T. Önsay Effects of layer thickness on the vibration response of a plate-fluid layer system // Journal of Sound and Vibration. 1993. Vol. 163. P. 231-259.

8. T. Önsay Dynamic interactions between the bending vibration of a plate and a fluid layer attenuator // Journal of Sound and Vibration. 1994. Vol. 178. P. 289-313.

9. Могилевич Л.И., Попов В.С. Исследование взаимодействия слоя вязкой несжимаемой жидкости со стенками канала, образованного соосными вибрирующими дисками // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 2011. №3. С. 42-55.

10. Могилевич Л.И., Попов В.С., Попова А.А. Динамика взаимодействия упругих элементов вибромашины со сдавливаемым слоем жидкости, находящимся между ними // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2010. № 4. С. 23-32.

11. M. Amabili, Vibrations of Circular Plates Resting on a Sloshing Liquid: Solution of the Fully Coupled Problem // Journal of Sound and Vibration. 2001. Vol. 245, Iss. 2, P. 261-283

12. E. Askari , K.-H. Jeong, M. Amabili, Hydroelastic Vibration of Circular Plates Immersed in a Liquid-filled Container with Free Surface // Journal of Sound and Vibration. 2013. Vol. 332, Iss. 12. P. 3064-3085

13. Akcabay D.T., Young Y.L., Hydroelastic Response and Energy Harvesting Potential of Flexible Piezoelectric Beams in Viscous Flow // Physics of Fluids. 2012, Vol.24. Iss. 5.

14. Агеев Р.В., Кузнецова Е.Л., Куликов Н.И., Могилевич Л.И., Попов В.С. Математическая модель движения пульсирующего слоя вязкой жидкости в канале с упругой стенкой // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2014. № 3. С. 17-35.

15. Могилевич Л.И. Динамика взаимодействия сдавливаемого слоя вязкой несжимаемой жидкости с упругой трехслойной пластиной // Изв. РАН. Механика твердого тела. 2008. №. 5. Р. 114-123.

16. Агеев Р.В., Могилевич Л.И., Попов В.С. Колебания стенок щелевого канала с вязкой жидкостью, образованного трехслойным и твердым дисками // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2014. № 1. С. 3-11.

17. Савин Г.Н., Флейшман Н.П. Пластинки и оболочки с ребрами жесткости. Киев: Наукова думка, 1964. 384 с.

18. Жилин П.А. Линейная теория ребристых оболочек // Изв. АН СССР. МТТ. 1970, № 4. С. 150 - 162.

19. Мыльцина О.А., Белосточный Г.Н. Термоупругость подкрепленной пластинки под действием быстропеременных температурно-силовых воздействий на границе // Вестник Московского авиационного института. 2014. Т. 21. № 2. С. 169-174.

20. Кондратов Д.В., Калинина А.В. Исследование процессов гидроупругости ребристой трубы кольцевого профиля при воздействии вибрации // Электронный журнал «Труды МАИ». № 78. 2014. http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID =53453 (дата обращения 12.11.2016).

21. Могилевич Л.И., Попова А.А. Динамическая задача виброопоры с упругой ребристой пластиной // Наука и техника транспорта. 2007. № 4. С. 55-61.

22. Panovko Y.G., Gubanova I.I. Stability and Oscillations of Elastic Systems. Consultants Bureau Enterprises, Inc., New York, N.Y., 1965.

23. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М.: Дрофа, 2003. 840 с.

24. Горшков А.Г., Морозов В.И., Пономарев А.Т., Шклярчук Ф.Н. Аэрогидроупругость конструкций. М.: Физматлит, 2000. 591 с.

25. Van Dyke, M. Perturbation methods in fluid mechanics. Stanford, California. The Parabolic Press. 1975.

26. Вольмир А.С. Оболочки в потоке жидкости и газа. Задачи аэроупругости. М.: Физматлит, 1976. 416 с.

27.Медведский А.Л., Рабинский Л.Н. Метод поверхностных функций влияния в нестационарных задачах дифракции. М.: Изд-во. МАИ, 2007. 255 с.

28. Жаворонок С.И., Куприков М.Ю., Медведский А.Л., Рабинский Л.Н. Численно-аналитические методы решения задач дифракции акустических волн на абсолютно твердых телах и оболочках. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. 223 с.

Скородумов Евгений Сергеевич, асп., evgen_rgot@mail.ru, Россия, Саратов, Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.,

Кондратов Дмитрий Вячеславович, д-р физ.-мат. наук, проф., kondratovdv@yandex.ru, Россия, Саратов, Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.,

Кузнецова Екатерина Львовна, д-р физ.-мат. наук, проф., ведущий научный сотрудник НИО-9 МАИ, lareyna@mail.ru, Россия, Москва, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),

Могилевич Лев Ильич, д-р техн. наук, проф., mogilevich@sgu.ru, Россия, Саратов, Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.,

Попов Виктор Сергеевич, д-р техн. наук, проф., vic_p@bk.ru, Россия, Саратов, Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.

THE OSCILLATIONS OF GEOMETRICALLY IRREGULAR PLATE AND STAMP, INTERACTING THROUGH THE VISCOUS LIQUID LAYER

E.S. Skorodumov, D.V. Kondratov, E.L. Kuznetsova, L.I. Mogilevich, V.S. Popov

The task about the fluctuations of a ridge plate and absolutely tough stamp forming walls of the slot-hole channel filled with a layer of viscous incompressible liquid in case of the set harmonious law of vibration of foundation of the channel is analytically solved in flat statement. The variation method received the equations of dynamics of a plate strip with unilateral edges. For the description of edges the generalized Hevisayd's functions are used. The complex of dimensionless variables of the considered task is created and small parameters are allocated. Laws of deflections of a plate, movements of a stamp and distribution of pressure are found in a layer of viscous incompressible liquid. The amplitude frequency characteristic of a stamp and chastotozavisimy function of distribution of deflections of a ridge plastiny-strip are constructed. The phase frequency characteristic and chastotozavisimy function of distribution of phase shift corresponding to them concerning the set inertial indignation of the basis are received. On the basis of calculations importance of accounting of the second and the subsequent members of decomposition is shown in a row when carrying out practical calculations.

Key words: hydroelasticity, ribbed plate, stamp, mathematical modeling, flat channel, bend oscillations, viscous liquid, vibration of foundation.

Skorodumov Evgenij Sergeevich, postgraduate, evgen_rgot@mail.ru, Russia, Saratov, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov,

Kondratov Dmitrij Vjacheslavovich, doctor of physical and mathematical sciences, professor, kondratovdv@yandex.ru, Russia, Saratov, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov,

Kuznetsova Ekaterina Lvovna, doctor of physical and mathematical sciences, professor, lareyna@mail.ru, Russia, Moscow, Moscow Aviation Institute (National Research University),

Mogilevich Lev Ilich, doctor of technical sciences, professor, mogilevich@sgu.ru, Russia, Saratov, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov,

Popov Viktor Sergeevich, doctor of technical sciences, professor, vic_p@bk.ru, Russia, Saratov, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

УДК 66:621.929

ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА И РАСЧЁТ РЕЖИМОВ НЕПРЕРЫВНОГО СМЕШИВАНИЯ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ

В.М. Васин

Рассмотрены оценки качества смешивания сыпучих материалов по ключевому компоненту, а так же по всем компонентам с учётом степени влияния каждого компонента и с учётом влияния режимов смешивания и основных параметров распределения характеристик компонентов на качество смеси. Предложен способ расчёта оптимальных режимов смешивания. Сформулированы соответствующие оптимизационные задачи. Предложены способы решения этих задач.

Ключевые слова: сыпучие материалы, непрерывное смешивание, оценка качества смешивания, расчёт режимов смешивания.

В работах [1, 2] предложен способ непрерывного смешивания сыпучих материалов, дисперсность частиц которых позволяет осуществлять их поштучное дозирование. Способ смешивания заключается в одновременном дозировании всех компонентов на движущийся конвейер, в результате чего на конвейере чередуются частицы всех компонентов. С целью достижения высокой производительности процесса рекомендовано дозирование каждого компонента осуществлять в несколько ручьёв (рис. 1).

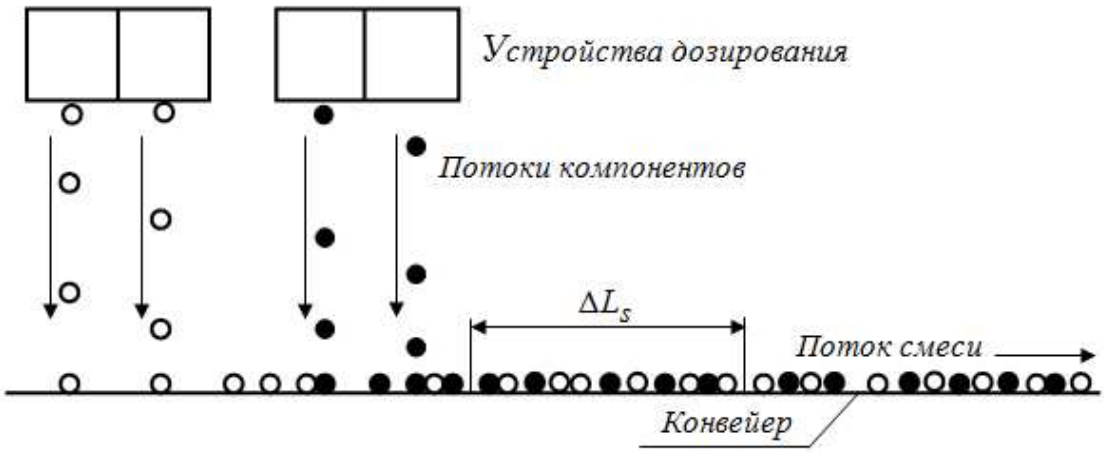


Рис. 1. Схема способа смешивания

Вид потока смеси компонентов зависит от выбранного режима смешивания, от количества дозирующих устройств и их компоновки в структуре смесителя.

В соответствии с первым режимом поток смеси представляет собой последовательность чередующихся вдоль и поперек конвейера частиц всех компонентов. Толщина потока не превышает размера частицы. Возможен

второй режим смешивания, результатом которого является поток смеси, состоящий из нескольких слоев, каждый из которых подобен потоку, полученному в соответствии с первым режимом. В этом случае частицы компонентов чередуются и по высоте потока смеси. Возможен третий режим, при котором смесь имеет вид многослойного потока, каждый слой состоит только из одного компонента, а толщины слоев пропорциональны долям компонентов в смеси.

Расчёт режима смешивания заключается в определении величин производительности устройств дозирования и скорости конвейера.

Рассмотрим поток частиц, образованный одним ручьём устройства дозирования (рис. 2).

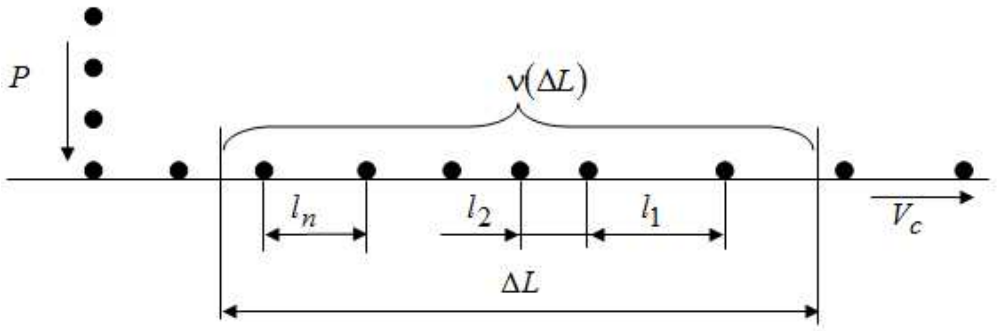


Рис. 2. Поток частиц

Практически создать поток частиц с постоянными интервалами между ними по ряду очевидных причин невозможно; допускается вариация величины интервала при соблюдении условий: постоянство средней величины и вариация величины интервала относительно средней величины в пределах, определяемых требованиями к качеству готовой смеси. Поэтому интервалы l_1, l_2, …, l_n рассматриваются случайными величинами.

Установлено [1, 2], что в случае отсутствия корреляционной зависимости между величинами интервалов точность потока, оцениваемая коэффициентом вариации величины интервала между частицами, зависит от производительности устройства дозирования:

$$V\{l\} = P \cdot \sqrt{a \cdot b^{c/P}}, \qquad (1)$$

где P - производительность ручья устройства дозирования; a, b, c - экспериментальные коэффициенты.

Точность потока, оцениваемая коэффициентом вариации числа частиц $V\{\nu(\Delta L)\}$ в отрезке ΔL, зависит от $V\{l\}$ и от режима смешивания:

$$V\{\nu(\Delta L)\} = V\{l\} \cdot \sqrt{\frac{M\{l\}}{\Delta L}} = \sqrt{\frac{P \cdot V_c \cdot a \cdot b^{c/P}}{\Delta L}}, \qquad (2)$$

где $M\{l\}$ – математическое ожидание величины интервала между частицами; V_c – скорость конвейера.

Аппарат, реализующий описываемый способ смешивания, должен состоять из нескольких многоручьёвых устройств дозирования и конвейера. Число устройств дозирования должно быть не меньше максимально возможного числа компонентов: $K \le D$.

При расчёте режима смешивания можно исходить из условия обеспечения минимального времени получения смеси или из условия получения наивысшего качества смеси.

Оценка качества смеси может быть выполнена по ключевому компоненту [3] или каким-либо другим известным способом, например, по суммарной дисперсии [4], которая с учётом [1,2] в данном случае выражается в виде:

$$D_S(\Delta L_S) = \sum_{k=1}^{K} w_k \cdot D_k\{\nu_k(\Delta L_S)\} = \sum_{k=1}^{K} w_k \cdot d_k \cdot e_k \cdot \frac{P_k^3 \cdot a \cdot b^{c/P}}{V_c} \cdot \Delta L_S, \qquad (3)$$

где K - количество компонентов; w_k – коэффициент, учитывающий степень влияния k-го компонента на качество смеси; $D_k\{\nu_k(\Delta L_S)\}$ – дисперсия k- го компонента в отрезке ΔL_S потока смеси (рис.1); d_k - количество устройств, дозирующих k-й компонент; e_k - количество ручьёв устройства, дозирующего k-й компонент; P_k - производительность одного ручья устройства, дозирующего k-й компонент.

Так как на потребительские свойства смеси оказывают влияние все компоненты и их характеристики, то более корректной является оценка качества смешивания, учитывающая распределение в пробах смеси всех компонентов и распределение их характеристик.

Такой оценкой может быть среднее, определяемое одним из известных способов [5], например, в виде среднего арифметического

$$Q_S(\Delta L_S) = \frac{\sum_{k=1}^{K} q_k \cdot \nu_k(\Delta L_S)}{\sum_{k=1}^{K} \nu_k(\Delta L_S)},$$

где $Q_S(\Delta L_S)$ - оценка качества смеси по пробам из отрезков ΔL_S потока смеси; q_k - характеристика k-го компонента; $\nu_k(\Delta L_S)$ - количество частиц k-го компонента в пробах.

В общем случае величина $Q_S(\Delta L_S)$ является функцией случайных величин q_k и $\nu_k(\Delta L_S)$, $k = 1, 2, \ldots, K$. Используя метод [6, 7], основанный на разложении функции случайных аргументов в ряд Тейлора относительно точки, в которой все аргументы принимают значения, равные своим математическим ожиданиям, и результаты работ [1, 2, 8] получены выражения для математического ожидания и коэффициента вариации случайной величины $Q_S(\Delta L_S)$ с учётом режимов смешивания и основных параметров распределения характеристик компонентов:

$$M\{Q_s(\Delta L_s)\} = \frac{\sum_{k=1}^{K} d_k \cdot e_k \cdot \frac{P_k \cdot \Delta L}{V_c} \cdot M\{q_k\}}{\sum_{k=1}^{K} d_k \cdot e_k \cdot \frac{P_k \cdot \Delta L_s}{V_c}} -$$

$$- \sum_{k=1}^{K} \left[\frac{M\{q_k\} \cdot \sum_{k=1}^{K} d_k \cdot e_k \cdot \frac{P_k \cdot \Delta L_s}{V_c} - \sum_{k=1}^{K} d_k \cdot e_k \cdot \frac{P_k \cdot \Delta L_s}{V_c} \cdot M\{q_k\}}{\left[\sum_{k=1}^{K} d_k \cdot e_k \cdot \frac{P_k \cdot \Delta L_s}{V_c} \right]^3} \right] \cdot$$

$$\cdot \left[d_k \cdot e_k \cdot \frac{P_k \cdot \Delta L_s}{V_c} \right]^2 \cdot \frac{P_k \cdot V_c \cdot a \cdot b^{c/P_k}}{d \cdot e_k \cdot \Delta L_s},$$

$$V\{Q_s(\Delta L_s)\} = \left(\sum_{k=1}^{K} \left[\frac{M\{q_k\} \cdot \sum_{k=1}^{K} d_k \cdot e_k \cdot \frac{P_k \cdot \Delta L_s}{V_c} - \sum_{k=1}^{K} d_k \cdot e_k \cdot \frac{P_k \cdot \Delta L_s}{V_c} \cdot M\{q_k\}}{\left[\sum_{k=1}^{K} d_k \cdot e_k \cdot \frac{P_k \cdot \Delta L_s}{V_c} \right]^2} \right]^2 \cdot \right.$$

$$\left. \cdot \left[d_k \cdot e_k \cdot \frac{P_k \cdot \Delta L_s}{V_c} \right]^2 \cdot \frac{P_k \cdot V_c \cdot a \cdot b^{c/P_k}}{d_k \cdot e_k \cdot \Delta L_s} + \sum_{k=1}^{K} \left[\frac{d_k \cdot e_k \cdot \frac{P_k \cdot \Delta L_s}{V_c}}{\left[\sum_{k=1}^{K} d_k \cdot e_k \cdot \frac{P_k \cdot \Delta L_s}{V_c} \right]^2} \right]^2 \cdot \right.$$

$$\left. \cdot [M\{q_k\} \cdot V\{q_k\}]^2 \right) / \left(\frac{\sum_{k=1}^{K} d_k \cdot e_k \cdot \frac{P_k \cdot \Delta L_s}{V_s} \cdot M\{q_k\}}{\sum_{k=1}^{K} d_k \cdot e_k \cdot \frac{P_k \cdot \Delta L_s}{V_s}} - \right.$$

$$- \sum_{k=1}^{K} \left[\frac{M\{q_k\} \cdot \sum_{k=1}^{K} d_k \cdot e_k \cdot \frac{P_k \cdot \Delta L_s}{V_c} - \sum_{k=1}^{K} d_k \cdot e_k \cdot \frac{P_k \cdot \Delta L_s}{V_c} \cdot M\{q_k\}}{\left[\sum_{k=1}^{K} d_k \cdot e_k \cdot \frac{P_k \cdot \Delta L_s}{V_c} \right]^3} \right] \cdot$$

$$\left. \cdot \left[\frac{P_k \cdot \Delta L_s}{V_c} \right]^2 \cdot \frac{P_k \cdot V_c \cdot a \cdot b^{c/P_k}}{d_k \cdot e_k \cdot \Delta L_s} \right), \qquad (4)$$

где $M\{q_k\}$, $V\{q_k\}$ - математическое ожидание и коэффициент вариации случайных величин q_k (k =1, 2, …, K).

На практике возможны два случая: $K = D$ и $K < D$.

Рассмотрим первый случай: $K = D$. Если требуется получить смесь за минимальное время, то величины производительностей устройств дозирования должны выбираться таким образом, чтобы устройство, дозирующее компонент наибольшего объёма, работало с максимальной возможной производительностью, а остальные с величинами производительности пропорциональными долям компонентов:

$$P_1 = P \cdot p_1,\ P_2 = P \cdot p_2,\ \ldots,\ P_K = P \cdot p_K \le P_{\max}, \qquad (5)$$

$$p_1 < p_2 < \ldots < p_K,\ p_1 = 1;$$

где p_1, p_2, …, p_K - доли компонентов в смеси; P_1, P_2, …, P_K - производительность ручья устройства, дозирующего 1, 2, …, K-й компонент; $P_{\max}$ - максимально допустимая величина производительности ручья устройства дозирования.

При этом также должно выполняться условие:

$$V_s = M\{l_s\} \cdot \sum_{k=1}^{K} d_k \cdot e_k \cdot P_k \le V_{c\max}, \qquad (6)$$

где $M\{l_s\}$ - математическое ожидание величины интервала между смежными частицами в потоке смеси; $V_{c\max}$ - максимально допустимая скорость конвейера.

Величина $M\{l_s\}$ должна быть выбрана из условия обеспечения требуемой разреженности потока смеси на конвейере.

Прогноз качества в этом случае осуществляется по (1), (2), (3) или (4) в зависимости от выбранного способа его оценки, а продолжительность смешивания в этом случае равна:

$$T_s = \frac{g_1}{e_1 \cdot P_1} = \frac{g_2}{e_2 \cdot P_2} = \ldots = \frac{g_k}{e_k \cdot P_k} = \ldots = \frac{g_K}{e_K \cdot P_K}, \qquad (7)$$

где g_k - количество k-го компонента, k = 1, …, K.

Если при K=D необходимо выбрать режим, обеспечивающий максимально возможное качество смеси, а его оценка ведётся по ключевому компоненту, то производительность устройства, дозирующего этот компонент, должна быть выбрана по (1) или (2), производительности остальных устройств должны быть рассчитаны с учётом пропорций (5), скорость конвейера и продолжительность смешивания определяются по (6) и (7).

Если при K=D необходимо выбрать режим, обеспечивающий максимально возможное качество смеси, а его оценка ведётся по суммарной дисперсии, то при выбранной величине отрезка ΔL_s потока смеси, при из-

вестных коэффициентах w_1, w_2, …, w_K, при известных e_1, e_2, …, e_K, при $d_1 = d_2 = \ldots = d_K = 1$ и заданной пропорции компонентов следует решить оптимизационную задачу с целевой функцией и ограничениями:

$$\min D_S(\Delta L_S) = f(P_k, V_c),$$

$$p_1 < p_2 < \ldots < p_K; \quad p_1 = 1;$$

$$P_1 \geq P_{\min}; \quad P_2 = P_1 \cdot p_2, \ldots; \quad P_K = P_1 \cdot p_K \leq P_{\max};$$

$$V_c = M\{l_s\} \cdot \sum_{k=1}^{K} e_k \cdot P_k \leq V_{c\max};$$

где $P_{\min}$ - минимально допустимая величина производительности ручья устройства дозирования.

Если оценка качества смеси ведётся по $V\{Q_S(\Delta L_S)\}$, то при выбранной величине отрезка ΔL_S потока смеси, при известных параметрах распределения характеристик компонентов $M\{q_1\}$, $M\{q_2\}$, …, $M\{q_K\}$ и $V\{q_1\}$, $V\{q_2\}$, …, $V\{q_K\}$, при известных e_1, e_2, …, e_K и заданной пропорции компонентов, следует решить оптимизационную задачу с целевой функцией

$$\min V\{Q_S(\Delta L_S)\} = f(P_k, V_c)$$

и теми же ограничениями.

Продолжительность смешивания следует рассчитывать по (7).

Рассмотрим случай K< D. При необходимости выполнения требования о минимальном времени смешивания один или несколько компонентов с наибольшими долями следует разделить на две или больше частей для загрузки всех устройств дозирования и для простоты последующих рассуждений рассматривать смешивание не K компонентов, а $K^*=D$ компонентов, имея в виду, что в число K^* входят фактическое число компонентов и число частей компонентов с наибольшими долями в смеси. Режим смешивания определяется аналогично случаю $K=D$.

Качество смеси в этом случае можно оценить по (1), (2), (3) или (4), а продолжительность смешивания в этом случае равна:

$$T_S = \frac{g_1}{e_1 \cdot P_1} = \frac{g_2}{e_2 \cdot P_2} = \ldots = \frac{g_{k^*}}{e_{k^*} \cdot P_{k^*}} = \ldots = \frac{g_{K^*}}{e_{K^*} \cdot P_{K^*}}.$$

Если при $K<D$ необходимо получить смесь максимально возможного качества, то решениями оптимизационной задачи должны быть: величины производительности каждого устройства дозирования, число устройств d_k, дозирующих каждый компонент, и скорость конвейера.

При равенстве числа ручьёв $e_1 = e_2 = \ldots = e_K$, при выбранной величине отрезка ΔL_S потока смеси, при известных коэффициентах w_1, w_2, …, w_K или при известных параметрах распределения характеристик компо-

нентов $M\{q_1\}$, $M\{q_2\}$, …, $M\{q_K\}$ и $V\{q_1\}$, $V\{q_2\}$, …, $V\{q_K\}$, и заданной пропорции компонентов целевая функция в зависимости от выбранного способа оценки качества смеси и ограничения имеют вид:

$$\min D_s(\Delta L_s) = f(d_k, P_k, V_c) \quad \text{или} \quad \min V\{Q_s(\Delta L_s)\} = f(d_k, P_k, V_c),$$

$$d_k = 1, 2, \ldots, (D\text{-}K\text{+}1); \quad \sum_{k=1}^{K} d_k = D;$$

$$p_1 < p_2 < \ldots < p_K; \quad p_1 = 1;$$

$$P_1 \geq P_{\min}; \quad P_2 = P_1 \cdot p_2, \ldots; \quad P_K = P_1 \cdot p_K \leq P_{\max};$$

$$V_c = M\{l_s\} \cdot \sum_{k=1}^{K} e_k \cdot P_k \leq V_{c\max};$$

Продолжительность смешивания определяется по равенству:

$$T_s = \frac{g_1}{d_1 \cdot e_1 \cdot P_1} = \frac{g_2}{d_2 \cdot e_2 \cdot P_2} = \ldots = \frac{g_k}{d_k \cdot e_k \cdot P_k} = \ldots = \frac{g_K}{d_K \cdot e_K \cdot P_K}$$

Таким образом, выбор режимов смешивания связан с необходимостью решения оптимизационных задач. Целевые функции нелинейные, в последнем случае задача является частично целочисленной. Для решения задач следует использовать известные способы, например, целевую функцию привести к аддитивно сепарабельному виду и перейти от нелинейной функции к «кусочно определённой» [9, 10].

Список литературы

1. Васин В.М. Основы теории потоков сыпучих материалов в смесителях непрерывного действия // Автоматизация и современные технологии, № 9. 2007. С. 10-17.

2. Васин В.М. Способ смешивания сыпучих материалов и математические модели потоков их частиц // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2010. Вып. 1. С. 9-18.

3. Макаров Ю.И. Аппараты для смешивания сыпучих материалов. М.: Машиностроение, 1973. 216 с.

4. Александровский А.А., Ланге Б.Ю. Статистический анализ качества гетерогенных смесей // Тр. Казан. хим.-технолог. института. Казань: Изд-во КХТИ, 1969. Вып. 39. Ч. 2. С. 86-103.

5. Джини К. Средние величины. М: Статистика, 1970. 448 с.

6. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. М.: Высш. шк., 1999. 576 с.

7. Хан Г., Шапиро С. Статистические методы в инженерных задачах. М.: Мир, 1969. 396 с.

8. Васин В.М. Характеристики потоков компонентов в смесителях непрерывного действия // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2013. Вып. 1. С. 386-391.

9. Кофман А., Анри-Лабордер А. Методы и модели исследования операций: Целочисленное программирование. М.: Мир, 1977. 432 с.

10. Сборник задач и упражнений по высшей математике: Математическое программирование /А.В. Кузнецов, В.А. Сакович, Н.И. Холод и др. Минск: Высш. шк., 2002. 447 с.

Васин Вячеслав Михайлович, канд. техн. наук, доц., vv211048@uic.tula.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

QUALITY APPRAISALS AND CALCULATION OF CONDITIONS OF CONTINUOUS MIXING OF LOOSE MATERIALS

V.M. Vasin

Quality appraisals of mixing of loose materials on a key component are considered, and as on all components with the account of degree of influence of each component and with the account of influence of conditions of mixing and key parameters of distribution of characteristics of components on quality of a mix. The way of calculation of optimum conditions of mixing is offered. Corresponding optimising problems are formulated. Ways of the solution of these problems are offered.

Key words: loose materials, continuous mixing, an quality appraisals of mixing, calculation of conditions of mixing.

Vasin Vjatheslav Mihailovith, candidate of technical science, docent, vv211048@uic.tula.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 621.86

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ МАНИПУЛЯЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ПРИ СОВМЕСТНОМ ДВИЖЕНИИ ЗВЕНЬЕВ

И.А. Лагерев

Нормативно-техническая и эксплуатационная документация, регламентирующая работу манипуляционных систем мобильных машин, допускает совмещение во времени выполнения двух различных движений. Однако совместное движение звеньев приводит к изменению уровня механических напряжений в несущей металлоконструкции манипулятора, а также к изменению усилий, преодолеваемых гидродвигателями. Для оценки влияния этих явлений на динамику и нагруженность манипуляционных систем с помощью разработанной математической модели было проведено компьютерное моделирование их поведения при совместном движении звеньев. Результаты моделирования подтверждены экспериментальными исследованиями.

Ключевые слова: манипуляционная система, мобильная машина, совместное движение, динамика, моделирование, эксперимент, видеосъемка.

К настоящему времени для исследования динамических процессов при работе манипуляционных систем разработан ряд эффективных методов [1 - 6]. Математические модели [1 - 3] позволяют определить динамические усилия, возникающие в манипуляционной системе при выполнении различных погрузочно-разгрузочных и транспортных технологических операций, а методики [4 - 7] на основе этих данных – механические напряжения, действующие в звеньях несущей металлоконструкции манипуляционной системы. Таким образом, можно оценить статическую и усталостную прочность, деформативность, долговечность и частотные характеристики исследуемой конструкции, выполнить прогнозную оценку ее ресурса и остаточного ресурса.

При расчетах, как правило, считается, что движение одного из звеньев манипуляционной системы происходит при неподвижном положении всех остальных звеньев [2, 4]. Однако на практике встречается совместное (одновременное) движение нескольких звеньев [8 - 10], так как нормативно-техническая документация Ростехнадзора России и эксплуатационная документация на оснащенные манипуляторами мобильные машины допускают совмещение во времени выполнения двух различных движений. Это позволяет увеличить производительность манипуляционной системы за счет сокращения продолжительности цикла работы грузоподъемной машины. Частным случаем совмещения движений является движение транспортно-технологической машины, оснащенной манипуляционной системой, при работе с грузом [11, 12].

В работе [9] показано, что совместное движение звеньев не всегда приводит к повышению производительность манипуляционной системы, так как увеличивается время протекания переходных процессов, а также растут нагрузки, действующие на несущую металлоконструкцию и приводные механизмы. В связи с этим необходима разработка моделей, позволяющих анализировать кинематику и динамику манипуляционных систем при совместном движении звеньев. Такие модели также могут применяться для выработки рекомендаций по рациональному совмещению движений с целью снижения последствий указанных негативных явлений.

В работе предложен подход к моделированию динамики манипуляционной системы при одновременном движении звеньев, рассмотренный на примере крана-гидроманипулятора FASSI F290 (рис. 1) с шарнирно-сочлененной грузоподъемной стрелой. Он имеет следующие технические характеристики: грузовой момент 278 Н·м, максимальный вылет 8,15 м, рабочее давление гидросистемы 31 МПа. Стрела манипулятора имеет три поворотных звена 1-3 (рис. 1), на последнем из которых установлено последовательно расположенных 5 телескопических секций 4 (рис. 1) с гидравлическим приводом и 2 телескопические секции с ручным приводом. В ходе теоретических и экспериментальных исследований рассматривалась работа крана с грузом массой 3,3 т.

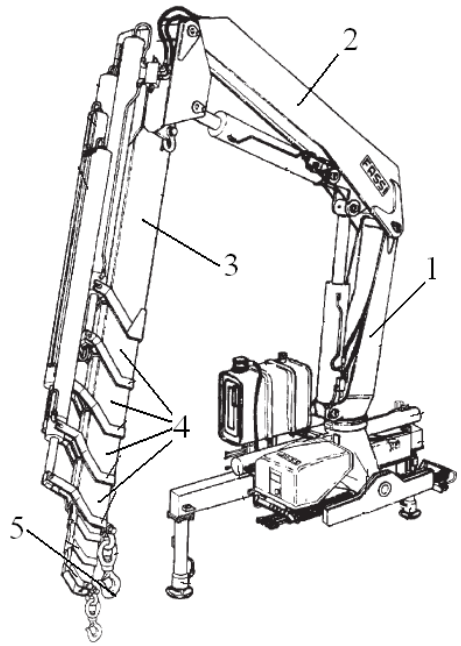
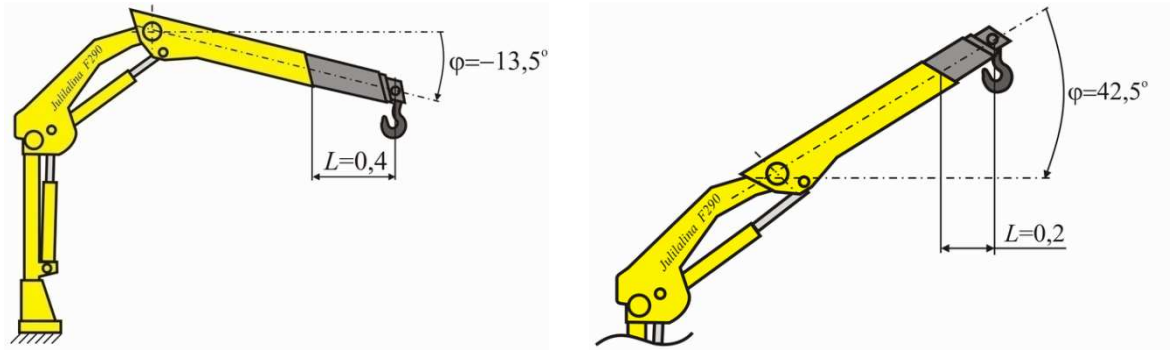


Рис. 1. Кран-манипулятор FASSI F290 [13]:
1, 2, 3 – первое, второе и третье поворотные звенья соответственно;
4 – телескопические секции; 5 – грузозахватный орган

Изменение конфигурации стрелы манипуляционной системы показано на рис. 2. Начальная конфигурация: третье поворотное звено ориентировано под углом $\varphi = -13{,}5^\circ$ к горизонту, первая телескопическая секция

выдвинута на 0,4 м. Третье поворотное звено движется до того момента, пока угол его ориентации не достигает значения $\varphi = 42{,}5°$ к горизонту (через 18 с после начала движения). При этом через 6 с после начала движения первая телескопическая секция выдвигается на 0,1 м, а через 16 с – задвигается на 0,3 м и стрела приходит к конечной конфигурации.



а ***б***

Рис. 2. Изменение конфигурации стрелы исследуемого крана-манипулятора: а – начальная конфигурация; б – конечная конфигурация

Уравнения движения звеньев манипуляционной системы с учетом упругой податливости строятся с использованием метода множителей Лагранжа [3, 14], позволяющего учесть конструкционные ограничения:

$$M_{зi}\ddot{q}_i + C_q^T \lambda = Q_{езi} - Q_{vзi} - Q_{fзi}, \qquad (1)$$

где C_q – матрица уравнений связи; λ – множители Лагранжа.

Уравнения (1) являются универсальными и позволяют моделировать совместное движение нескольких звеньев. Для получения корректных результатов необходимо учитывать распределение создаваемого насосом объемного расхода рабочей жидкости между гидродвигателями. Для этого используются структурные модели нескольких гидравлических подсистем. Их количество определяется числом допустимых для рассматриваемой манипуляционной системы сочетаний совместно движущихся звеньев грузоподъемной стрелы. Каждая из таких моделей характеризует гидравлические процессы, протекающие в гидросистеме мобильной машины при возможных сочетаниях прямого и обратного перемещений выходных звеньев обоих гидродвигателей при различных способах управления.

На рис. 3 показана структурная модель гидравлической подсистемы гидропривода с дроссельным управлением. Точка 1 структурной модели соответствует выходу из насоса, точка 2 – месту подключения клапана давления, точка 0 – входу в гидробак. Давление рабочей жидкости в харак-

терных точках гидросистемы выражается величинами p_k, а ее объемный расход (с учетом возможных внешних утечек) на характерных участках гидросистемы – величинами Q_m.

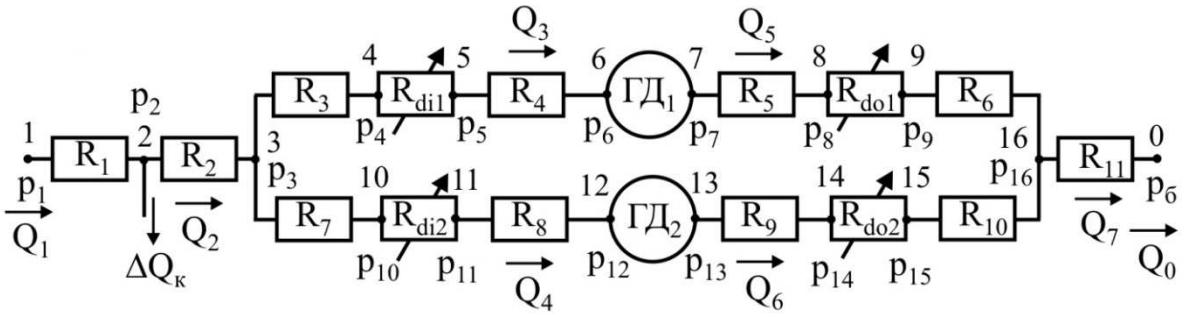


Рис. 3. Структурная модель подсистемы гидропривода манипуляционной системы при совместной работе двух гидродвигателей

Изменение во времени давлений p_k и объемных расходов Q_m рабочей жидкости в процессе одновременной работы двух гидродвигателей, обеспечивающих совместное движение двух звеньев манипуляционной системы мобильной машины выражается системой дифференциально-алгебраических уравнений вида:

$$\left(m_{\text{пр,гц1}} / A_{1,\text{гц1}}\right)\dot{Q}_3 = \left(A_{1,\text{гц1}} p_6 - A_{2,\text{гц1}} p_7\right)\eta_{\text{гц1}} - F_{1C,\text{гц1}} - F_{br,\text{гц1}};$$

$$\left(m_{\text{пр,гц2}} / A_{1,\text{гц2}}\right)\dot{Q}_4 = \left(A_{1,\text{гц2}} p_{12} - A_{2,\text{гц2}} p_{13}\right)\eta_{\text{гц2}} - F_{1C,\text{гц2}} - F_{br,\text{гц2}};$$

$$p_1 = f(Q_1); \quad p_2 = p_1 - R_1; \quad p_3 = p_2 - R_2; \quad p_4 = p_3 - R_3;$$

$$p_5 = p_4 - \Delta p_{di1}; \quad p_6 = p_5 - R_4; \quad p_7 = p_8 + R_5; \quad p_8 = p_9 + \Delta p_{do1};$$

$$p_9 = p_{16} + R_6; \quad p_{10} = p_3 - R_7; \quad p_{11} = p_{10} - \Delta p_{di2}; \quad p_{12} = p_{11} - R_8;$$

$$p_{13} = p_{14} + R_0; \quad p_{14} = p_{15} + \Delta p_{do2}; \quad p_{15} = p_{16} + R_{10}; \quad p_{16} = p_6 + R_{11};$$

$$Q_1 = (Q_2 / \zeta_2 + \Delta Q_{\text{к}}) / \zeta_1; \quad Q_2 = Q_3 / \zeta_3 \zeta_4 + Q_4 / \zeta_7 \zeta_8; \quad Q_5 = (A_{2,\text{гц1}} / A_{1,\text{гц1}}) Q_3;$$

$$Q_6 = (A_{2,\text{гц2}} / A_{1,\text{гц2}}) Q_4; \quad Q_0 = (\zeta_5 Q_5 + \zeta_6 Q_6)\zeta_7; \quad \Delta Q_{\text{к}} = f(p_2),$$

где $m_{\text{пр,гц}i}$ – приведенная к штоку i-го гидроцилиндра масса движущихся частей гидроцилиндра, звеньев манипуляционной системы и груза, кг; $A_{j,\text{гц}i}$ – площадь поршня i-го гидроцилиндра со стороны j-й полости, м^2; $F_{1C,\text{гц}i}$ – эксплуатационная нагрузка при движении штока i-го гидроцилиндра в j-м направлении, Н; $F_{br,\text{гц}i}$ – внешнее тормозное усилие, прикладываемое к штоку i-го гидроцилиндра, Н; $f(Q_1)$ – зависимость вида $Q \sim p$ (паспортная характеристика насоса); R_m, ζ_m – потеря давления и коэффициент внешних утечек рабочей жидкости на m-м участке гидросистемы между двумя последовательными характерными точками, Па;

$\Delta Q_к$ – расход жидкости, проходящей через клапан давления, м^3/с; $f(p_2)$ – статическая характеристика клапана давления; Δp_{dij}, Δp_{doj} – регулируемый перепад давления на гидродросселях на входе и выходе из j-го гидродвигателя, Па; $\eta_{гцi}$ – механический КПД i-го гидроцилиндра.

В случае совместного движения двух звеньев начальные условия для интегрирования уравнения движения штока первого включенного гидродвигателя (гидроцилиндра $ГД_1$):

$$Q_1 \le Q_{\max};\ Q_3(\tau = 0) = Q_н / \zeta_1\zeta_2\zeta_3;$$

$$p_4(\tau = 0) = p_н;\ p_5(\tau = 0) = p_{5,0}\ (\text{или}\ p_6(\tau = 0) = p_н;\ p_7(\tau = 0) = p_{7,0}),$$

а для второго гидродвигателя (гидроцилиндра $ГД_2$), включаемого с запаздыванием на величину $\Delta\tau$, начальные условия имеют вид:

$$Q_1 \le Q_{\max};\ Q_4(\tau = \Delta\tau) = 0;$$

$$p_6(\tau = \Delta\tau) = p_3(\tau = \Delta\tau);\ p_7(\tau = \Delta\tau) = p_8(\tau = \Delta\tau)$$

$$(\text{или}\ p_{12}(\tau = \Delta\tau) = p_3(\tau = \Delta\tau);\ p_{13}(\tau = \Delta\tau) = p_{16}(\tau = \Delta\tau)).$$

Для проверки адекватности разработанной математической модели для анализа динамики манипуляционной системы с гидравлическим приводом при совместном движении звеньев были выполнены экспериментальные исследования. Методика экспериментального исследования включала последовательное проведение следующих действий.

1. Установку исследуемой мобильной машины, оснащенной манипуляционной системой с гидравлически приводом, на горизонтальное жесткое (асфальтовое) опорное основание.

2. Установку видеокамеры на штативе и масштабной измерительной линейки непосредственно рядом с манипуляционной системой.

3. Приведение манипуляционной системы с грузом (3,3 т) на крюке в исходное положение, соответствующее расчетному (рис. 2, а). При этом оператор добивается полного совпадения положений звеньев стрелы манипуляционной системы с расчетной конфигурацией.

4. Выдержку манипуляционной системы в покое в течение 120 с для полного прекращения колебаний, вызванных операциями п. 3. В это время видеокамера наводится на ту область рабочей зоны манипуляционной системы, в которой будет происходить совместное движение звеньев. При этом камера располагается строго перпендикулярно к плоскости, в которой расположена манипуляционная система.

5. Приведение оператором манипуляционной системы в движение таким образом, чтобы соблюдалось максимально возможное соответствие реального движения ее звеньев расчетному. Одновременно видеокамера переводится в режим записи.

6. Повторение последовательности действий по п.п. 3-5 несколько (не менее 3) раз с целью исключения возможных ошибок и обеспечения стабильности получаемых результатов экспериментального исследования.

7. Обработку отснятых первичных видеозаписей с помощью специализированного программного обеспечения Kinovea (рис. 4) с целью построения графиков изменения перемещений характерных точек стрелы манипуляционной системы во времени [15]. Компьютерная программа позволяет построить траекторию движения выбранной контрольной точки, связанной с манипулятором, от заданного начального (рис. 2, а) до конечного (рис. 2, б) положения. В процессе проведенного эксперимента при обработке видеозаписи строилась траектория движения крайней точки первого телескопического звена 4 (рис. 4).

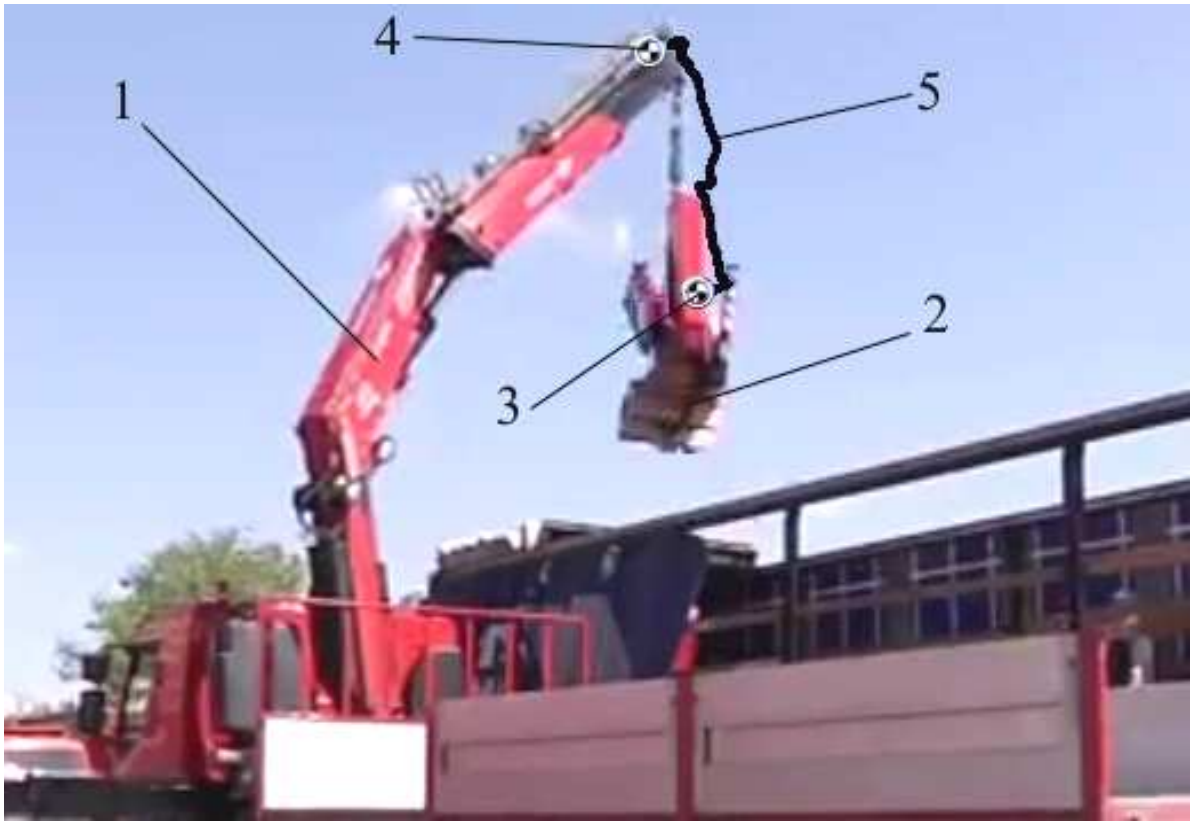


Рис. 4. Обработка экспериментальных данных с помощью программного обеспечения Kinovea: 1 – манипуляционная система; 2 – груз; 3 – начальная точка траектории; 4 – конечная точка траектории; 5 – траектория движения первого телескопического звена

Сравнение результатов компьютерного моделирования и результатов экспериментальных исследований приведено на рис. 5, 6.

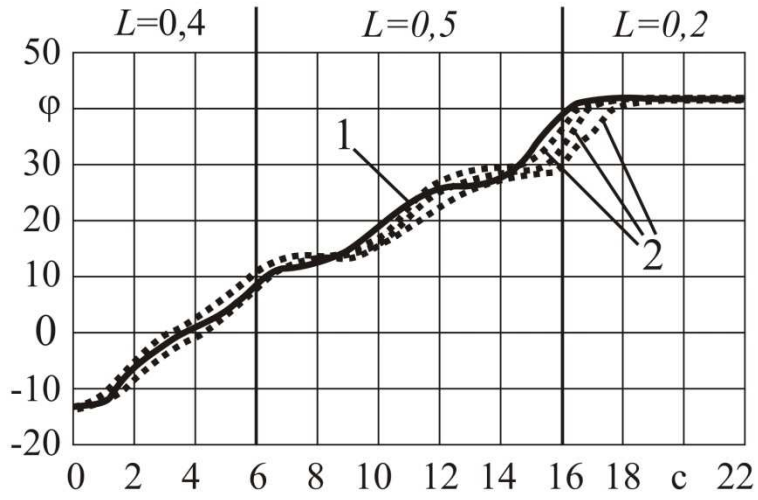


Рис. 5. Изменение угла ориентации третьего поворотного звена: 1 – расчет; 2 – эксперимент

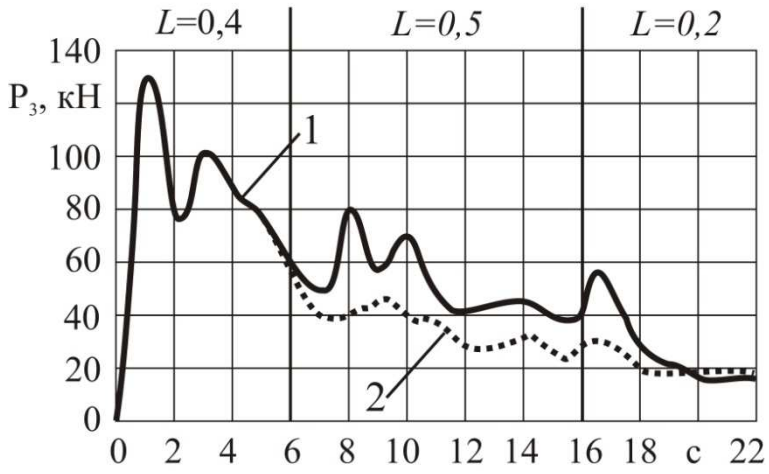


Рис. 6. Усилие P_3 в гидроцилиндре привода третьего поворотного звена: 1 – совместное движение; 2 – раздельное движение

Анализ полученных результатов и выводы.

1. При многократном повторении наблюдается случайное несовпадение траекторий совместного движения звеньев манипуляционной системы и графиков изменения во времени динамических параметров, а также случайный разброс их количественных характеристик. На графике (рис. 5) видно, что первое телескопическое звено начинает выдвигаться не строго через 6 с после начала цикла, а через 5,5…6,2 с; задвигаться – через 16,5…18,0 с. В свою очередь, это приводит к разбросу времени цикла работы манипуляционной системы в диапазоне 19,0…22,0 с, т. е. продолжительность цикла выполнения технологической операции увеличивается на ~6…22 % относительно требуемого значения.

2. Указанный разброс количественных характеристик динамических параметров обусловлен ручной системой управления манипуляционной системой. Оператор в силу физических ограничений не в состоянии строго выдерживать заданную траекторию движения груза, от цикла к циклу идентично управлять движением отдельных звеньев (включать и выключать гидродвигатели в одно и то же время). Это определяет существенное отличие условий эксплуатации манипуляционных систем мобильных транспортно-технологических машин от условий эксплуатации промышленных манипуляционных роботов с программным управлением по заданной программе.

3. В работе [9] показано, что совмещение движений поворотных звеньев позволяет снизить усилия, преодолеваемые гидродвигателями, в 3…8 раз. Проведенные исследования показали, что совмещение во времени движения поворотных и телескопических звеньев приводит к изменению усилий, преодолеваемых гидродвигателями, на 30…40 % (рис. 6). Это объясняется как изменением инерционных нагрузок, зависящих от текущих значений мгновенных скоростей звеньев, так и изменением момента инерции движущейся части стрелы относительно цилиндрического шарнира. Поэтому усилия в гидродвигателях могут как снижаться, так и возрастать. В рассмотренном случае сначала происходит поворот третьего поворотного звена, а затем выполняется выдвижение телескопического звена. Это приводит к росту плеча приложения нагрузки от веса груза и собственного веса металлоконструкции звеньев манипуляционной системы и их моментов инерции относительно поворотного шарнира. Как следствие, в рассматриваемом случае совмещение движений приводит к увеличению усилий, действующих на выходные звенья гидродвигателей, причем это проявляется в наибольшей степени при линейном выдвижении телескопического звена (интервал 6…18 с на рис. 6).

4. Результаты компьютерного моделирования с использованием разработанных математических моделей подтверждаются результатами экспериментальных исследований. Анализ графиков на рис. 5 позволяет сделать вывод об удовлетворительном совпадении качественных и количественных характеристик параметров совместного движения звеньев манипуляционной системы с гидравлическим приводом.

Список литературы

1. Featherstone R. Rigid Body Dynamics Algorithms. N.Y.: Springer, 2008. 272 p.

2. Лагерев А.В., Мильто А.А., Лагерев И.А. Динамико-прочностной анализ гидравлических крано-манипуляторных установок мобильных машин. Брянск: РИО БГУ, 2015. 186 с.

3. Korkealaakso P., Mikkola A., Eantalainen T., Rouvinen A. Description of Joint Constraints in the Floating Frame of Reference Formulation // Proc. IMechE. 2008. Vol. 223. Part K. P. 133-144.

4. Лагерев А.В., Лагерев И.А., Мильто А.А. Универсальная методика определения напряжений в стержневых элементах конструкций гидравлических кранов-манипуляторов в задачах динамики // Вестник Брянского государственного университета, 2013. № 4. С. 21-26.

5. Вершинский А.В., Лагерев И.А., Шубин А.Н., Лагерев А.В. Численный анализ металлических конструкций подъемно-транспортных машин. Брянск: БГУ, 2015. 210 с.

6. Лагерев И.А. Моделирование напряженно-деформированного состояния крана-манипулятора машины для сварки трубопроводов // Известия высших учебных заведений. М: Машиностроение, 2011. №4. С. 29-36.

7. Лагерев И.А. Влияние подкрановой конструкции на динамическую нагруженность мостового крана // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2011. Вып. 5. Ч. 3. С. 3-10.

8. Шариков Н.В. Моделирование управляемого движения манипулятора // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2013. Вып.9. Ч. 2. С. 193-201.

9. Бартенев И.М., Емтыль З.К., Попиков П.И. Исследование динамической нагруженности гидравлического манипулятора и обоснование целесообразности совмещения операций подъёма стрелы и вращения рукояти // Труды «ФОРА». 1997. №2. С. 96-114.

10. Багаутдинов И.Н. Совершенствование опорно-поворотного устройства лесозаготовительных машин манипуляторного типа. Йошкар-Ола: МарГТУ, 2002. 18 с.

11. Лагерев И.А. Динамическая нагруженность крана-манипулятора машины для сварки трубопроводов при движении с грузом // Подъемно-транспортное дело. 2011. №3. С. 7-10.

12. Лагерев А.В., Лагерев И.А., Мильто А.А. Исследование динамики и прочности гидравлических крано-манипуляторных установок на подвижном шасси // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2015. № 1. С. 43-48.

13. FASSI F290.A22. Паспорт. [Электронный ресурс]. URL: http://docs.crane.ru/ _archive/ F290A-22/ fassi_passport_f290a-22_e5-1_lite.pdf (дата обращения 22.11.2016).

14. Ковальский В.Ф., Лагерев И.А. Математическое моделирование динамики манипуляционной системы мобильной транспортно-технологической машины с учетом упругости звеньев // Известия МАМИ. 2016. №3. С. 9-15.

15. Kinovea: video motion analysis software. [Электронный ресурс]. URL: www.kinovea.org (дата обращения 22.11.2016).

Лагерев Игорь Александрович, канд. техн. наук, доц., проректор по инновационной работе, lagerev-bgu@yandex.ru, Россия, Брянск, Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского

DYNAMICS SIMULATION AND EXPERIMENTAL ANALYSIS OF MANIPULATOR DURING SIMULTANEOUS MOTION OF LINKS

I.A. Lagerev

Manipulator sections of transport and technological machines can move simultaneously. However, simultaneous movement of the sections leads to mechanical stresses and hydraulic cylinders forces changing. Mathematical models for computer dynamics simulation of simultaneous manipulator links motion is under consideration in this article. The hydraulic drive model was added to manipulator dynamics model. This models allow to take into consideration the working fluid split during simultaneously moving of the links. The results of simulation are confirmed by experimental studies.

Key words: manipulation system, transport and technological machine, simultaneous motion, dynamics, simulation.

Lagerev Igor Aleksandrovitch, candidate of technical sciences, docent, vice-rector, lagerev-bgu@yandex.ru, Russia, Bryansk, Bryansk I.G. Petrovsky State University

УДК 621.791.037.2

КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭЛЕКТРОДОВ ПРИ КОНТАКТНОЙ ТОЧЕЧНОЙ СВАРКЕ

И.Б. Пьянков, В.А. Ерофеев, Е.А. Страхова

Предложены критерии для оценки стойкости электродов при выборе их геометрии и режима сварки: отношение давления в контактах между электродами и свариваемыми листами к твёрдости рабочих поверхностей и значение температуры этих поверхностей, которые определяются в ходе компьютерного моделирования сварочного процесса. Численное моделирование показало, что интенсивность деформации поверхности электродов непостоянна в течение импульса тока и существенно зависит как от формы поверхности, так и режима сварки. Полученные результаты не противоречат имеющимся опытным данным, что позволяет использовать предложенные модель и критерии в системах компьютерного инженерного анализа технологии контактной точечной сварки.

Ключевые слова: компьютерный инженерный анализ, математическая модель, контактная точечная сварка, стойкость электродов.

При производстве разнообразных элементов конструкций судостроения используется контактная точечная сварка [1]. Одной из важных проблем контактной точечной сварки является недостаточная износостойкость электродов, рабочие поверхности которых по мере эксплуатации изменяют свою форму, окисляются и загрязняются окисными плёнками с поверхности свариваемых листов [2, 3].

До настоящего времени общепризнанного критерия оценки стойкости электродов контактных машин не существует. Обычно стойкость электродов производят опытным путем и оценивают количеством качественных точек. В качестве показателя стойкости используют количество точек, сваренных до увеличения диаметра исходной рабочей поверхности электрода на 20% [2]. При сварке сплавов алюминия стойкость определяется загрязнением поверхности электродов окисными плёнками [4].

Стойкость электродов определяют очень многими факторами контактной сварки, из которых основными являются: свойства электродного сплава и металла свариваемых деталей, режим и темп сварки, конструкция электродов (форма, размеры), эффективность охлаждения электродов, размеры литой зоны. Износ электродов определяется термодеформационными процессами на их рабочей поверхности [2 - 7].

При разработке технологии необходимо обеспечить условия, при которых термодеформационные процессы на поверхности электродов не вызывали их быстрого износа. Такую задачу целесообразно решать методами компьютерного инженерного анализа, базирующегося на физико-математическом моделировании.

Известные компьютерные модели процесса контактной точечной сварки [8 - 10] учитывают электрические, тепловые и деформационные процессы при формировании соединения, взаимодействие процесса со сварочной машиной, форму рабочей поверхности электрода, шунтирование. Для решения задачи оценки износостойкости электродов её необходимо дополнить моделью термодеформационных процессов в контактах между электродами и свариваемым металлом.

Физические процессы при контактной точечной сварке протекают в зоне, которая много меньше свариваемых деталей и электродов. Для анализа процесса формирования сварного соединения достаточно ограничиться пространством в форме цилиндра радиусом, равным диаметру тела электрода и высотой, равной расстоянию между плоскостями дна водоохлаждаемых каналов в электродах, В пространство моделирования входят свариваемые листы, рабочая часть электродов. Основными параметрами сварочного процесса являются напряжение U0 холостого хода сварочного трансформатора, усилие F их сжатия и длительности импульса тока tw и охлаждения tk в электродах машины.

Основными процессами, определяющими формирование сварного соединения и условия работы электродов, являются: электрический, тепловой и деформационный.

Электрический процесс определяет распределение плотности тепловыделения в соответствии с распределением электрического потенциала и плотности тока. Электрический потенциал зависит от напряжения сварочной машины и её электрического сопротивления, а также электрического сопротивления зоны моделирования.

Теплота, выделяющаяся в металле, неравномерно разогревает металл, что вызывает тепловые потоки, которые выравнивают распределение температуры. Области металла, в которых температура превышает температуру ликвидуса, плавится, что формирует литое ядро.

Усилие сжатия, приложенное к электродам, создаёт объёмное давление в металле. Так как предел прочности металла при нагревании сильно снижается, это приводит к возникновению области, в которой давление превышает его предел прочности. В этой области возникает пластическая деформация, выравнивающая давление, а металл находится в состоянии объёмного сжатия и подобен жидкости с постоянным давлением, равным пределу прочности металла на границе контакта между листами или между электродами и листами.

Рабочая поверхность электрода испытывает воздействие высоких температур и давления в его контакте с металлом деталей. Несмотря на низкое электросопротивление и высокую теплопроводность электродных сплавов, температура поверхности контактов может достигать значений, при которых предел прочности электродного сплава окажется меньше давления в контакте. Области поверхности электрода и момент времени возникновения этой ситуации можно определить в ходе моделирования процесса формирования соединения. Вторым фактором, вызывающим износ электродов, является налипание на их рабочую поверхность окисных плёнок с поверхности свариваемых листов. Такое налипание возможно, если плёнка приваривается к поверхности, т.е. если окисная плёнка нагрелась до температуры плавления электродного сплава.

Износостойкость электродов определяется термодеформационными процессами на их рабочей поверхности. На рис. 1 показана зависимость твёрдости от температуры для бронз, используемых для изготовления электродов.

Твёрдость поверхности электродов очень сильно зависит от термодеформационной обработки. Для повышения твёрдости проводится термомеханическая обработка: закалка с температуры 980…1000 °С, охлаждение в воде, холодная деформация 40…50% и отпуск при температуре 460 °С. После такой обработки твердость НВ хромовой бронзы может быть повышена до 140…150, а электропроводность до 80…85% от электропроводности меди. При эксплуатации возможен перегрев поверхности электродов выше температуры начала рекристаллизации (365…400 °С), вызывающий очень существенное снижение твёрдости практически до значений для чистой меди. Однако это снижение протекает достаточно медленно и определяется скоростью диффузии, которая существенно увеличивается с ростом температуры.

Количество точек, сваренных электродами до их переточки, зависит как от твёрдости рабочей поверхности электродов. Например, при сварке малоуглеродистой стали электроды из меди необходимо перетачивать по-

сле сварки 2000 точек, а из бронзы БрХ – через 10000 точек. При увеличении проплавления листов и длительности импульса тока, а также при увеличении темпа сварки количество сваренных точек до переточки заметно уменьшается, что объясняется увеличением температуры и снижением твёрдости рабочей поверхности электродов. При выборе параметров сварки длительный срок службы электродов обеспечивается, если температура их рабочих поверхностей не превышает значения начала рекристаллизации (365…400 °С). Это требование на практике не выполняется, что приводит к постепенному снижению твёрдости до значений, при которых давление в контакте превышает сопротивление пластической деформации и изменение геометрии рабочей поверхности электродов.

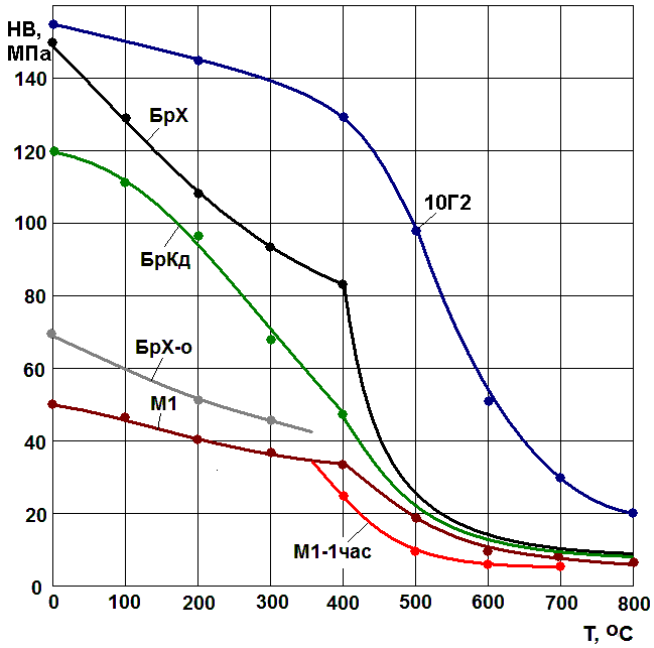


Рис. 1. Зависимость твёрдости по Бринеллю от температуры для меди: для краткого (М1) и длительного испытания (М1-1 час); для бронзы: после термообработки (БрХ, БрКд) и после отжига (БрХ-о); для стали (10Г2)

В качестве критериев для оценки параметров сварки для обеспечения износостойкости электродов можно предложить отношения давления в контакте к твёрдости при температуре рабочих поверхностей электродов, а также длительность пребывания электродного сплава при температуре свыше значения температуры начала рекристаллизации. Для сплавов алюминия в качестве критерия можно использовать разность температур плавления алюминия и температуры поверхности свариваемого сплава под электродом.

Определение численного значения этих критериев требует моделирования всего процесса сварки с учётом всех значимых технологических факторов.

Математическая модель процесса. Соединение, получаемое при контактной точечной сварке, имеет осевую симметрию, поэтому распределение параметров процесса описано в зависимости от расстояние до оси симметрии *r* и удаления *z* от дна канала нижнего электрода.

Ввиду гетерогенности строения зоны моделирования последняя разбита на области: *M*1 и *M*2 – металл свариваемых листов, *E*, *E*1 – металл электродов, *B* – воздух. На начальном этапе моделирования размеры областей задаются геометрией электродов и толщиной свариваемых листов. В каждой из указанных областей учитываются удельные электрическое сопротивление ρ_e, теплопроводность λ, плотность ρ и сопротивление металла пластической деформации σ. Теплоёмкость, фазовые и агрегатные превращения учитываются нелинейной функцией, связывающей температуру с объёмной энтальпией *H*.

Распределение интенсивности тепловыделения по зоне моделирования определяется решением уравнения электрического потенциала, которое в цилиндрической системе координат имеет вид:

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{1}{\rho_e}\frac{\partial U}{\partial r}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{1}{\rho_e}\frac{\partial U}{\partial z}\right)=0, \qquad (1)$$

где *z* и *r* - осевая и радиальная координаты; ρ_e - удельное электросопротивление металла.

Граничные условия:

в плоскостях параллельных поверхности листов

$$z = 0,\ U=0;\ z = z_m,\ U = U_e,$$

где U_e - напряжение между электродами машины;

на оси электродов r=0, $\frac{\partial U}{\partial r}=0$;.

на цилиндрической поверхности тела электродов

$$r = r_m \cap \left(z < Z_{e1} \cup z > Z_{e2}\right),\ \frac{\partial U}{\partial r}=0;$$

на границе, пересекающей металл листов

$$r = r_m \cap \left(z > Z_{e1} \cap z < Z_{e2}\right),\ \frac{\partial^2 U}{\partial r^2}=0.$$

Для решения этого уравнения необходимо задать напряжение между электродами U_e. При решении уравнения потенциала вычисляются сварочный ток I_w, электрическое сопротивление зоны моделирования R_{ee}:

$$I_w = 2\pi\int_0^{r_{\max}}\frac{\partial U}{\partial z}\frac{r}{\rho_e}dr;\ R_{ee}=\frac{U_e}{I_w}. \qquad (2)$$

По значению сопротивления зоны моделирования уточняется напряжение на электродах U_e по соотношениям, зависящим от типа машины.

В частности, для наиболее используемых машин переменного тока учитываются напряжение холостого хода машины U_{xx}, угол включения тиристоров ψ, активная $R_м$ и индуктивная $X_м$ составляющие внутреннего электрического сопротивления сварочной машины:

$$U_e = \frac{\sqrt{2}U_{xx}\cdot R_{ee}}{\sqrt{X_M^2 + (R_M + R_{ee})^2}}\cdot\left(\sin\omega t - \sin(\psi-\varphi)\right)\cdot\exp\left(-(\omega t-\varphi)\cdot\frac{R_M+R_{ee}}{X_M}\right), \quad (3)$$

где ω - угловая частота электросети (ω= 314 1/с); φ - угол сдвига фазы между током и напряжением в сварочной цепи (рис. 2)

$$\varphi = \operatorname{arctg}\left(\frac{X_M}{R_M + R_{ee}}\right). \quad (4)$$

Интенсивность тепловыделения определяется из решения уравнения потенциала:

$$q(r,z) = \frac{1}{\rho_e}\left[\left(\frac{\partial U}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial U}{\partial r}\right)^2\right]. \quad (5)$$

Распределение температуры определяется решением уравнения теплопроводности, которое в цилиндрической системе координат имеет вид:

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \left[\frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\lambda}{r}\frac{\partial T}{\partial z}\right) + \frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{\lambda}{r}\frac{\partial T}{\partial r}\right)\right] + q(r,z). \quad (6)$$

Начальные условия этого уравнения учитывают температуру свариваемых листов T_0 и электродов T_{E0} в момент начала сварки:

$$t = 0,\ T(r,z) = \begin{cases} T_0, & Z_{e1} < z < Z_{e2} \\ T_{E0}(z), & z < Z_{e1} \cup z > Z_{e2} \end{cases}$$

Граничные условия уравнения энергии:

$$z = 0 \text{ или } z = z_m,\ T = T_o;\ r = r_m,\ \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} = 0;\ r = 0,\ \frac{\partial T}{\partial r} = 0.$$

Особенностью строения зоны формирования литого ядра является возникновение обширной зоны пластического течения металла, которое выравнивает давление внутри нагретой области деталей до значения, равного пределу прочности металла на границе контакта между деталями. Это позволяет определить радиус контакта из простого соотношения:

$$\pi r_k^2 \sigma\left(T\left(r_k, Z_k\right)\right) \xrightarrow{r_k = \text{var}} F_k, \quad (7)$$

где F_k - усилие сжатия свариваемых деталей.

Так как пластическая деформация необратима, то диаметр контакта между листами определяется как

$$d_P = \max\left(d_P, 2r_k\right).$$

Минимальная температура T_P пластической деформации и давление p_P в зоне пластического течения определяются:

$$T_P = T(r = \frac{d_P}{2}, z = Z_k); \quad p_P = \sigma(T_P). \tag{8}$$

Так как температуры в контактах между листами и под электродами различны, то и радиусы соответствующих контактов неодинаковы. Учитывая, что зона пластического течения занимает часть площади контакта под электродом, радиус этого контакта определяется из соотношения:

$$2\pi \int_o^{r_E} r \max\left(\sigma\left(T\left(r_E, Z_e\right), p_P\right)\right) dr \xrightarrow{r_E = \text{var}} F_E, \tag{9}$$

где F_E - усилие прижатия электрода к поверхности листа.

Решение системы уравнений (1…9) позволяет воспроизвести распределение в свариваемых листах и в электродах плотности тока, интенсивности тепловыделения и температур, а также давления в контактах в течение импульса сварочного тока. По этим распределениям можно оценить показатели качества формирования сварного соединения и условия эксплуатации электродов.

Критерии оценки условий эксплуатации электродов. Численное решение системы уравнений (1…9) позволяет определить распределение температуры T_E и давления p_E в слоях электродного металла, прилегающих к контактам со свариваемыми листами. Давление не должно превышать твёрдости материала электрода H_V при рассчитанном значении температуры:

$$\max\left(p_E(r,z,t)\right) < H_V\left(T_E(r,z,t)\right). \tag{10}$$

Это условие является главным критерием режима сварки по условию скорости деформации рабочей поверхности электродов. Параметры режима можно считать допустимыми, если

$$K_S = \frac{\max\left(p_E(r,z,t)\right)}{H_V\left(T_E(r,z,t)\right)} < 1. \tag{11}$$

Но даже при выполнении этого условия идёт процесс рекристаллизации, постепенно снижающий твёрдость. Этот процесс заметен, если температура рабочей поверхности превысит пороговое значение 360 ^{o}C, т.е. вторым критерием выбора режима сварки является

$$\max\left(T_E(r,z,t)\right) < 360°C. \tag{12}$$

Численное решение системы уравнений физико-математической модели выполнено в общем цикле времени с малым временным шагом, значение которого выбиралось из условия достаточно точного воспроизведения изменения тока. Результат показан на рис. 2 – 5 для случая сварки листов из стали 09Г2 толщиной 1.5+2 мм на машине переменного тока. Электроды из бронзы БрХ, диаметр тела 16 мм, диаметр рабочего участка 3 мм, высота конуса 2 мм, расстояние до дна водоохлаждаемого

канала 10 мм. Усилие сжатия электродов 5 кН. Длительность импульса тока 0.24 с, напряжение холостого хода 4 В, электросопротивление машины $50+160j$ мкОм.

На рис. 2 показано изменение параметров сварочного процесса в течение импульса тока.

Износ электродов оценивали значением отношения давления на поверхности электродов к твёрдости K_{s1}, K_{s2}, которое непрерывно изменяется вследствие уменьшения давления в контактах из-за роста их диаметров d_E и снижения твёрдости материала электродов по мере увеличения температуры T_E их рабочих поверхностей.

На рис. 3 показано распределение интенсивности удельного тепловыделения и температуры в зоне формирования соединения.

Особенностью контактной точечной сварки является локализация тепловыделения по периферии контактов, как между листами, так и листов с электродами. В центральной области тепловыделение относительно невелико, что объясняется более высоким удельным электросопротивлением металла при высоких температурах, которое вызывает перераспределение электрического тока в более холодные области металла. Несмотря на высокую интенсивность тепловыделения на периферии контактов, температура достигает наибольших значений в окрестности оси соединения. Температура на поверхности электродов существенно меньше вследствие высокой теплопроводности материала электрода.

Под действием высоких температур и давления электродов в металле листов формируются специфические области (рис. 4).

Для оценки влияния параметров сварки на условия эксплуатации электродов определили значения температуры T_E поверхности электродов и отношения K_s давления на эту поверхность к твёрдости электродного сплава БрХ после термообработки и упрочняющего отжига. При моделировании процесса (1…9) изменяли диаметр рабочей поверхности электродов, усилие их сжатия, а также начальную температуру поверхности, что соответствовало увеличению темпа сварки (рис. 5).

Уменьшение диаметра рабочей поверхности электродов существенно увеличивает давление на этой поверхности в начале импульса тока (рис. 5, б), и увеличивает температуру в конце этого импульса. Увеличение усилия сжатия электродов увеличивает отношение K_s давления к твёрдости, но уменьшает температуру электрода (рис. 5, в). Очень сильное изменение вызывает повышение начальной температуры рабочей поверхности электрода (рис. 5, г). Полученные результаты показывают, что быстрое изменение формы рабочей поверхности, когда давление на рабочей поверхности превышает твёрдость сплава, возможно только при сильном разогреве электродов, а также при большом усилии сжатия и малом диаметре рабо-

чей поверхности. Температура рабочей поверхности, вызывающая рекристаллизацию бронзы при её нагревании свыше порогового значения 365 °С, достигает недопустимого значения при малых значениях усилия сжатия и диаметра рабочей поверхности, а также при высокой начальной температуре электродов.

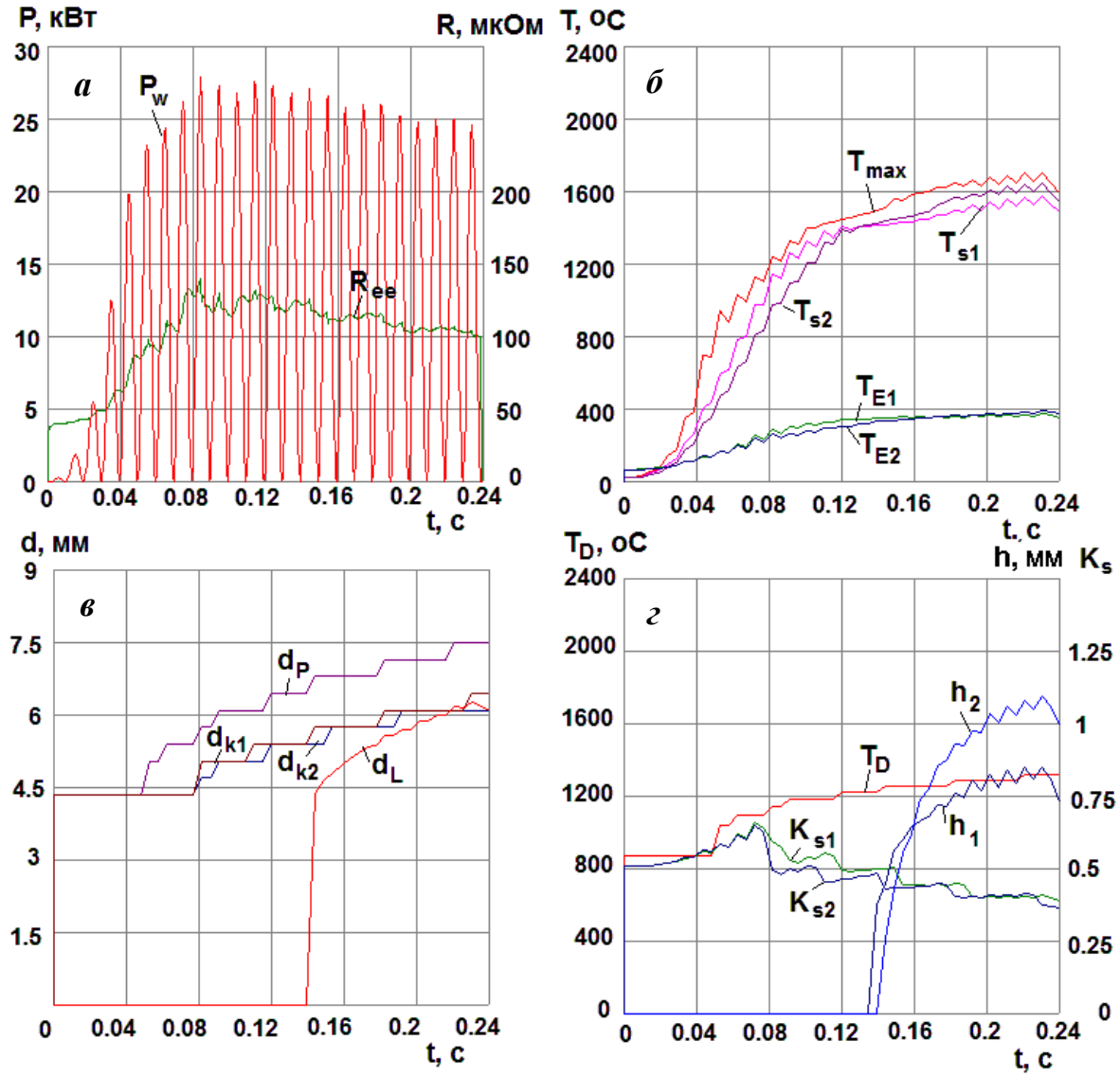


Рис. 2. Изменение параметров сварки: а – мгновенного значения мощности тепловыделения P_w в свариваемых листах и их электросопротивления R_{ee}; б – температур в центре листов T_{s1} и T_{s2}, максимальной температуры металла T_{max} и на поверхности электродов T_{E1}, T_{E2}; в – диаметров контактов листов с электродами d_{k1} и d_{k2}, между листами d_P и жидкого ядра d_L; г – минимального значения температуры пластического течения T_D, высоты проплавления листов h_1, h_2 и отношения давления на поверхности электродов к твёрдости K_{s1}, K_{s2}

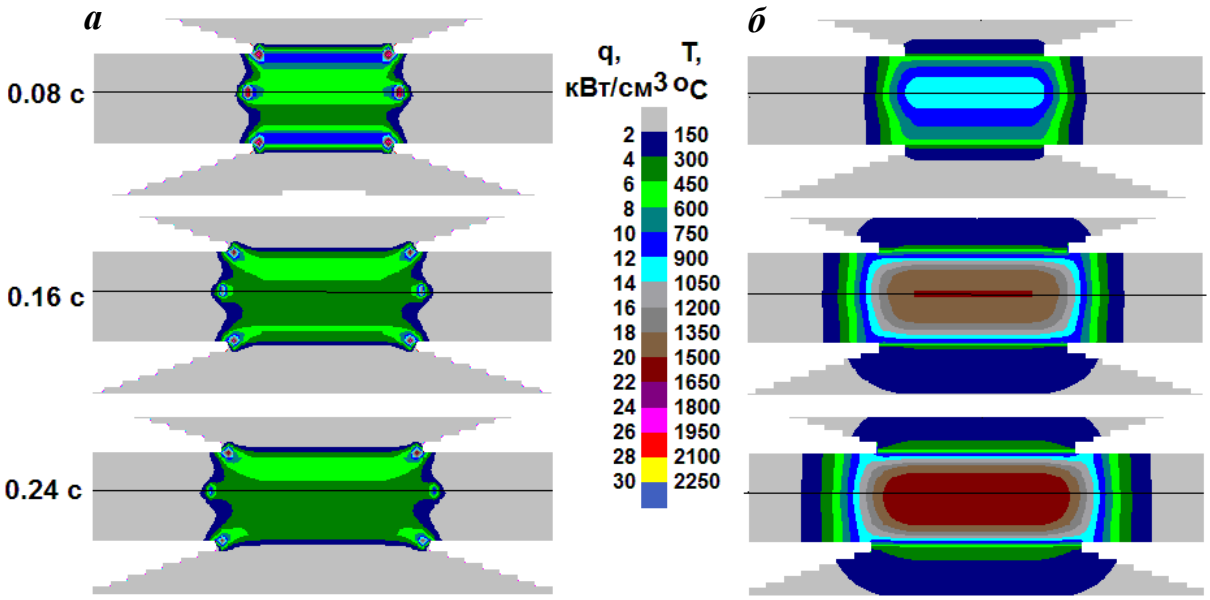


Рис. 3. Изменение во времени в аксиальном сечении зоны моделирования: а – распределения интенсивности тепловыделения q; б – распределения температуры T

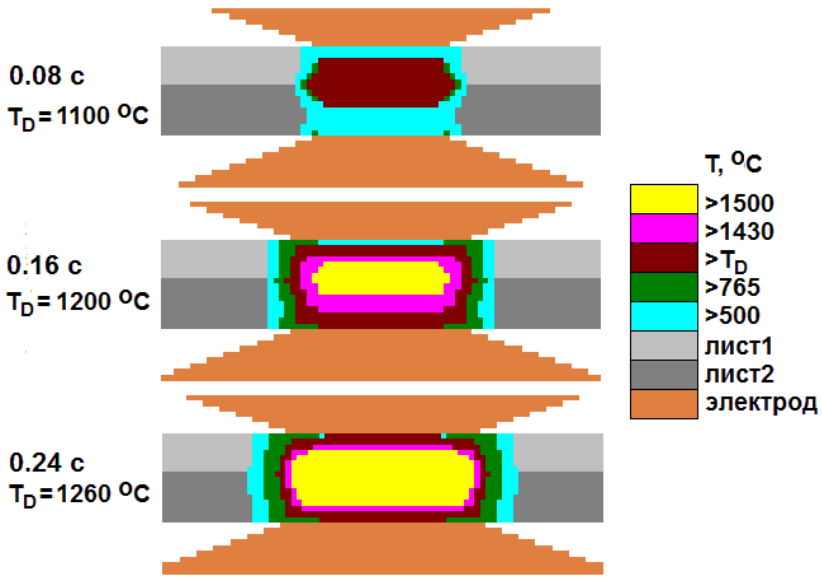


Рис. 4. Изменение во времени строения зоны моделирования: расположения области частичной (>500 °C) и полной рекристаллизации (>765 °C), зоны пластической деформации (>T_D), твёрдо-жидкой (>1430 °C) и жидкой (>1500 °C) фаз

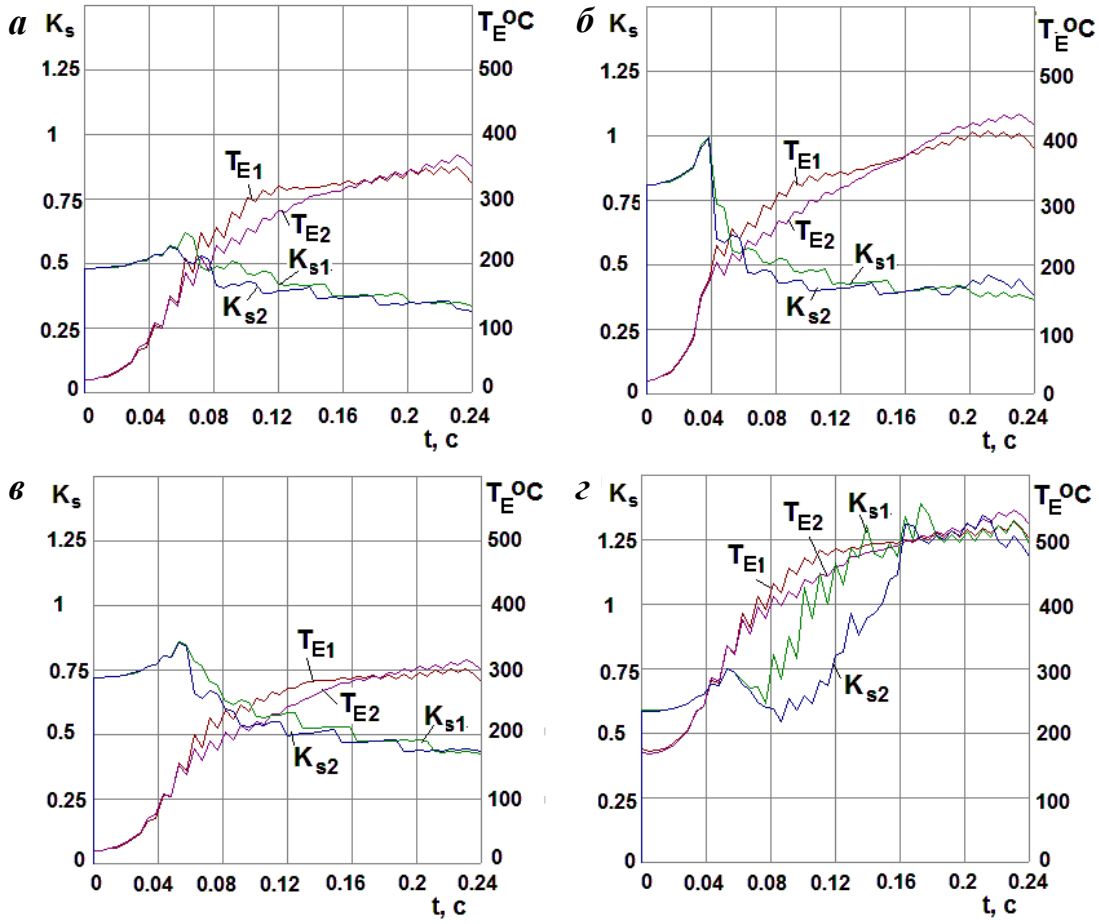


Рис. 5. Изменение в ходе сварки температуры поверхности электродов T_E и отношения K_S давления в контакте электродов с листами к твёрдости рабочей поверхности электродов при разных параметрах процесса: а – номинальный режим (d_0=4 мм, F=5 кН, T_{k0}=20 °С); б – уменьшен диаметр рабочего участка d_0=3 мм; в – увеличено усилие сжатия электродов F=7.5 кН; г – увеличена начальная температура электродов T_{k0}=200 °С

Полученные результаты не противоречат данным о влиянии параметров сварки на скорость износа электрода, что свидетельствует об адекватности предложенных критериев для выбора режима сварки и определения оптимальной формы заточки рабочих поверхностей электродов. Это позволяет использовать данные критерии в системах компьютерного инженерного анализа технологии контактной точечной сварки.

Выводы

1. Разработана физико-математическая модель процесса контактной точечной сварки, которая позволяет виртуально воспроизводить электрические и термодеформационные процессы, определяющие показатели формирования соединения при заданных параметрах режима и геометрии электродов.

2. Предложены критерии для оценки стойкости электродов при выборе их геометрии и режима сварки: отношение давления в контактах между электродами и свариваемыми листами к твёрдости рабочих поверхностей, и значение температуры этих поверхностей, которые определяются в ходе компьютерного моделирования сварочного процесса.

3. Предложенный способ оценки влияния формы рабочей поверхности электродов и режима сварки на темп износа электродов при сварке предназначен для использования в системах компьютерного инженерного анализа технологии контактной точечной сварки.

Список литературы

1. Основы сварки судовых конструкций. Б.А. Андреев, В.С. Головченко, В.Д. Горбач, В.Л. Руссо. СПб: Судостроение, 2006. 552 с.

2. Слиозберг С.К., Чулошников П.Л. Электроды для контактной сварки. Л.: Машиностроение, 1972. 96 с.

3. Николаев А.К., Розенберг В.М. Сплавы для электродов контактной сварки. М., Металлургия, 1978. 96 с.

4. Чакалев А.А., Казаков С.М., Ерофеев В.А. Саморегулирование процесса контактной сварки // Сварочное производство, 1986. № 8. С. 1-3.

5. Wei P.S., Wang S.C., Lin M.S. Transport phenomena during resistance spot welding // Trans. ASME. J. Heat Transfer, 1996. № 3. P. 762-773.

6. Tanaka Y., Sacaguchi M., Shirasawa H. Electrode life in résistance spot welding of zinc plated sheets // Int. I. Mater, and Prod. Technol., 1987. № 1. P. 64-74.

7. Roach B.W. Resistance welding of modem coated materials // Weld. Rev., 1988. № 4. P. 226, 228, 230.

8. Судник В.А., Ерофеев В.А., Кудинов Р.А., Дилтей Ч., Больманн Х.-К. Имитация контактной точечной сварки сталей с помощью программного обеспечения SPOTSIM //Сварочное производство, 1998, № 8. С. 3-8.

9. Ерофеев В.А., Логвинов Р.В. Компьютерная имитация контактной точечной сварки листов с покрытиями // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2008. Вып. 3. С. 63-70.

10. Масленников А.В., Ерофеев В.А. Компьютерное моделирование условий обеспечения коррозионной стойкости соединений при контактной точечной сварке. Сварка и диагностика. 2009. № 5. С. 14-18.

Пьянков Игорь Борисович, зав. лабораторией, Piankov.i.b@mail.ru, Россия, Москва, ООО «Силкон МАТИ»,

Ерофеев Владимир Александрович, канд. техн. наук, доц., erofeev_va@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Страхова Елена Александровна, канд. техн. наук, доц., strahova_e@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

CRITERIONS OF RATING OF THE CONDITIONS OF EXPLOITATION OF THE ELECTRODES AT CONTACT SPOT WELDING

I.B. Pyankov, V.A. Erofeev, E.A. Strakhova

Criterions for rating of resistance of the electrodes at the choice their geometry and welding mode are proposed: the ratio of pressure in the contacts between the electrodes and welded plates to the hardness of the working surfaces and the temperature value of these surfaces which are determined during the computer modeling of the welding process. Numerical modeling has shown that intensity of deformation of surface of electrodes is not constant during the current impulse and significantly depends on the shape of the surface and welding mode. The obtained results do not contradict the available experimental data that allows using proposed model and criterions in the computer systems engineering analysis of the technology of contact spot welding.

Key words: computer engineering analysis, mathematical model, contact spot welding, resistance of electrodes.

Pyankov Igor Borisovich, manager of laboratory, Piankov.i.b@mail.ru, Russia, Moscow, Private Company «Silkon MATI»,

Erofeev Vladimir Alexandrovich, candidate of technical science, docent, erofeev_va@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Strakhova Elena Alexandrovna, candidate of technical science, docent, strahova_e@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 658.512.6

ЭФФЕКТИВНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТРАНСПОРТНО-СКЛАДСКИХ СИСТЕМ

К.А. Куцелап, В.П. Вороненко, А.Э. Шалдов

В данной статье рассматривается методика проектирования транспортно-складских систем с учетом решения таких задач, возникающих в процессе машиностроительного производства, как рациональная загрузка оборудования и минимизация величины грузопотока, проходящего по транспортной системе. Эта методика применима при линейном расположении технологического оборудования и рассматривает различные вопросы проектирования механообрабатывающего производства, от вопроса о совмещении входа и выхода в производстве и определения характеристик стеллажей и до размещения оборудования в цехе.

Ключевые слова: расстановка оборудовании, эвристические алгоритмы, транспортно-складская система, принципы формирования производственных участков.

При формировании и эксплуатации производственных систем современного предприятия по производству машиностроительной продукции большую роль играет организация высокоэффективной транспортно-складской системы и обеспечение рациональной загрузки основного оборудования, позволяющей сократить количество «узких» мест на производственных участках.

Это объясняется тем, что до 95% времени производственного цикла изготовления детали составляет время, затрачиваемое на транспортировку, загрузку, хранение, включая установочно-разгрузочные операции и ожидание заготовок на станках.

Эффективность производственного процесса во многом зависит от способа реализации транспортирования, поскольку транспортные операции являются непосредственным выражением материальных связей между отдельными этапами технологического процесса. Транспортная система должна своевременно и в требуемой последовательности обеспечить выполнение всех запросов основного оборудования, накопителей и склада в необходимых полуфабрикатах, а также в ряде случаев режущими инструментами и технологической оснасткой.

Современное машиностроение характерно значительным повышением серийности выпуска продукции. Предприятия вынуждены расширять и периодически обновлять номенклатуру выпускаемых изделий, что объясняется непрерывным совершенствованием конструкций машин и технологии их производства. В связи с этим, в настоящее время во всем мире широкое распространение получают гибкие автоматизированные участки механообработки. На таких участках целесообразно применять линейную планировку (рис. 1), так как она наиболее эффективна для использования

при многономенклатурном производстве [1]. В этом случае автоматический стеллажный кран-штабелер выполняет одновременно две функции: обслуживает склад и исполняет роль транспортной системы по обслуживанию основного оборудования.

Концепция создания автоматизированных транспортно-складских систем (АТСС) включает комплексный подход к вопросам проектирования и эксплуатации основного технологического оборудования, транспортно-складских и погрузочно-разгрузочных средств.

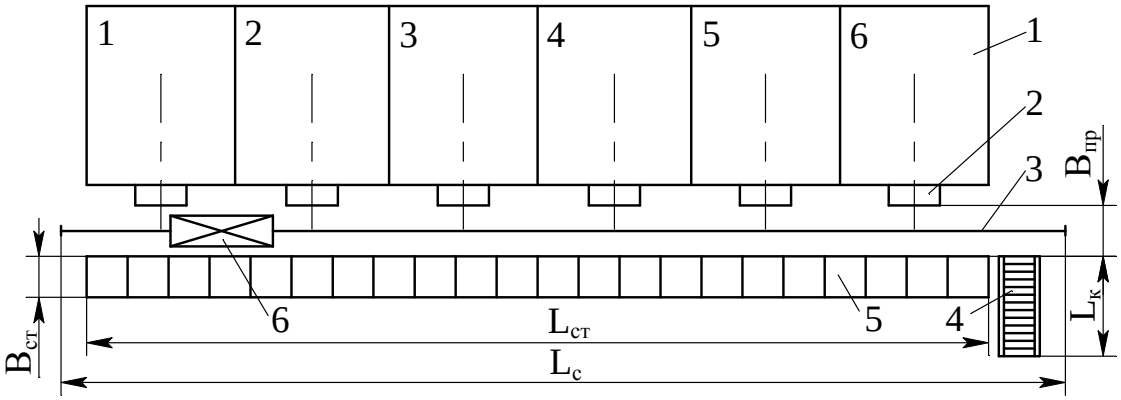


Рис. 1. План расположения оборудования участка ГПС механообработки: 1 – гибкие производственные модули; 2 – устройство приема-выдачи грузов у ГПМ (накопитель); 3 – подкрановые пути для крана-штабелера; 4 – конвейер-накопитель; 5 – стеллажи трехъярусные; 6 – автоматический стеллажный кран-штабелер

В качестве исходной информационной базы для проектирования АТСС используют следующие данные:

номенклатура выпускаемых изделий;

габаритные размеры и масса заготовок или деталей;

перспективная программа предприятия по выпуску изделий;

технология изготовления деталей или сборки изделий;

основные технико-экономические показатели предприятия и отдельных производств и т.д.

Большое внимание надо уделить оптимизации материальных потоков, так как оптимальные материальные потоки и структура транспортно-складской системы в значительной степени определяет загруженность оборудования, величину занимаемой площади, количество потребляемой энергии, эксплуатационные расходы и мобильность производственной системы. При оптимальной схеме расстановки станков на производственном участке потребуется меньшее количество транспортных средств, сократятся простои оборудования, и улучшится управление производством.

Критерием для оценки при выборе оптимальной схемы размещения технологического оборудования принимается минимум мощности грузопотока (материального потока) [2].

При выполнении компоновочных и планировочных этапов проектирования может быть использован интегральный критерий, представляющий собой векторный функционал: $f(W_1, W_2) \rightarrow \text{ext}$, где W_1, W_2 — оптимизационные критерии; W_1 — критерий минимума мощности грузопотока, тм/год.

$$W_1 = \sum_{i=1}^{n} \sum_{\alpha\gamma=1}^{\omega} Q_i l_{\alpha\gamma i}, \qquad (1)$$

где n — число наименований изделий, перемещаемых в год; ω — число операций в производственном процессе изготовления i-го изделия; Q_i — масса изделий i-го наименования, перемещаемых за год, т; $l_{\alpha\gamma i}$ — расстояние между α-й и γ-й производственными операциями, между которыми происходит перемещение i-го наименования изделия, м; W_2 — критерий максимального съема продукции с единицы объема цеха (участка) в год; $W_2 = N/V$, шт/м^{3}год, где N — программа выпуска изделий в цехе, шт/год; V — общий объем цеха, м^3.

Оптимизация по критерию максимума съема продукции с единицы объема позволит создавать компактные производственные системы, экономить производственные площади и снизить стоимость производственных зданий.

При многокритериальной оценке качества проектного решения ряд частных показателей может иметь различную размерность, но они приводятся к одной путем введения весовых коэффициентов, которые определяют на основании статистических данных и в общем случае отражают степень влияния каждого показателя на приведенные затраты. Таким образом, интегральный показатель оценки качества проектного решения определяется как сумма частных показателей, взвешенных по их значимости:

$$W_u = \sum_{i=1}^{m} W_i k_i,$$

где ki - весовой коэффициент при i-м частном критерии; m – количество частных критериев.

Точность принятия решений при многокритериальной оценке зависит от объективности принятых весовых коэффициентов k_i, которые должны отражать конкретные производственные условия. В ряде случаев число частных показателей может возрасти по сравнению с вышерассмотренным двухкритериальным случаем. В частности, могут дополнительно быть введены другие частные критерии: трудоемкость и станкоемкость изготовления изделий, цикл их изготовления, коэффициент загрузки основного оборудования, протяженность коммуникаций и др. Однако при выбо-

ре числа критериев следует учесть, что чрезмерное их число может не привести к желаемому эффекту вследствие роста суммарной погрешности интегрального критерия и трудоемкости проектных работ.

Основным путем снижения трудоемкости транспортных операций является применение автоматизированных транспортных средств на производственных участках (подвесные толкающие конвейеры, самоходный тележечный транспорт с управлением от ЭВМ, робокары, роликовые конвейеры и др.). Использование однотипных транспортных средств в производственной системе упрощает их управление и обслуживание.

Для автоматизации загрузки и разгрузки основного оборудования, а также стыковки его с транспортной системой следует использовать промышленные роботы или агрегаты загрузки спутников.

Далее рассмотрим методику создания высокоэффективных производственных систем. Для проектных расчетов необходимы следующие исходные данные:

номенклатура изготавливаемых деталей;

объем их выпуска;

массы изготавливаемых деталей;

маршруты изготовления с указанным оборудованием и штучно-калькуляционным временем для каждой операции;

эффективный годовой фонд времени работы оборудования.

1. Выбор схемы расположения оборудования на производственном участке. Типовые схемы установочных мест при линейном расположении технологического оборудования (Т.О.) приведены на рис.2. Оптимальное значение мощности грузопотока достигается при двустороннем расположении оборудования вдоль транспортной трассы (рис. 2, в, г). Схемы, приведенные на (рис. 2, а, б), используют в стесненных условиях, чаще всего при реконструкции производства, а также при применении крупногабаритного оборудования на производственном участке [4].

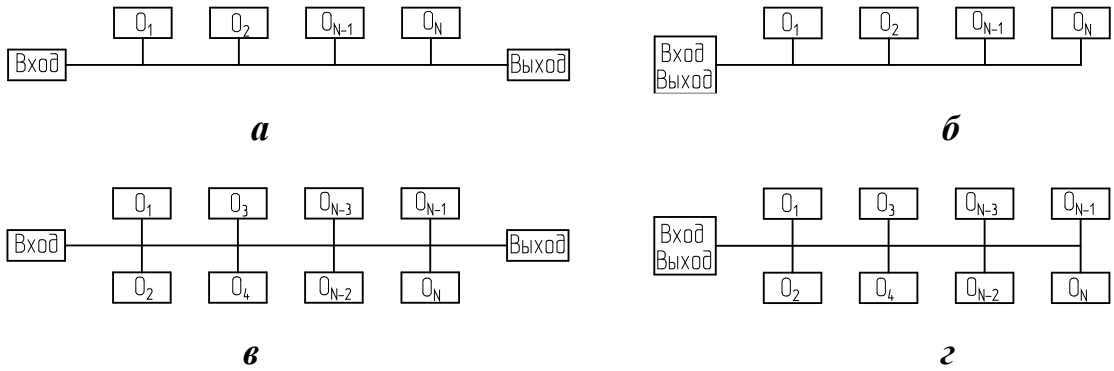


Рис. 2. Типовые схемы при линейном расположении оборудования

При совмещении входа и выхода с участка (рис. 2, б, г) происходит сокращение холостых пробегов межоперационного транспорта, при распределении технологических операций по станкам в зависимости от вре-

мени их изготовления сократится длина транспортных перемещений, повысится концентрация работ по приемке и отпуска грузов с производственного участка. Такие схемы используют при незначительных грузопотоках (не более 3 тыс. т/год), при больших грузопотоках используют схемы с раздельными входом и выходом (рис. 2, а, в).

2. Расчет числа позиций загрузки и разгрузки. Функционально позиции загрузки, где производится установка заготовок в производственную тару, и разгрузки, где изготовленные детали снимаются с производственной тары, могут быть либо разделены (рис. 2, а, в), либо объединены (рис. 2, б, г). При разделении этих функций на участке должно быть минимум два рабочих места. При объединении на одном рабочем месте обеих операций таких позиций может быть и одна, если на ней успевают по времени выполнить весь объем работ. Расчет необходимого числа позиций производят по формуле

$$n_{\text{поз}} = \frac{t k_{\text{дет}}}{\Phi_{\text{поз}} \cdot 60}$$

где t – средняя трудоемкость операций на позиции (только загрузки или разгрузки, если операции разделены, или суммарная, если обе операции выполняются на одной позиции), (время формирования или расформирования транспортной партии в среднем около 5 мин); $k_{дет}$ - количество транспортных партий; $\Phi_{\text{поз}}$ – эффективный годовой фонд времени работы позиции.

Для обеспечения нормальной работы производственного участка при n>1 требуется две позиции загрузки/разгрузки, т. е. раздельный вход и выход (рис. 2, а, в), при n<1 – одна – совмещенный вход и выход (рис. 2, б, г).

3. Выбор принципа формирования производственных участков и цехов. Важным этапом при технологическом проектировании участков и цехов является выбор принципа их формирования, который, в свою очередь, зависит от сложности выпускаемой продукции, программы выпуска изделий и режима работы производства. Существуют три принципа формирования производственных участков и цехов, определяющих форму организации производства: линейный, предметный и технологический.

При поточной форме организации производства используется линейный принцип, характеризующийся строго определенной последовательностью выполнения операций технологического процесса в каждый момент времени. Чаще всего этот принцип реализуется в виде поточных линий.

С повышением номенклатуры изготовляемых изделий становится целесообразным использовать общность технологических маршрутов и формировать производственные подразделения, используя предметный

принцип. Применительно к формированию цехов — это создание механосборочных предметно-специализированных производств (например, цеха, двигателей, шасси и т.п.), где сосредоточивается все оборудование, которое необходимо для полного изготовления сборочной единицы. Формирование участков по этому принципу производится в зависимости от конструктивного вида изделий, например, участок корпусных деталей, участок валов, и характеризуется использованием разнотипного основного оборудования. Основным преимуществом данного принципа является повышенная ответственность за выпуск качественной продукции, короткие материальные потоки и упрощается структура управления производством[5].

При значительной номенклатуре изготовляемых изделий эффективен технологический принцип формирования производственных подразделений, характеризующийся выполнением однотипных операций технологического процесса и использованием однотипного технологического оборудования. Применительно к созданию цехов этот принцип реализуется путем формирования специально механических и сборочных цехов, а участки создают в зависимости от вида выполняемой операции (например, участок токарный, фрезерный и т. п.). К преимуществам данного принципа можно отнести: более полная загрузка основного оборудования, единство системы управления для всех сборочных или механообрабатывающих работ, единый уровень требований к качеству выполнения операций и упрощение структуры управления на участке благодаря специализации работ.

Выбор принципа формирования участков и цехов оказывает большое влияние на синтез структуры производственной системы, т. е. обоснованное определение ее состава. При формировании структуры автоматизированных участков и цехов следует учитывать и ряд ограничений, например по виду обрабатываемого материала на участке, который накладывает определенные условия по сбору и переработке стружки, по совместимости основного оборудования и т.д [6].

Для выбора принципа формирования производственных подразделений можно использовать такой показатель, как степень кооперации, которую определяют исходя из среднего числа материальных связей между основным оборудованием:

$$x = \frac{\sum_{i=1}^{N} k_i}{N},$$

где k_i — число материальных связей, которыми *i-е* оборудование связано с остальным оборудованием; N — количество основного оборудования в структурном подразделении.

При определении числа материальных связей учитывают направление грузопотока между основным оборудованием. Дублирующие материальные связи учитываются однократно.

4. Расчет необходимого количества основного оборудования. При расчете количества технологического оборудования каждого типа на предметно-замкнутых участках серийного производства используется формула:

$$c_p = \frac{\sum_{i=1}^{n} t_{шт.кi} N_i}{\Phi_э \cdot 60},$$

где $t_{ш\text{-}кi}$ – штучно-калькуляционное время обработки i-го наименования заготовки; n – номенклатура изготавливаемых деталей на данном типе станка; N_i – объем выпуска i-ой детали; $\Phi_э$ – эффективный годовой фонд времени работы оборудования при двухсменной работе (3725 ч).

При расчете количества основного оборудования в мелкосерийном производстве можно вместо N_i подставляется приведенная программа выпуска изделий $N_{пр}$, а вместо $t_{ш\text{-}кi}$ берется $t_{ш\text{-}к}$ детали представителя [7, 8].

Вычисленное значение C_p округляют до ближайшего большего целого числа, получая при этом количество основного оборудования $C_{пр}$, принятое для выполнения данной операции.

5. Присвоение инвентарных номеров оборудования и распределение операций по оборудованию. После расчета необходимого количества оборудования необходимо каждой единице оборудования присвоить инвентарный номер, пример: 1, 2, 3 и т.д.

После этого максимально равномерно (исходя из станкоемкости обработки) распределяются операции изготовления деталей на каждую единицу оборудования таким образом, чтобы каждому инвентарному номеру оборудования соответствовали закрепленные номера изготавливаемых деталей.

Для равномерного распределения операций между станками с учетом времени их выполнения предлагается использование специальной программы «Efficient scheduling». Данная программа была разработана на кафедре «Технология машиностроения» МГТУ СТАНКИН для оперативно-календарного планирования на производстве, однако она также может быть применена для равномерного распределения операций между единицами оборудования с учетом времени их выполнения, т. е выравнивания коэффициентов загрузки станков на производственном участке. Предварительно для ввода данных в программу надо разбить самые продолжительные по времени операции на технологические модули, представляющие собой комплекты обрабатываемых поверхностей. При этом этим технологическим модулям также следует присвоить инвентарные номера.

В качестве исходных данных в программу вводится число станков и число операций (в программе используется термин модуль). Далее вводится время выполнения операций на каждом станке. Оно рассчитывается по формуле $T_{шт.к}$•N, где N – число изготавливаемых деталей на операции. Например, если операцию с $T_{шт.к}$ = 1,5 мин и объемом выпуска 50 000 деталей разбили на две операции по 25 000 деталей, то продолжительность каждой из этих двух операций составит 1,5•25 000 = 37 500 мин. Если какая-либо операция не может быть выполнена на данном станке, то соответствующее поле следует оставить пустым.

На следующем этапе необходимо ввести параметры расчета, определяющие работу алгоритма. Поля «число итераций» и «время расчета» определяют, как долго будет выполняться расчет.

В результате расчета программа выдает две таблицы. В первой из них указано распределение операций (модулей) между станками. В следующей таблице приводятся коэффициенты загрузки оборудования. Если все они меньше единицы, тот программа корректно распределила операции по станкам. Если нет – то программа не смогла при таких исходных данных найти правильное распределение. В этом случае, возможно, на расчет было выделено мало времени. Если увеличение времени расчета не исправило ситуацию, то надо изменить исходные данные – увеличить число станков.

6. Определение характеристик стеллажа. Основной расчетной характеристикой стеллажа является его вместимость, которая определяется исходя из числа производственной тары с полуфабрикатами, необходимой для полной загрузки станков во время работы производственного участка. Расчет производится исходя из среднестатистических величин станкоемкости изготовления деталей и их объема выпуска.

Расчет основных параметров складской системы начинают с выбора нормы запаса хранения m_i. Для производственных участков мелкосерийного производства она рекомендуется около 3 суток[3]. Зная норму запаса хранения в днях, определяют запас хранения соответствующей группы грузов (т) по формуле:

$$S_1 = \frac{Q_i m_i}{365},$$

где Q_i — годовое поступление груза соответствующего наименования (или приведенный грузопоток для группы полуфабрикатов), т/год.

Выбрав размеры производственной тары из стандартного ряда с учетом размеров накопителей у станков, приемных устройств транспортных средств и размеров ячеек в стеллажах, определяют величину транспортной партии с учетом компактного размещения в ней заготовок, а, следовательно, и количество ячеек на складе $P_я$. При размещении заготовок в таре следует учесть толщину схвата робота и минимальную величину разжима схвата.

Высоту яруса стеллажа можно определить, зная высоту тары, максимальную высоту груза *c* и зазор *e* между верхом лежащего на нем груза до низа опорной поверхности следующей по высоте тары с грузом, по формуле

$$c_я = c + \Delta + e.$$

Число ярусов рассчитывают по формуле:

$$z = \varepsilon\left\{\frac{H_x - h_н - h_в}{c_я}\right\} + 1,$$

где $h_н$ – высота над полом нижнего яруса; $h_в$ – расстояние от низа строительных конструкций покрытия здания до опорной поверхности верхнего яруса стеллажей или штабеля; H_x - высота цеха. Выражение ε {…} означает, что берется целая часть от расчетного числа. Число рядов в зоне хранения:

$$y = P_я/(p_ш z),$$

где $p_ш$ - количество тары по ширине ячейки (1).

Длину, занятую грузами в зоне хранения (рис. 1), рассчитывают по формуле

$$L_{ст} = yA = y\,(a + 2\lambda + \chi),$$

где *A* - длина ячейки стеллажа; *a* - длина грузовой единицы (размер вдоль зоны хранения); χ - толщина стоек стеллажей; $p_д$ - количество тары по длине ячейки каркасного стеллажа; λ - зазоры между грузовыми единицами или между грузовой единицей и стойкой стеллажа.

При определении площади зоны хранения учитывают ширину стеллажа (рис. 1), рассчитывают по формуле $B_{ст} == p_г\,(b + \lambda_1)$, где *b* — ширина грузовой складской единицы, т. е. размер, в направлении которого ее устанавливают вглубь стеллажа, м; λ_1= 0,05 ... 0,1 м — зазор между грузом и краем стеллажа или между грузами; $p_г$ — количество тары по глубине ячейки.

Исходя из длины стеллажа $L_{ст}$ определяют длину транспортного пути крана-штабелера $L_{с.}$ Ширину транспортного пути $B_{пр}$ определяют из технической характеристики крана-штабелера.

7. Определение числа транспортных средств. Количество транспортных средств определяют исходя из машиноемкости $T_{м.е}$ транспортных операций, которую рассчитывают по следующей формуле:

$$T_{м.е} = \frac{Z_{Ti} T_ц}{Z_{T.Пi}\,60}.$$

Здесь $T_ц$ – средняя длительность одного рейса или одного цикла работы транспортного средства, мин; z_{Ti} – грузопоток *i*-го наименования груза, ед. тары/год; $Z_{т.пi}$ – величина транспортной партии *i*-го наименования груза, ед. тары (1).

$$z_{Tl} = Q_i / C_i ,$$

где z_{Tl} – грузопоток, ед. тары, по определенной группе изделий; Q_i – грузопоток по определенной группе, т; C_i – средняя грузовместимость тары, т.

Длительность обслуживания заявки определяется типом транспортного средства, его скоростными характеристиками и протяженностью трассы. Для циклических транспортных средств длительность обслуживания (мин) при двухадресном режиме работы $T_ц = 2\ (t_р + t_т + 1{,}075t_v + t_{в.п}\ )$, где $t_р$ – время разгона транспортного средства, (0,1 мин); $t_т$ – время его торможения; t_v – время движения на маршевой скорости, мин; $t_{в.п}$ – время отработки цикла взять-поставить. Для расчета t_v используют средний путь движения на маршевой скорости, который равен 0,5 длины транспортной трассы, а скорость движения зависит от типа транспортного средства.

Количество транспортных средств определяют по формуле

$$N_{тр} = \frac{\sum_{i=1}^{n} T_{м.е} K_c}{Ф_э K_з},$$

где K_c = 1,2 ... 1,6 — коэффициент спроса, учитывающий неравномерность поступления заявок на обслуживание в единицу времени; $K_з$ = 0,7 ... 0,8 – коэффициент загрузки транспортного средства; $Ф_э$ – эффективный годовой фонд времени работы принятого типа транспортного средства; n – число грузопотоков, обслуживаемых данным типом транспорта.

На рис. 3 показан порядок нумерации позиций, на которых могут устанавливаться станки при размещении оборудования в два ряда и с раздельными входом и выходом.

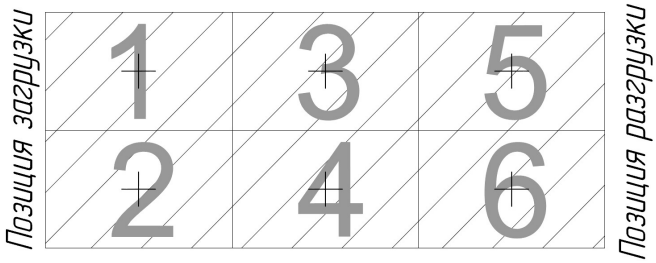


Рис. 3. Порядок нумерации позиций в производственном участке

8. Оптимальное размещение основного оборудования на производственном участке. Решение вопроса о размещении оборудования на производственных участках сложная логистическая задача, т.к. имеется множество различных технологических процессов изготовления изделий. Данная задача относится к классу задач комбинаторной оптимизации. Пусть на участке есть n рабочих установочных мест, где надо разместить n единиц оборудования.

Задача оптимизации расстановки оборудования относится к *NP*-полным задачам, при решении которых точными методами оптимизации время сходимости алгоритма экспоненциально увеличивается в зависимости от количества единиц размещаемых объектов. Число возможных вариантов планировки участка определяется количеством возможных перестановок оборудования. При проектировании участков часто приходится иметь дело с количеством станков на них $N>10$, где метод полного перебора применить невозможно, так как количество возможных вариантов $N!$ Поэтому для решения таких задач используют специальные методы оптимизации, сокращающие число переборов вариантов планировки. Естественно, что для применения подобных методов оптимизации необходимо использование компьютеров и специального программного обеспечения.

Наиболее перспективными видятся методы, основанные на достижениях в сфере комбинаторной оптимизации. Значимым преимуществом этих методов является сравнительно быстрое нахождение оптимального решения. При этом стоит учитывать, что решение задачи не является конечным, а находится за определенное, заранее установленное, количество итераций, постепенное увеличение количества которых, как правило, позволяет получать все более эффективные решения. В противном случае, система может достигнуть определенного состояния, после которого новые итерации не будут приводить к улучшению целевой функции. Доказательством успешности данных методов можно считать возросшее количество работ, посвященных какому-либо из комбинаторных методов. Например, метод муравья и более продвинутый - метод муравьиной колонии, рассмотренные в работах Вороненко В.П. и Соколовой Я. В.

Методика решения основана на использовании принципа генетических алгоритмов и тесно связана с применением искусственных интеллектуальных систем. Суть методов заключается в вариативном выборе случайных путей, наиболее эффективные из которых, по мере передвижения виртуальных муравьев по графам матрицы, моделирующей расположение оборудования, помечаются так называемым «феромоном», и после чего становятся более предпочтительными при возможности их повторного использования. Метод муравьиной колоний, соответственно, представляет из себя полиноминальный вариант решения задачи, при котором несколько муравьев размещаются в случайно определенных вершинах графа матрицы.

Общая целевая функция оптимального размещения оборудования может быть представлена в виде:

$$G_k = \sum_{i=1}^{n+2} \sum_{j=1}^{n+2} \sum_{d=1}^{n+2} \sum_{p=1}^{n+2} x_{id} x_{jp} a_{dp} c_{ij} \longrightarrow \min,$$

где G_k – суммарный грузопоток при варианте расстановки станков *k*, т/год; *n* – число станков и позиций установки; c_{ij} – «стоимость» передачи объектов от позицииі к позиции *j* (удельное расстояние между позициями i и j), м; a_{dp} – суммарный грузопоток при передаче деталей от станка d к станку р.

$$x_{id} = \begin{cases} 1, \text{ если } d\text{-й станок устанавливается на } i\text{-ую позицию;} \\ 0 \text{ в противном случае.} \end{cases}$$

$$y_{ij} = \begin{cases} 1, \text{ если деталь передается с } p\text{-го станка на } j\text{-й;} \\ 0 \text{ в противном случае.} \end{cases}$$

Таким образом, задача расстановки станков сводится к нахождению такого варианта расстановки *k*, при котором суммарная мощность грузопотока *G* будет минимальна.

Схема движения грузопотоков задается матрицей *A[i,j]*, где номер строки *i* – номер станка, от которого поступает полуфабрикат (поставщик), а номер столбца *j* – номер станка, к которому полуфабрикат (потребитель) движется. Значения матрицы соответствуют величинам грузопотоков.

Для расчёта целевой функции используется также матрица расстояний *C[i,j]*, такой же размерности, что и матрица грузопотоков, в ячейках которой записываются расстояния между позициями. Расстояние между станками по фронту и до проезда и ширина проезда определяются по соответствующим нормам. Матрица расстояний формируется в зависимости от выбранной схемы расположения оборудования и позиций загрузки и разгрузки деталей и заготовок. Станки в матрице грузопотоков ставятся в соответствии с выбранной последовательностью расстановки оборудования на позициях в матрице расстояний. При двухрядном расположении и разделении позиций загрузки и разгрузки матрицы будут иметь вид (рис. 4).

Пример матрицы грузопотоков A[i, j]

станки/позиции

	Т1	**Т2**	**Ф2**	**АТ1**	**С2**	**АТ2**	**разг**
загр	5,6	7,3		2,3			
Т1			5,6				2,3
Т2				7,3			
Ф2				5,6	2,3		
АТ1			2,3		5,6	7,3	
С2	2,3						5,6
АТ2							7,3

Пример матрицы расстояний C[i, j]

позиции

	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**разг**
загр	3	3	4	4	5	5	-
1	-	1	2	2	3	3	5
2	1	-	2	2	3	3	5
3	2	2	-	1	2	2	4
4	2	2	1	-	2	2	4
5	3	3	2	2	-	1	3
6	3	3	2	2	1	-	3

Рис. 4. Пример матрицы

Значение целевой функции *G* рассчитывается путем перемножения соответствующих ячеек матриц *A[i,j]* и C*[i,j]* и последующего их сложения.

Пример расчета значения целевой функции

$$G=5.6*3+7.3*3+2.3*4+5.6*2+2.3*5+7.3*2+5.6*1+2.3*2+2.3*1+5.6*2+7.3*2+$$
$$+2.3*3+5.6*3+7.3*3=169.1 \text{ тм/год.}$$

Минимальное значение величины G обеспечивает оптимальную расстановку оборудования на участке.

Для нахождения расстановки, которая позволяет достичь минимального значения мощности грузопотока, можно использовать программу «Ants for QAP 30», разработанную на кафедре «Технология машиностроения» МГТУ СТАНКИН. Данная программа решает эту комбинаторную задачу с применением муравьиных алгоритмов.

Рассмотрим интерфейс данной программы. При её запуске открывается окно «Main Form». Это окно представлено на рис. 5.

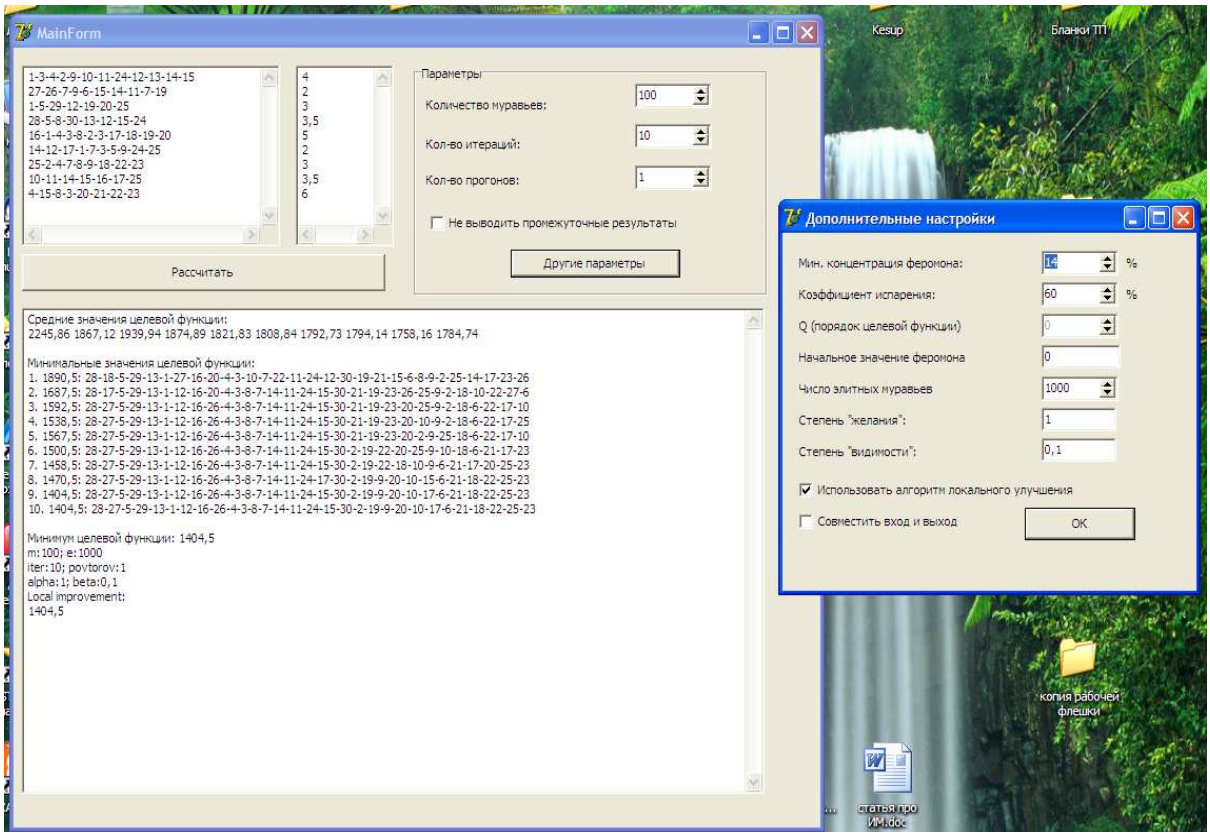


Рис. 5. Окно «Main Form»

При нажатии кнопки «Другие параметры» откроется окно «Дополнительные настройки».

В этом окне можно определить параметры самого алгоритма, правильный выбор этих параметров позволяет получить решение, очень близкое к точному. При этом нет особых рекомендаций, как надо определять данные параметры, их можно подбирать эмпирически. В программе уже введены некоторые значения этих параметров, рекомендуется не менять

их. Возможность их изменения предоставлена для исследования эффективности самих муравьиных алгоритмов. Также в этом окне можно определить, является ли вход и выход совмещенными или разделенными. Использование алгоритма локального улучшения увеличивает время расчета, но и увеличивает его точность. В окне «Main Form» в левом верхнем поле вводятся маршруты технологических процессов. В соседнем поле справа вводится масса заготовок, перемещающихся по соответствующим маршрутам технологических процессов. Здесь применяется допущение, что масса заготовки существенно не меняется в ходе технологического процесса. Поля «количество муравьев», «количество итераций», «количество прогонов» определяют время работы алгоритма. Их увеличение ведет к прямо пропорциональному увеличению времени работы алгоритма, но также увеличивается и качество расчета.

Кнопка «рассчитать» запускает расчет. Для вывода ответа надо убрать галочку с флажка «не выводить промежуточные результаты». Внизу находится большое поле, куда выводятся результаты расчета. Для каждой итерации выводится найденное значение целевой функции и маршрут, соответствующий этой целевой функции.

На рис. 6 представлен пример оптимальной схемы расположения станков на участке цеха.

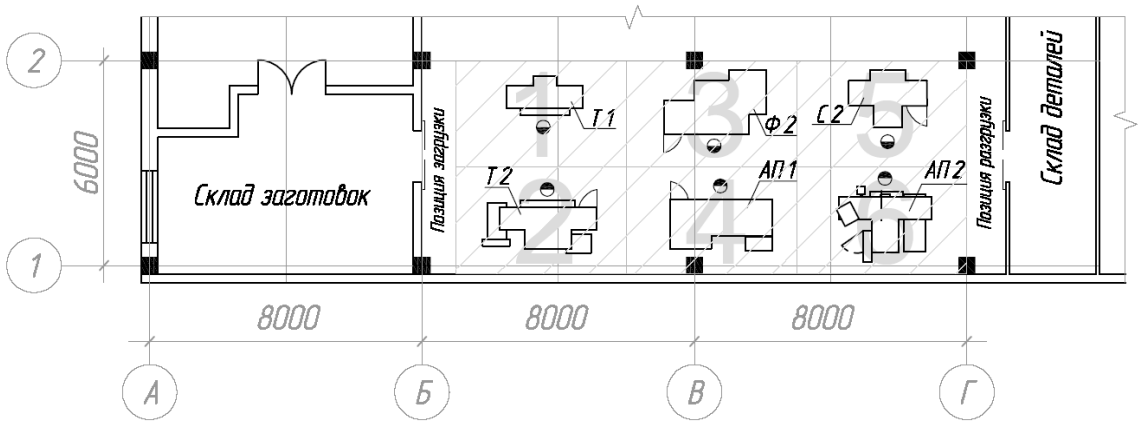


Рис. 6. Пример оптимальной схемы расположения станков на участке цеха

Изложенный выше подход к проектированию производственных систем предполагает использование некоторых аналитических зависимостей для проектирования машиностроительного производства, а также некоторых специальных программ, которые по сути просто реализуют некоторые алгоритмы комбинаторной оптимизации, в основе которых лежат простейшие арифметические и логические операции, пусть и в огромном количестве.

Список литературы

1. Вороненко В.П., Соломенцев Ю.М., Схиртладзе А.Г. Проектирование машиностроительного производства. М.: Дрофа, 2007. 380 с.

2. Мельников Г.Н., Вороненко В.П. Проектирование механосборочных цехов. М.: Машиностроение, 1990. 352 с.

3. Смехов А.А. Автоматизированные склады. М.: Машиностроение, 1979, 296 с.

4. Григорьев С.Н., Кутин А.А. Инновационное развитие высокотехнологичных машиностроительных производств на основе интегрированных АСТПП // Автоматизации и современные технологии, 2011. № 11. С. 23-29.

5. Егоров В.А. Транспортно-накопительные системы для ГПС. М.: Машиностроение, 1989. 293 с.

6. Волосова М.А. Исследование влияния комбинированной поверхностной обработки на физико-механические характеристики оксидной и нитридной режущей керамики // Вестник МГТУ «СТАНКИН», 2013. №2. С. 39 - 43.

7. Соколова Я.В. Проектирование оптимальной планировки при реконструкции и техническом перевооружении производства: научные труды II Международной научной конференции «Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении». Т. 2, 2012.

8. Вороненко В.П., Соколова Я.В. Алгоритм проектирования технологических планировок предметно-замкнутых участков механообрабатывающих цехов серийного производства // Вестник МГТУ «СТАНКИН». 2012. №1 (19).

Куцелап Кирилл Александрович, асп., kirill.kucelap@mail.ru, Россия, Москва, МГТУ "СТАНКИН",

Вороненко Владимир Павлович, д-р техн. наук, проф., vpvoronenko@yandex.ru, Россия, Москва, МГТУ "СТАНКИН",

Шалдов Александр Эдуардович, асп., shaldov_ae@mail.ru *Россия, Москва, МГТУ "СТАНКИН"*

EFFECTIVE DESIGN OF TRANSPORT AND WAREHOUSE SYSTEMS

K.A. Kucelap, V.P. Voronenko, A.Je. Shaldov

In this article the technique of designing of transporto-warehouse systems taking into account the solution of such tasks arising in the course of machine-building production as rational loading of the equipment and minimization of size of the cargo flow passing on transport system is considered. This technique is applicable in case of a linear arrangement of processing equipment and considers various questions of designing of machining production, from a question of combination of an entrance and an exit in production and determinations of characteristics of racks and before placement of the equipment in the shop.

Key words: arrangement equipment, heuristic algorithms, transport and warehouse system, principles of forming of production sites.

Kucelap Kirill Aleksandrovich, postgraduate, kirill.kucelap@mail.ru, Russia, Moscow, MSTU "STANKIN",

Voronenko Vladimir Pavlovich, doctor of technical science, professor, vpvoronenko@yandex.ru, Russia, Moscow, MSTU "STANKIN",

Shaldov Aleksandr Jeduardovich, postgraduate, shaldov_ae@mail.ru, Russia, Moscow, MSTU "STANKIN"

УДК 004.921

АЛГОРИТМ ДЕЛЕНИЯ ОБЪЕМНОЙ МОДЕЛИ НА СЛОИ ДЛЯ 3D ПЕЧАТИ

И.А. Гущин, А.Р. Авдеев, А.А. Швец, А.В. Дроботов

Рассмотрены математические и алгоритмические аспекты деления объемной модели изделия в формате STL на слои при её подготовке к печати на 3D принтере, ошибки, возникающие при этом и способы их устранения. Реализация описанных мер приводит к повышению качества обработки модели и производительности программного обеспечения.

Ключевые слова: технология объемной печати, метод послойного наплавления, STL формат, алгоритм расчета пересечений, заполнение модели, G-Code.

Технологии объемной печати перестали быть просто средством прототипирования и перешли в область промышленного производства. Все больше промышленных предприятий проводят инновационную политику, заменяя традиционные способы производства на аддитивные технологии [1, 2]. Так как 3D принтеры создают изделие по слоям, то программное обеспечение для подготовки работы принтера должно формировать слои изделия для печати на основе исходной объемной модели изделия, обычно передаваемого в формате *STL* [3]. *STL* файл представляет из себя список координат вершин треугольных граней (фасетов), образующих поверхность. Такой формат представления данных прост, но обладает рядом существенных недостатков: снижается точность геометрического представления модели, погрешность округления координат вершин фасетов приводит к несовпадению логически идентичных вершин различных фасетов, неупорядоченность следования фасетов в файле усложняет алгоритмы обработки. Все это приводит к ошибкам в процессе подготовки программы работы 3D принтера и снижению производительности программного обеспечения. Рассмотрим проблемы, вызванные данными факторами на различных стадиях подготовки программы работы устройства и способы их устранения.

Существует множество алгоритмов для нарезания модели изделия на слои, но все они построены по принципу поиска пересечений фасетов изделия с секущими плоскостями [0]. Основными шагами их работы являются: создание секущих плоскостей, определение векторов, образуемых пересечением секущей плоскости с моделью изделия (состоящей из фасетов) и генерация замкнутых контуров.

Для этого сперва создается множество плоскостей, параллельных плоскости OXY. Каждая плоскость имеет нормальный вектор $\vec{n}$ и отстоит от предыдущей на высоту слоя *T*. Расстояние от начальной плоскости *OXY* – $z_{\text{сп}} = n_i \cdot T$, где n_i – номер плоскости. Пересечение (рис. 1) каждой из этих плоскостей *2* с моделью изделия *1* и образует печатаемый слой *3*.

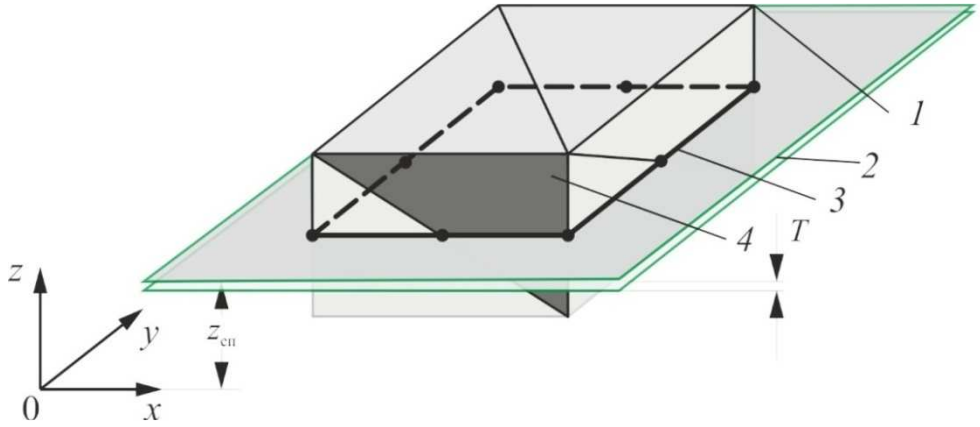


Рис. 1. Модель изделия, пересекаемая плоскостью

Возможные варианты пересечения фасетов, из которых состоит модель изделия, с секущей плоскостью можно разделить на четыре группы, показанные на рис. 2.

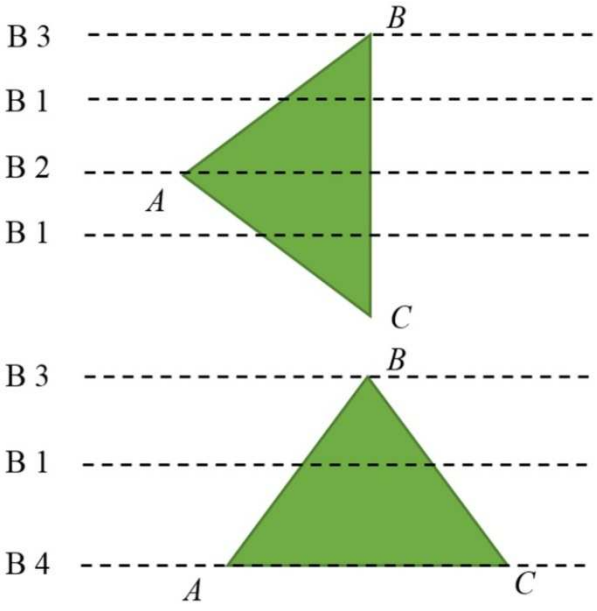


Рис. 2. Возможные варианты пересечения фасета ABC и секущей плоскости

Первый вариант (см. рис. 2, В 1) показывает случай пересечения фасета плоскостью по двум граням. Координаты z конечных точек $A(x_a, y_a, z_a)$, $B(x_b, y_b, z_b)$ и $C(x_c, y_c, z_c)$ сторон фасета должны удовлетворять выражению

$$\min(z_a, z_b, z_c) \le z_{\text{сп}} \le \max(z_a, z_b, z_c). \quad (1)$$

Второй вариант (см. рис. 2, В 2) также удовлетворяет выражению 1, но результатом пересечения являются три точки, две из которых одинаковы.

В третьем варианте (см. рис. 2, В 3) одна из вершин лежит на секущей плоскости. Во избежание ошибок с поиском соседних векторов, такие случаи сохраняются в матрицу как вектор нулевой длины.

Четвертый вариант (см. рис. 2, В 4) возможен, когда две вершины фасета лежат на секущей плоскости. Тогда вектор пересечения будет совпадать с гранью фасета [0].

Для определения границ вектора $\vec{l}$ пересечения фасета и секущей плоскости (см. рис. 1) определяют радиус-вектора $\vec{i}$ и $\vec{j}$ (рис. 3), проведенные к вершинам фасета из начала координат и рассчитывают расстояния d_i и d_j от каждой из вершин до плоскости по выражениям 2 и 3:

$$d_i = \vec{i} \cdot \vec{n} - z_{\text{сп}}. \quad (2)$$

$$d_j = \vec{j} \cdot \vec{n} - z_{\text{сп}}. \quad (3)$$

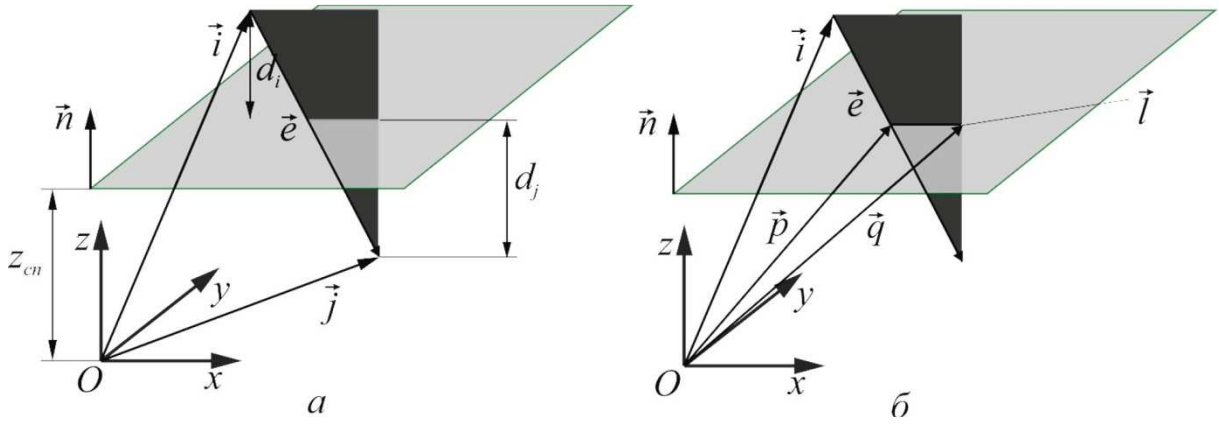


Рис. 3. Определение точек пересечения фасета плоскостью: а – фасет, пересеченный плоскостью; б – определение вектора $\vec{e}$ грани и радиус-вектора $\vec{p}$ пересечения грани с плоскостью

Вектор грани $\vec{e}$ может быть найден из выражения 4 как разность двух векторов вершин. Далее, пользуясь основными векторными выражениями, а также свойством подобия треугольников рассчитывают пересечения каждой из граней фасета с плоскостью по выражению 5 (см. рис. 3, *б*):

$$\vec{e} = \vec{j} - \vec{i} \quad (4)$$

$$\vec{p} = \vec{i} + \vec{e} \cdot \frac{d_i}{d_i - d_j} \quad (5)$$

Повторяя действия, описанные выше для всех трех граней, получают вектор пересечения $\vec{l}$ (6) на основе радиус-векторов $\vec{p}$ и $\vec{q}$, либо точку, если плоскость пересекает фасет только в одной вершине

$$\vec{l} = \vec{p} - \vec{q}\,. \quad (6)$$

Подобный алгоритм довольно прост и не требует каких-либо дополнительных вычислений. Основным недостатком такого способа является его невысокая скорость, т. к. для каждой секущей плоскости необходимо искать пересечения с каждым фасетом, число которых может быть значительным.

Одним из простых способов оптимизации описанного выше алгоритма является предварительное определение группы фасетов, пересекаемых плоскостью [0]. Для этого необходимо из всех фасетов найти только те, у которых одна из вершин находится ниже секущей плоскости, а другая - выше (рис. 4).



Рис. 4. Выделение отдельных фасетов для обработки

Следующим этапом процесса нарезания модели изделия на слои является генерация замкнутых контуров. Особенности экспортирования модели изделия из систем автоматизированного проектирования в формат STL и округление координат вершин фасетов в файле приводят к тому, что найденные на предыдущем этапе вектора $\vec{l}$ не образуют замкнутый контур. Этому мешает случайный порядок и направление векторов $\vec{l}$ в образованном контуре, несовпадение координат окончания одного вектора и начала другого.

Для устранения проблемы случайного порядка расположения и направления векторов $\vec{l}$ контура необходима их сортировка по следующему алгоритму: выбирается конец первого вектора $\vec{l}_i$ – $B_i(x_i, y_i)$, ищется ближайшая точка $A_j(x_j, y_j)$ другого вектора $\vec{l}_j$, независимо от того, является

ли эта точка началом или концом вектора $\vec{l}_j$. Вектор $\vec{l}_j$, имеющий ближайшую точку, становится смежным. Расстояние от конца B_i первого вектора $\vec{l}_i$ до ближайшей точки $A_j(x_j, y_j)$ смежного вектора $\vec{l}_j$ вычисляют по выражению

$$D = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}\,. \qquad (7)$$

Если ближайшая точка $A_j(x_j, y_j)$ является началом смежного вектора $\vec{l}_j$, то этот вектор $\vec{l}_j$ располагается в контуре вслед за предыдущим без изменения его направления. Если $A_j(x_j, y_j)$ – окончание вектора $\vec{l}_j$, то у вектора $\vec{l}_j$ меняют направление (т.е. меняют местами точки начала и конца вектора).

После сортировки необходимо отыскать векторы третьей группы (см. рис. 2, вариант 3), полученные при прохождении секущей плоскости через вершину фасета и имеющие нулевую длину. Такие векторы исключают, независимо от того, лежат ли они на концах или началах соседних векторов.

Данные операции устраняют топологические и геометрические ошибки, но смежные векторы по-прежнему не соединены, следовательно, контур открыт. Поэтому следующим этапом является построение закрытого контура из векторов. Для этого относительно вектора, конечная точка которого «открыта» (не соединена с другим вектором) – открытого вектора – выполняют следующие действия:

1) измеряют расстояние D_1 между окончанием открытого вектора и началами других векторов, берут минимальное расстояние D_1 и соответствующий смежный вектор;

2) измеряют расстояние D_2 между окончанием открытого вектора и началом первого вектора контура.

3) если $D_1 < D_2$, то создают вектор между окончанием открытого вектора и началом смежного вектора. В противном случае создают вектор между окончанием открытого вектора и началом первого вектора контура.

Рассмотренные способы устранения проблем при нарезании объемной модели изделия в процессе создания программы работы 3D принтера позволяют устранить ряд ошибок, возникающих при этом, повысить производительность соответствующего программного обеспечения и качество генерируемой программы.

Список литературы

1. Дроботов А.В., Авдеев А.Р., Швец А.А. Анализ способов повышения производительности устройств объёмной печати для изготовления сборочных изделий // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2015. № 11. С. 3-6.

2. FDM Technology. About Fused Deposition Modeling [Электронный ресурс] / Stratasys Ltd. 2014. Режим доступа: http://www.stratasys.com/3d-printers/technologies/fdm-technology (дата обращения: 16.03.2016).

3. Принципы создания программы работы устройства объёмной печати по трёхмерной модели / И.А. Гущин, А.Р. Авдеев, А.А. Швец, А.В. Дроботов // Известия ВолгГТУ. Сер. Прогрессивные технологии в машиностроении. Волгоград. 2015. № 11 (173). С. 50-53.

4. Slicing Triangle Meshes: An Asymptotically Optimal Algorithm [Электронный ресурс] / DAINF - UTFPR. 2014. Режим доступа: http://www.dainf.ct.utfpr.edu.br/murilo/public/slicing.pdf (дата обращения: 16.03.2016).

5. Computational Geometry: Algorithms and Applications / M. D. Berg [et al.]. 3rd ed. Santa Clara, CA, USA: Springer-Verlag TELOS. 2008. 386 p.

6. An Enhanced Slicing Algorithm Using Nearest Distance Analysis for Layer Manufacturing / M. Vatani [et al.] // International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering. 2009. Vol. 3, No. 1. P. 74-79.

Гущин Илья Александрович, студент, frylock3434@gmail.com, Россия, Волгоград, Волгоградский государственный технический университет,

Авдеев Артем Романович, асп., avdartrom@gmail.com, Россия, Волгоград, Волгоградский государственный технический университет,

Швец Андрей Александрович, асп., shvetsandrew@gmail.com, Россия, Волгоград, Волгоградский государственный технический университет,

Дроботов Алексей Владимирович, канд. техн. наук, доц., alexey.drobotov@gmail.com, Россия, Волгоград, Волгоградский государственный технический университет

DIVIDING MODEL TO LAYERS FOR 3D PRINTING ALGORITHM

I.A. Gushchin, A.R. Avdeev, A.A. Shvets, A.V. Drobotov

Mathematical and algorithmic aspects of dividing the 3D product model in STL format to layers in order to print on 3D printer, errors and how to resolve them are considered. Implementation of the described points, could lead to an increase in software productivity.

Key words: 3D printing technology, Fused Deposition Modeling (FDM), STL file, intersections finding algorithm, infill, G-Code.

Gushchin Ilya Alexandrovich, student, frylock3434@gmail.com, Russia, Volgograd, Volgograd State Technical University,

Avdeev Artem Romanovich, postgraduete, avdartrom@gmail.com, Russia, Volgograd, Volgograd State Technical University,

Shvets Adrew Alexandrovich, postgraduete, shvetsandrew@gmail.com, Russia, Volgograd, Volgograd State Technical University,

Drobotov Alexey Vladimirovich, candidate of technical science, docent, alexey.drobotov@gmail.com, Russia, Volgograd, Volgograd State Technical University

УДК 681.31:621.95(075)

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ИНСТРУМЕНТА НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА РАСТАЧИВАНИЯ ГИЛЬЗЫ ГИДРОЦИЛИНДРА

А.Ю. Горелова, М.Г. Кристаль

Основная причина возникновения погрешностей при обработке глубоких отверстий, это отклонение от прямолинейности оси отверстия заготовки, проявляющееся в виде технологической наследственности для операции глубокого растачивания. Движении инструмента по криволинейной траектории приводит к возникновению его колебаний, и, как следствие, к огранке отверстия. В статье описана методика проектирования расточного инструмента, позволяющая на основе результатов математического и численного моделирования процесса растачивания учитывать отклонение от прямолинейности заготовки и уменьшить величину огранки отверстия. Предложена конструктивная схема усовершенствованного инструмента, описан процесс моделирования и достигнутые результаты.

Ключевые слова: растачивание глубоких отверстий, технологическая наследственность, вибрации инструмента

Гидроцилиндры широко используют в качестве приводов грузоподъемных машин и механизированных шахтных крепей. От точности обработки гильз гидроцилиндров зависят эксплуатационные характеристики указанного оборудования. При соотношении длины гильзы к ее диаметру превышающем 10, их относят к изделиям с глубокими отверстиями и их обработку производят на специализированных расточных станках инструментом, состоящим из борштанги и расточной головки с фиксированным двухрезцовым блоком и направляющими колодками, которые имеют прямоугольное основание, в поперечном сечении их профиль выполнен с галтелью, радиус которой равен требуемому радиусу отверстия, в продольном сечении колодки выполнены призматичекими. В расточной головке

установлен виброгаситель, в состав которого входят подвижные в осевом направлении опоры, контактирующие с направляющими колодками и подпружиненные пакетом тарельчатых пружин. Растачивание производят невращающимся инструментом, совершающим подачу вглубь вращающейся заготовки, установленной в роликовых люнетах и вертлюге. При этом чередуют растачивание на растяжение и сжатие по проходам. Заготовкой для операции растачивания гильзы гидроцилиндра является труба, с подготовленным отверстием для захода инструмента и люнетными шейками. Обработка указанных элементов сопровождается образованием следующих погрешностей: увод и отклонение от круглости заходного отверстия, биение люнетных шеек. Далее в процессе растачивания глубокого отверстия происходит отклонение положения оси инструмента от заданного, проявляющееся как технологическая наследственность от предшествующей обработки заходного отверстия и люнетных шеек. Это сопровождается возникновением разницы глубин и радиальных сил резания для каждого резца, которые определяют силы, действующие на направляющие колодки, что приводит к деформации пакета пружин, чем обуславливается скачкообразное изменение момента сил, действующего в центре масс расточной головки [1]. Это приводит к поперечным колебаниям расточной головки и резонансу, при совпадении частоты собственных колебаний с частотой одной из гармоник вынужденных колебаний. Несмотря на то, что некоторые авторы [2, 3] относят описанные колебания к автоколебаниям или параметрическим колебания инструмента, мы считаем необходимым дополнительно их исследовать, так как амплитуда и частота этих колебаний определяют огранку отверстия.

Уменьшение величины указанных отклонений для достижения требуемой точности обработки гильз гидроцилиндров возможно за счет совершенствования конструкции расточного инструмента посредством учета влияния технологической наследственности на точность растачиваемого отверстия. Здесь и далее под технологической наследственностью следует понимать отклонение оси инструмента, проявляющееся как технологическая наследственность при обработке заготовки, имеющей отклонение оси от прямолинейности.

Анализ известных методов повышения точности обработки глубоких отверстий. Исследованиям в области динамики процесса растачивания и формообразования, в частности, влиянию динамических характеристик технологической системы на амплитуду ее колебаний посвящены работы известных ученых [4, 5]. Указанными авторами предложена методика выбора технологических параметров и режимов обработки по результатам диагностики состояния узлов технологической системы (рис.1). Однако, полученные указанными авторами результаты не позволяют оценить точность детали на стадии разработки технологического процесса с учетом технологической наследственности и параметров обработки.

Известны математические модели, позволяющие оценить погрешность обработки глубокого отверстия с учетом технологической наследственности [7, 8] и минимизировать их посредством рациональной расстановки люнетов и выбора параметров обработки. Однако, только технологические приемы не позволяют контролировать колебания расточной головки, которые являются причиной огранки.

Моделирование процесса растачивания с твердотельной 3*D* моделью инструмента позволяет оценить его динамические характеристики для уточнения параметров обработки на этапе разработки технологического процесса и средств его обеспечения, однако для большей достоверности результатов моделирования необходимо учесть влияние технологической наследственности на динамику процесса растачивания.

В результате проведенного анализа известных методов повышения точности обработки глубоких отверстий, согласно предложенной авторами классификации (см. рис.1) установлено, что для компенсации погрешностей заготовки необходимо оптимизировать конструкцию инструмента посредством численного моделирования процесса растачивания на основе математического моделирования с учетом технологической наследственности.



Рис. 1. Классификация методов повышения точности растачивания глубоких отверстий

Математическая модель процесса растачивания. На рис. 2. приведена расчетная схема процесса растачивания глубокого отверстия. Для построения модели процесса растачивания введено допущение о точечном контакте каждой колодки с поверхностью заготовки, и о распределении величины отклонения оси Δ от прямолиней-ности по закону синуса.

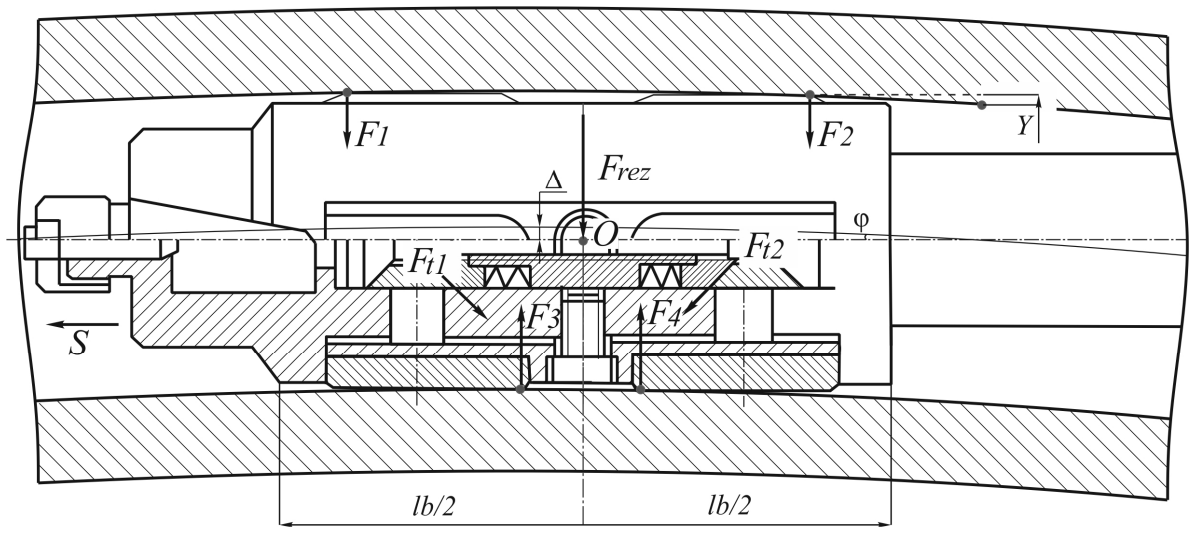


Рис. 2. Расчетная схема процесса растачивания глубокого отверстия

Предложена математическая модель процесса обработки глубокого отверстия расточной головкой с задним относительно резца расположением призматических направляющих колодок с учетом величины Δ отклонения от прямолинейности оси отверстия заготовки в виде

$$\begin{cases} J\ddot{\varphi} + M(F_{rez}) - M_{tr} = M_{pz}(\varphi) + M_{py}(\theta); \\ F + P_y + P_z - F_{tr} = 0, \end{cases} \quad (1)$$

$$F_{rez} = (F_1 + F_2 - F_3 - F_4), \quad (2)$$

$$Y = -\Delta t \sin(\omega t + \beta) \pm \sqrt{R^2 - \Delta t^2 \cos^2(\omega t + \beta)} - R, \quad (3)$$

$$\Delta t = \Delta_0 + \Delta \cdot \cos(\frac{\pi}{L} St \pm lb/2), \quad (4)$$

где J - момент инерции расточной головки относительно точки O, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$ (см. рис. 2); φ - угол наклона расточной головки, рад; F_{rez} - результирующая сила реакции направляющих колодок, Н; $M(F_{rez})$ - момент результирующей сил реакции, каждой из четырех (2) направляющих колодок относительно центра масс O, $\text{Н} \cdot \text{м}$; M_{tr} - момент сил трения, который зависит от разности сил пакетов пружин, в составе виброгасителя инструмента $(F_{tr} = F_{t1} - F_{t2})$ возникающей при различном поджатии колодок Y (2), $\text{Н} \cdot \text{м}$. $M_{pz}(\varphi)$ - момент результирующей составляющей силы резания P_z,

Н · м . $M_{py}(\theta)$ - момент результирующей составляющей силы резания P_y, Н · м; $\theta = \omega t$ - текущее угловое положение заготовки; β - радиальное положение колодки, рад; F_{tr} - силы трения направляющих, Н; Δt (3) - увод оси отверстия в плоскости колодки, мм; Δ - отклонение от прямолинейности оси заготовки на участке L; Δ_0 - начальное для каждой колодки смещение, мм; S - подача, мм/мин; t - время обработки, с; lb - положение точки контакта колодки с поверхностью заготовки относительно центра масс O, мм; R - радиус кривизны участка заготовки.

В результате математического моделирования установлено, что призматическая форма направляющих колодок приводит к скачкообразному изменению момента сил их реакции (рис. 3). При разложении этого сигнала в ряд Фурье, обнаруживаются гармоники, которые вызывают резонанс с частотой вращения заготовки. Более высокие гармоники могут входить в резонанс с частотами вращения детали.

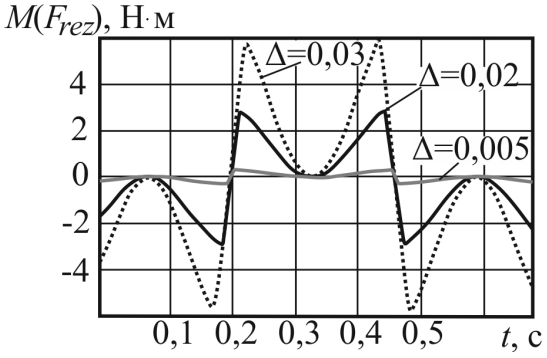


Рис. 3. Изменение величины $M(F_{rez})$ ***за один оборот заготовки***

Предложена конструктивная схема расточной головки, которая состоит из корпуса *1* (рис. 4), в передней части которого выполнено окно *2* для размещения расточного блока, а на наружной поверхности выполнены пазы для размещения направляющих колодок *3*.

Направляющие колодки *3* имеют прямоугольное плоское основание и верхние кромки выполненные с галтелями, причем радиус галтели в поперечном сечении равен требуемому радиусу обработанного отверстия, а радиус r галтели в продольном сечении определен, исходя из и по соотношению

$$r < \frac{60 \cdot l^2}{\Delta}, \qquad (5)$$

где Δ - отклонение от прямолинейности оси исходного отверстия обрабатываемой заготовки; l - длина основания направляющей колодки.

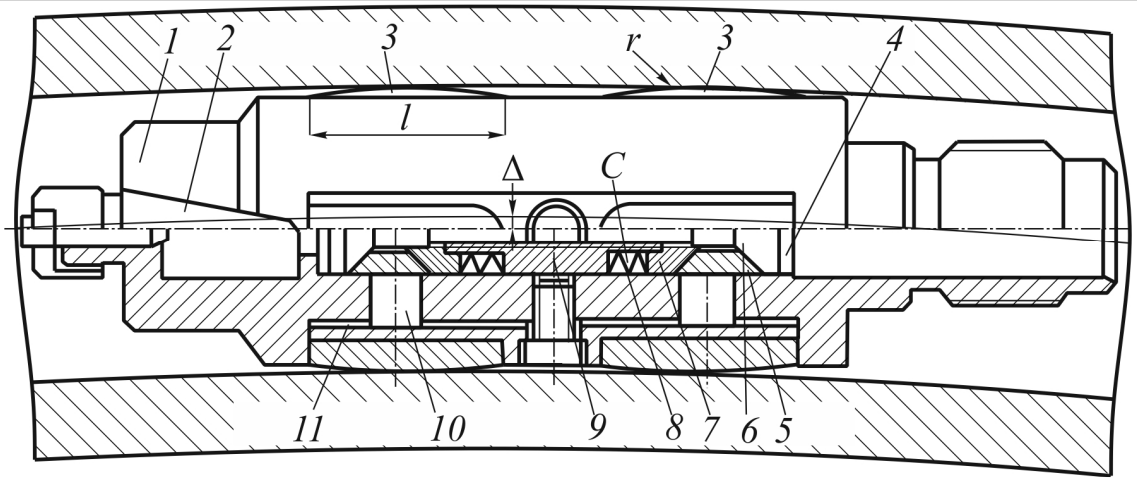


Рис. 4. Конструктивная схема расточной головки, оснащенной направляющими колодками с галтелью

По оси корпуса *1* выполнено отверстие *4*, в котором установлен виброгаситель, состоящий из сегментов *5*, которые одним концом опираются на коническую поверхность головки винта *6*, а другим концом опираются на коническую поверхность кольца *7* подвижного в осевом направлении и подпружиненного тарельчатыми пружинами *8*. Винты *6* резьбовой частью ввинчены в резьбовое отверстие, выполненное по оси упорной втулки *9*, и служат для регулировки жесткости тарельчатых пружин *8*. Направляющие шпонки *3* установлены в пазах корпуса *1* на радиально-подвижных опорах *10*, выполненных в виде цилиндрических стержней с плоскими торцами и установленных в радиальные отверстия корпуса *1*. Длина опор *10* выполнена с таким расчетом, чтобы между дном паза и опорной поверхностью направляющих шпонок *3* был гарантированный зазор *11*, размер которого не менее величины необходимого радиального перемещения направляющих шпонок *3*.

Так как исходное отверстие имеет отклонение оси от прямолинейности, погрешность обработки люнетных шеек, погрешность обработки заходного участка, то продольная ось расточной головки уже имеет некоторое отклонение относительно заданного положения. Поэтому точка контакта каждой из направляющих колодок *3* различна и перемещается по радиусу направляющей колодки *3* по мере вращения заготовки и движения по непрямолинейному участку. Следовательно, каждая из направляющих колодок *3* имеет свое перемещение в рамках зазора *11*, в зависимости от положения текущей точки контакта, которое преобразуется в величину деформации тарельчатых пружин *8* посредством радиально подвижных опор *10* через соответствующие сегменты *5*, перемещая при этом кольца *7*. При этом передние четыре направляющие колодки *3* создают деформацию одного пакета тарельчатых пружин *8*, а задние четыре – другого пакета пружин. В центре масс расточной головки возникает результирующий момент

сил жесткости двух пакетов, который благодаря исполнению верхней кромки направляющих колодок *3* с галтелью изменяется плавно, без скачков, что исключает возникновение резонанса с вынужденной частотой. Это препятствует нарастанию амплитуды поперечных колебаний и возникновению огранки, что позволяет повысить точность обработки глубокого отверстия.

Параметры расточной головки *r, l, C* определяют значение амплитуды А поперечных колебаний расточной головки при определенной величине отклонения Δ от прямолинейности оси отверстия (рис. 5).

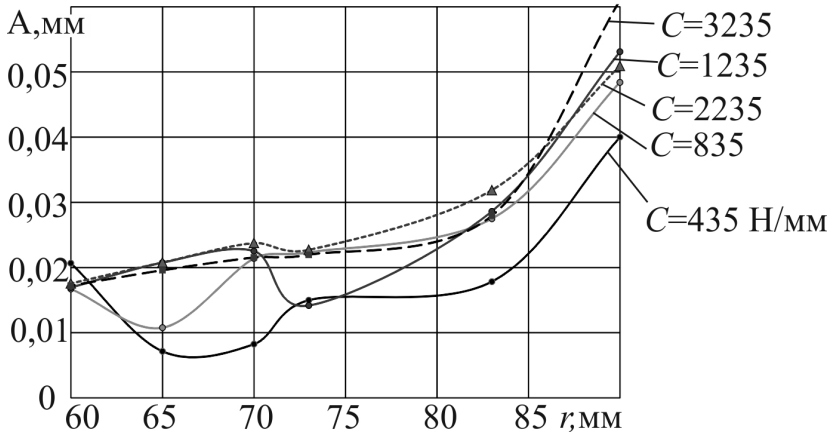


Рис. 5. Амплитуда А поперечных колебаний расточной головки при изменении радиуса r галтели и жесткости С колодок при $\Delta = 0{,}0015$ ***мм***

Для определение амплитуд и частот колебаний предложенного расточного инструмента при обработке заготовки, обладающей отклонением от прямолинейности проведено численное моделирование в программном комплексе SolidWorks. Твердотельная модель растачиваемой трубы, обладает отклонением от прямолинейности $\Delta \in [0...2{,}5]$ мм, остальные параметры, включая массу и габаритные значения полностью повторяют требования конструкторской документации.

Численное моделирование процесса растачивания предложенным инструментом. Базирование трубы обеспечивают наложенные на модель ограничения по перемещениям. Растачивание производят предложенным расточным инструментом, модель которого содержит борштангу, корпус, направляющие колодки с жесткостью, варьируемой $C \in [435...3235]$ Н/мм. Радиус галтели r варьируют в диапазоне $r \in [60...90]$ мм. Люнеты борштанги заменены ограничениями, наложенными на модель. Остальные технологические параметры соответствуют технологическому процессу производства гильзы гидроцилиндра телескопирования.

На модель наложены, рассчитанные в результате математического моделирования силы: составляющие сил резания, P_z, P_y, для каждой колодки $F_i(t)$, При моделировании регистрировались колебания в двух взаимно перпендикулярных плоскостях контрольной точки (рис. 6) за время *t*, которая находится на вершине резца. Полученный график экспортируется для дальнейшего анализа в Excel, где определяют амплитуды *a*, *b* и частоту ω_p колебаний и по известной формуле [9] рассчитывают величину огранки отверстия.

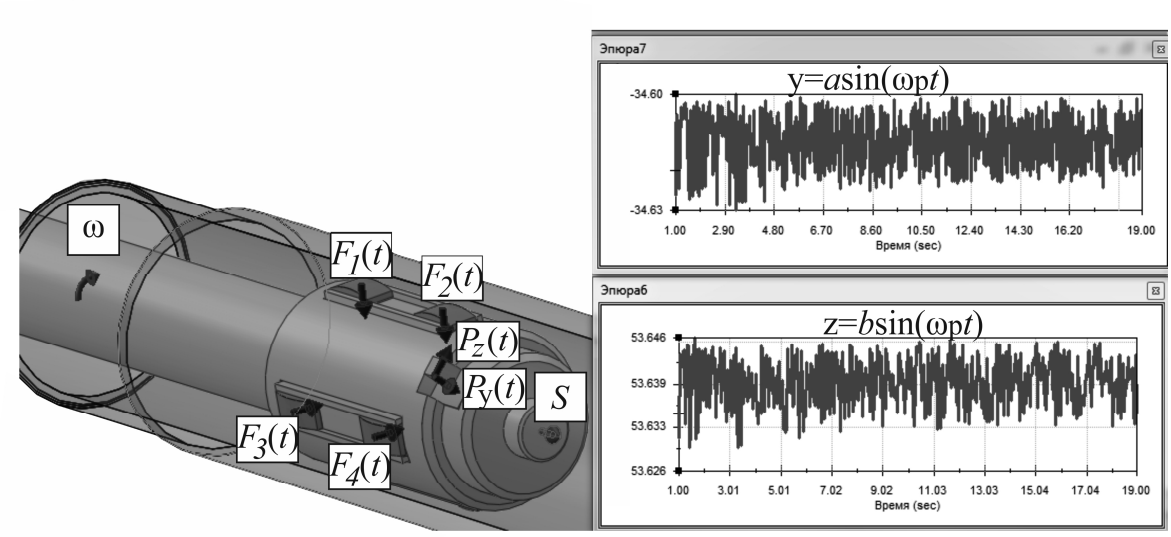


Рис. 6. Постановка задачи компьютерного моделирования

В результате моделирования установлено, что значения огранки ΔD при растачивании с предложенными колодками в 2,6 раза меньше по сравнению с растачиванием с призматическими колодками (рис. 7, 8). Установлены соотношения жесткости *C* и радиуса *r* колодок, позволяющие достичь наименьшие значения огранки при заданных параметрах обработки.

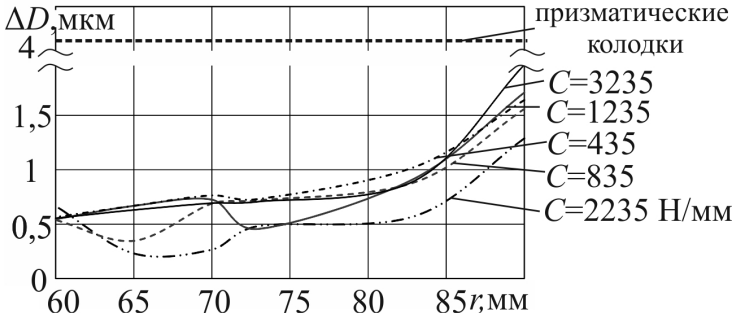


Рис. 7. Зависимость величины огранки отверстия ΔD от радиуса галтели направляющей колодки

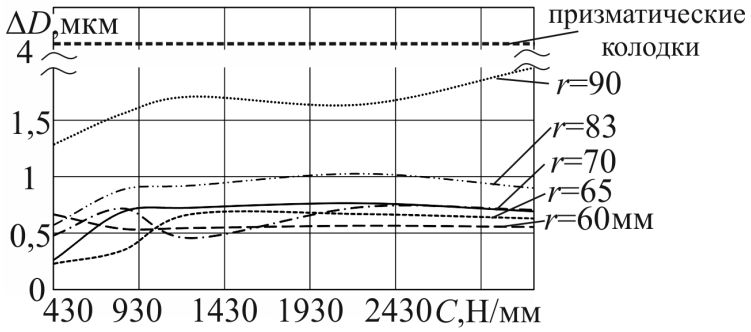


Рис. 8. Зависимость величины огранки отверстия ΔD от жесткости С направляющих колодок

Выводы и результаты. В результате анализа литературных источников, согласно предложенной классификации, установлено, что для повышения точности обработки глубокого отверстия гильзы гидроцилиндра необходимо учитывать отклонение от прямолинейности оси заготовки на стадии проектирования расточного инструмента. Для этого целесообразно использовать компьютерное моделирование процесса растачивания заготовки, обладающей идентичными реальной заготовке отклонениями, дополненное результатами математического моделирования, что позволит оценить погрешности будущей детали на этапе проектирования и уточнить параметры инструмента.

Предложена математическая модель процесса растачивания глубокого отверстия гильзы гидроцилиндра, учитывающая отклонение Δ от прямолинейности оси заготовки, на основе которой установлена форма направляющих колодок, которая позволяет снизить амплитуду поперечных колебаний инструмента.

Приведена конструктивная схема расточной головки, оснащенной направляющими колодками в галтелью, рекомендованным радиусом $r < \frac{60 \cdot l^2}{\Delta}$, где Δ - отклонения от прямолинейности оси исходного отверстия обрабатываемой заготовки; l - длины основания направляющей колодки.

Предложена методика численного моделирования процесса растачивания глубокого отверстия гильзы гидроцилиндра, основанная на результатах вычислений сил, действующих на колодки и сил резания по предложенной математической модели, на основе которой определены радиус галтели r, жесткость C, длина l направляющих колодок, обеспечивающих снижение огранки.

Для заготовки гильзы гидроцилиндра длиной L=7000 мм, максимальным отклонением от прямолинейности оси $\Delta = 0{,}002$ мм, получено значение радиуса r=65 и жесткости C=835 Н/мм, обеспечивающих уменьшение огранки в 2,6 раза по сравнению с призматическими колодками.

Список литературы

1. Горелова А.Ю., Кристаль М.Г., Попов А.И. Динамическая стабилизация положения инструмента при обработке глубоких отверстий для сборки // Technologia i Automatyzacja Montazu. 2016. P. 28-33.

2. Munoa J., Beudaert X., Domdovari Z. Chatter suppression techiques in metal cutting // Manufacturing Technology. 2016. P. 785-808.

3. Do Hun C., Moon Chul Y., Sung Bo S. Roundness modeling in BTA deep hole drilling // Precision Engineering. 2005. P. 176-188.

4. Isaev A.V., Kozochkin M.P. Use of a measurement information system to increase the precision with thin-walled parts are machined on numerically controlled milling machines // Measurement Techniques. 2014. P. 1155-1161.

5. Kozochkin M.P., Sabirov F.S., Suslov D.N., Abramov A.P. Vibroacoustic Diagnostics of Spindle Bearings in High-Speed Machine Tools // Russian Engineering Research. 2010. P. 944-947.

6. Козочкин М.П., Кочинев Н.А., Сабиров Ф.С. Диагностика и мониторинг сложных технологических процессов с помощью измерения виброакустических сигналов // Измерительная техника. №7. 2006. С. 30-34.

7. Шендеров И.Б. Управление качеством при растачивании глубоких отверстий в интерактивном технологическом процессе изготовления трубных заготовок // Вестник ИжГТУ. № 1. 2012. С. 30-33.

8. Ушаков А.И. Динамические процессы при обработке глубоких отверстий: дис. канд. техн. наук. М., 1974. 177 с.

9.Уткин Н.Ф., Кижняев Ю.Н., Плужников С.К. Обработка глубоких отверстий. Л.: Машиностроение, 1988. 269 с.

Горелова Ася Юрьевна, асп., forasyoo@gmail.com, Россия, Волгоград, Волгоградский государственный технический университет,

Кристаль Марк Григорьевич, д-р техн. наук, проф. crysmar@mail.ru, Россия, Волгоград, Волгоградский технический университет

IMPROVING THE BORING TOOL'S DESIGN BASED ON CYLINDER'S BUSHING MACHINING PROCESS MODELING

A.Y. Gorelova M. G. Kristal

The main cause of deviations appearing in the deep holes machining is the workpiece's axis deviation from linearity, which reveal itself in the form of the technological heredity for deep boring operations. Tool movement along a curved path leads to it's transverse vibration, what leads to hole's faceting. Paper contains the description of boring tool's design technique, which based of mathematical and numerical modeling of boring process to take into account the workpiece's deviation to reduce the hole's faceting. The new design of improved tool's and modeling process results are given.

Key words: deep holes trepanning, technological heredity, tool's vibrations.

Gorelova Asya Yorievna, postgraduate, forasyoo@gmail.com , Russia, Volgograd, Volgograd State Technical University,

Kristal Mark Grigorievich, doctor of technical science, professor, crysmar@mail.ru Russia, Volgograd, Volgograd State Technical University

УДК 621.86

СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ МЕХАНОСБОРОЧНЫХ ЦЕХОВ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

А.Н. Шафорост

Представлен метод разработки компоновочно-планировочных решений транспортных систем механосборочных цехов машиностроительных предприятий на стадии проектирования на основе принципов структурного синтеза технических решений и применения интеллектуальных систем их информационной поддержки.

Ключевые слова: транспортная система механосборочного цеха, структурно-параметрический синтез, генетический алгоритм, приведенные затраты, имитационное моделирование.

Одним из направлений реформирования отечественной экономики является развитие промышленной отрасли, предполагающее непрерывное создание новых и реконструкцию существующих машиностроительных предприятий. Это обусловливает необходимость постоянного выполнения проектных работ по расчету реконструируемых механосборочных и вспомогательных цехов и участков машиностроительных предприятий, а также малых предприятий механосборочного профиля, мало отличающихся от них по своей организационной структуре.

Цехи и участки машиностроительных предприятий представляют собой достаточно сложные системы, структуры и деятельность которых непосредственно зависят от сложности и разнообразия выпускаемой продукции, характера производственного процесса ее изготовления и объема

производства. Структура производственного участка определяется составом технологического оборудования, его количеством и материальной связью между единицами оборудования, обеспечивающейся развитой транспортной системой предприятия, являющейся неотъемлемой частью производственного процесса и его основным организующим и связующим звеном [1, 2].

Поэтому механизация производственного процесса изготовления машиностроительной продукции и повышение его производительности и эффективности достигаются на основе формирования оптимальной структуры транспортной системы (ТС) из транспортных средств, наиболее полно соответствующих характеру производственного процесса машиностроительного предприятия.

Структура производственных участков и цехов машиностроительных предприятий определяется составом технологического оборудования, его количеством и материальной связью между единицами оборудования, обеспечивающейся транспортной системой предприятия, являющейся неотъемлемой частью производственного процесса и его основным организующим и связующим звеном и оказывающей непосредственное влияние на длительность производственного цикла. Транспортная система должна своевременно и в требуемой последовательности обеспечить выполнение всех запросов технологического оборудования, накопителей и склада в необходимых заготовках, полуфабрикатах и готовых изделиях. Поэтому при формировании количественной и качественной структуры парка машин и агрегатов транспортной системы механосборочных и вспомогательных цехов и участков машиностроительных предприятий необходимо обеспечить взаимную увязку работы ТС и технологического оборудования [3,4].

Процесс проектирования компоновочно-планировочных решений транспортных систем предполагает решение трех задач: анализа, синтеза, оценки и принятия решений. В процессе анализа устанавливают значения конструктивно-технологических и технико-экономических критериев, которые позволяют сравнить проектные варианты между собой. Синтез заключается в генерировании возможных альтернативных вариантов ТС. Оценка и принятие решений заключаются в общей оценке эффективности вариантов на основе их анализа и в их окончательном выборе.

Для решения задачи синтеза альтернативных вариантов ТС на ранних стадиях процесса проектирования цеха или участка машиностроительного предприятия произведен анализ, позволивший выявить взаимосвязь габаритов транспортно-складских средств с пространством цехов машиностроительных предприятий; основные компоновочно-планировочные решения применяемого транспортного оборудования; типы перемещаемого груза, тары и приспособлений, используемых при транспортировке и хранении грузов; количественную и качественную характеристику транспортного оборудования.

В результате определены требования к производительности и количеству транспортных средств, требования к конструкции зданий и цехов машиностроительных предприятий, сформирована классификационная таблица ТС, включающая 16 признаков: тип производства; вид маршрута движения; способ перемещения грузов; принцип движения; конструктивное исполнение транспортного средства; способ управления; способ загрузки технологического оборудования; подтип транспортных средств – тележек, кранов, оборудования подвесного однорельсового транспорта, транспортеров и конвейеров, погрузчиков, транспортных роботов, подъемников; устройства для межоперационного транспортирования.

Синтез альтернативных вариантов транспортной системы предложено производить с использованием аппарата генетических алгоритмов. Вершинами N-дольного графа, описывающего альтернативные варианты транспортной системы, служат значения разработанной классификационной таблицы. Исходными данными при структурно-параметрическом синтезе транспортной системы являются величины грузопотоков, планировки основного технологического оборудования, тип груза, размеры транспортных партий и др.

Работа генетического алгоритма при формировании количественной и качественной структуры парка машин и агрегатов транспортной системы выглядит следующим образом. Первоначально генетический алгоритм случайным образом генерирует начальный вариант ТС. Далее до момента формирования оптимального варианта ТС осуществляется итерационный процесс, в ходе которого для каждой итерации генетическим алгоритмом реализуются отбор вариантов в группу модификации пропорционально его результирующему показателю, одноточечный оператор кроссинговера и оператор мутации. Каждому варианту назначается вероятность $P_S(i)$, равная отношению его результирующего показателя к суммарному результирующему показателю группы модификации.

После этого происходит отбор вариантов ТС в группу модификации. Простейший пропорциональный отбор (рулетка) - отбирает варианты с помощью n «запусков» рулетки. Колесо рулетки содержит по одному сектору для каждого варианта. Размер i-го сектора пропорционален соответствующей величине $P_S(i)$. При таком отборе варианты группы модификации с более высоким/низким значением результирующего показателя будут выбираться с большей вероятностью, чем варианты с низким/высоким значением.

После отбора n выбранных вариантов ТСС подвергаются кроссоверу (рекомбинации) с заданной вероятностью P_C. Случайным образом n вариантов разбиваются на $n/2$ пары. Для каждой пары с вероятностью P_C может применяться кроссовер. Соответственно с вероятностью $1-P_C$ кроссо-

вер не происходит и неизмененные варианты ТС переходят на стадию мутации. Если кроссовер происходит, полученные новые варианты ТС заменяют собой предшествующие и переходят к мутации.

Синтезированный вариант ТС, созданный при помощи генетического алгоритма, представленного на рисунке 1, принимает вид:

$$a = \{a_{1.2}\ a_{2.2}\ a_{3.1} \ldots a_{5.1} \ldots a_{9.1} \ldots a_{16.1}\}. \quad (1)$$

Синтезированный вариант должен быть полным, поскольку он не может содержать запрещенные пары вершин. Чтобы транспортная система отвечала своему назначению, она обязана выполнять все основные технические подфункции, которые представлены классификационной таблицей. Выбор любого значения из классификационного признака обеспечивает реализацию соответствующей технической подфункции. Это значит, что количество значений классификационных признаков в синтезированном варианте ТС должно совпадать с числом классификационных признаков *N*. Поэтому на формирование вариантов ТС накладывается ограничение g_1:

$$g_1 = G_{1.1} \wedge G_{1.2} \wedge G_{1.3} = 1, \quad (2)$$

где $G_{1.1}, G_{1.2}, G_{1.3}$ – ограничения на синтезируемый вариант (имеют значения: 1 – при выполнении ограничения, 0 – в противном случае); $\wedge$ – знак операции логического умножения.

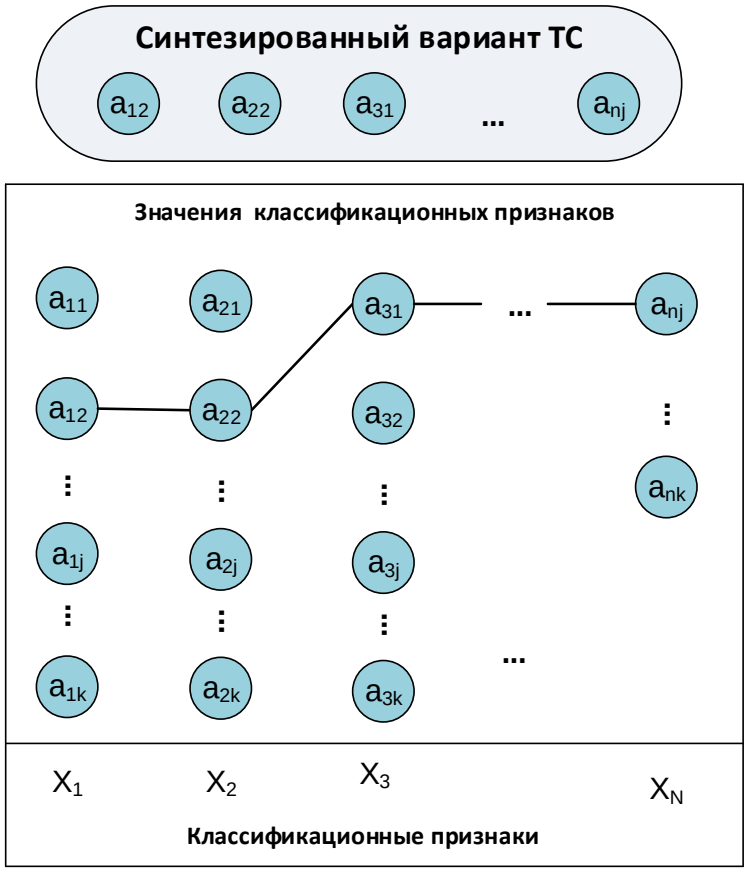


Рис. 1. Синтезированный вариант ТС

$G_{1.1}$ - ограничение, отвечающее за то, чтобы количество значений классификационных признаков в синтезированном варианте ТС совпадало с числом классификационных признаков классификационной таблицы:

$$\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{k_i} a_{ij} = N, \tag{3}$$

где k_i - количество значений в i-м классификационном признаке; i - номер классификационного признака ($i = 1, ..., N$); j - номер значения в i-м классификационном признаке ($j = 1, ..., k_i$).

В выражении (3):

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если значение входит в окончательный вариант,} \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \tag{4}$$

$G_{1.2}$ - ограничение, обеспечивающее выбор из каждого классификационного признака единственной значения:

$$\forall i \sum_{j=1}^{N} a_{ij} = 1, \tag{5}$$

где квантор $\forall i$ читается как «для всех признаков i».

$G_{1.3}$- ограничение, отвечающее за то, чтобы окончательный вариант состоял только из совместимых значений классификационной таблицы:

$$\sum_{t=1}^{N}\sum_{z=1 t\neq z}^{N-1} S_{tz} = \frac{n!}{r!(n-r)!}, \tag{6}$$

где $\sum_{t=1}^{N}$ – сумма t-элементов окончательного варианта; $\sum_{z=1}^{N-1}$ – сумма z-элементов окончательного варианта, $t = 1\ldots N$, $z = 1\ldots N$; $N-1$ – условие, исключающее суммирование одного элемента дважды; S_{tz} – матрица совместимости t и z элементов окончательного варианта; C_n^r – число r-сочетаний из n вершин, образующих окончательный вариант (в нашем случае сравниваются сочетания двух вершин, а $n = N$).

Матрица совместимости имеет вид:

$$S_{tz} = \begin{cases} 1, & \text{если } t\text{-я и } z\text{-я вершины окончательного варианта совместимы,} \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Примером оценки совместимости значений окончательного варианта может служить сравнение таких возможных значений классификационных признаков, как «безрельсовое» исполнение ТС ($t = 5$) и использование такого транспортного средства как «мостовой кран» ($z = 9$). В этом случае $S_{59} = 0$.

В результате проведения синтеза вариантов транспортной системы на разработанной классификационной таблице формируется множество допустимых вариантов решений ТС. На следующем этапе проектирования ТС элементам структур сформированных вариантов сопоставляются реальные модели транспортных средств, тем самым многократно увеличивая размерность задачи выбора оптимального варианта (рисунок 2). Для ее решения аналогичным образом используется генетический алгоритм.

В данной работе для оценивания вариантов ТС методом генетических алгоритмов в качестве критерия оптимальности предложено использовать сумму приведенных затрат на создание и эксплуатацию ТС ($З_{\Sigma}$) и затрат от простоя технологического оборудования, которую необходимо минимизировать:

$$\mu = З_{\Sigma} + J = С + Е_{Н}К + S \cdot F \rightarrow \min, \qquad (7)$$

где J – затраты от простоя технологического оборудования; С – годовые эксплуатационные расходы (себестоимость работ) по варианту; К – прямые капитальные вложения в производственные фонды; $Е_{Н}$ – нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений; S – суммарное время простоя технологического оборудования, определяемое по результатам имитационного моделирования; F – средняя стоимость одной минуты простоя технологического оборудования. Данный критерий представляет собой часть приведенных затрат на создание и эксплуатацию цеха (участка) машиностроительного предприятия, зависящую от его транспортной системы.

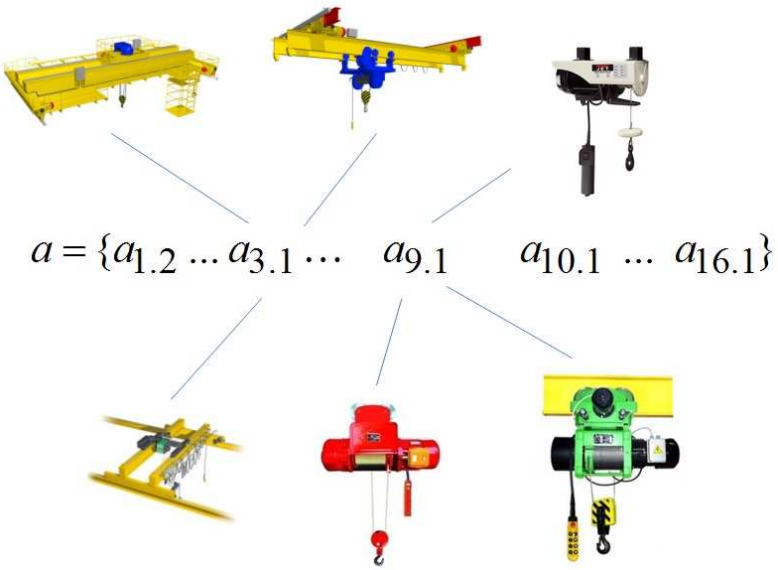


Рис. 2. Формирование вариантов транспортных систем

Годовые эксплуатационные расходы, входящие в приведенные затраты по варианту ТС, включают в себя такие статьи затрат, как амортизационные отчисления на капитальный ремонт; затраты на заработную пла-

ту; затраты на текущий ремонт; затраты на электроэнергию; затраты на помещение. Прямые капитальные вложения в ТС состоят из капитальных вложений в здания и в оборудование, потребное по варианту. Причем в составляющих приведенных затрат учитываются лишь те факторы, на которые влияет выбор типа ТС, транспортных средств и структура самого производства.

На выбор оптимального варианта ТС налагаются два ограничения

$$g_2 = q_{\text{экспл}} - q_{\text{теор}} \geq 0, \tag{8}$$

где $q_{\text{экспл}}$ – эксплуатационная производительность; $q_{\text{теор}}$ - теоретическая производительность.

Данное ограничение выделяет для дальнейшего анализа варианты ТС, способные осуществить требуемый объем перевозок, имея достаточную производительность.

$$g_3 = G_{3.1i} \wedge G_{3.2i} \wedge G_{3.3i} - 1 = 0, \tag{9}$$

где $G_{3.1}, G_{3.2}, G_{3.3}$ – конструктивные ограничения на ТС, аналогичные ограничениям (2).

$G_{3.1} = (D_1 \leq A_1) \wedge (D_2 \leq A_2)$ – ограничение, учитывающее взаимосвязь габаритов транспортно-складского средства с параметрами пространства цеха, где D_1, D_2 – длина и ширина транспортного средства (габариты транспортного средства); A_1, A_2 – сравниваемый параметр пространства цеха, или склада (например, для мостовых кранов – это пролет цеха, для напольного транспорта – ширина проездов).

$G_{3.2} = (D_4 \leq A_3)$ – ограничение, устанавливающее возможность транспортирования груза по массе, где D_4 – масса перемещаемого груза; A_3 – максимальная масса груза, перемещаемого транспортным средством.

$G_{3.3} = (C_1 \geq A_4)$ – ограничение, устанавливающее соответствие режима работы транспортно-складского оборудования ТС (C_1) режиму работы, установленному заданием на проектирование ТС (A_4).

В конечном итоге математическая модель структурно-параметрического синтеза транспортной системы представляется следующим образом [5]

$$\begin{cases} \mu = \text{С} + \text{Е}_\text{Н}\text{К} + S \cdot F \rightarrow \min; \\ g_j \geq 0, \;\; j = \overline{1 \ldots 3}. \end{cases} \tag{10}$$

Данная математическая модель позволяет описать количественную и качественную структуру парка машин и агрегатов транспортной системы, сформировать множество их допустимых вариантов, оценив совместимость подсистем, образующих каждый из вариантов, сопоставить каж-

дой из подсистем допустимого варианта структуры парка машин и агрегатов ТС реальное транспортное средство и выбрать оптимальный вариант, по разработанному критерию минимума приведенных затрат.

Конечным этапом формирования количественной и качественной структуры парка машин и агрегатов транспортно-складской системы является анализ показателей ее эффективности и исследование динамики ее функционирования при комплексной механизации основных и вспомогательных процессов и операций цеха или участка машиностроительного предприятия. При этом производится имитационное моделирование работы ТС с использованием общецелевой системы имитационного моделирования GPSS World.

Список литературы

1. Анцев В.Ю., Шафорост А.Н. Оптимизация структуры внутрицехового транспорта машиностроительных предприятий / Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии, 2012. № 2-4 (292). С. 104-109.

2. Ивахненко А.Г., Куц В.В. Структурно-параметрический синтез технологических систем. Курский государственный технический университет. Курск, 2010. 153 с.

3. Мерданов Ш.М., Шефер В.В., Конев В.В. Проектирование предприятий по эксплуатации и ремонту машин: учебное пособие для студентов вузов. Тюмень, ТюмГНГУ, 2009. 243 с.

4. Управление качеством в системах и процессах машиностроения / О.В. Аникеева, Н.П. Золотухина, А.Г. Ивахненко, А.В. Олейник, М.Л. Сторублев. Юго-Западный государственный университет. Курск, 2014. 208 с.

5. Анцев В.Ю., Шафорост А.Н. Математическая модель структурно-параметрического синтеза транспортно-складских систем промышленных предприятий / Наземные транспортно-технологические комплексы и средства: Материалы Международной научно-технической конференции. Тюменский индустриальный университет. Тюмень, 2016. С. 21-25.

Шафорост Александр Николаевич, ассистент, shaforost@tsu.tula.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

STRUCTURALLY-PARAMETRICAL SYNTHESIS TRANSFER SYSTEMS MACHINE-ASSEMBLING SHOPS MACHINE-BUILDING COMPANIES

A.N. Shaforost

A method of layout design and planning solutions of transportation systems departments Smith machine-building enterprises in the design stage on the basis of structural synthesis of the technical re-making and application of intelligent systems of information support.

Key words: transport system assembly department, structural and parametric synthesis, genetic algorithm, given the cost-ary imitation modeling.

Shaforost Aleksandr Nikolaevich, assistant, shaforost@tsu.tula.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 621.865.8

РОБОТ ДЛЯ ФОТОВОЛЬТАИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ ДОРОГИ

Е.В. Поезжаева, Н.К. Иванов, И.Э. Шаякбаров

В условиях современного мира человечество нуждается в альтернативных источниках энергии. Такую энергию можно получить из солнца с помощью специальных покрытий. В данной статье предлагается конструкция дороги для поглощения солнечной энергии с помощью фотовольтаических пластин и контроль качества данного покрытия с помощью робота.

Ключевые слова: дорога, покрытие, робот, диагностика, моделирование.

В современном мире одной из важнейших задач является защита окружающей среды. Одним из направлений является рациональное использование энергетических ресурсов и их замена на альтернативные источники. Одним из таких источников является солнце. Оно дает достаточно световой энергии, которую можно переделать в другой вид энергии. Но необходимо собрать данную энергию, и для этого проектируется дорога с покрытием, способным поглощать световую энергию солнца и трансформировать её в электрическую. Эти покрытия получили названия фотовольтаические (рис. 1).



Рис. 1. Участок дороги из фотовольтаических пластин

Автодороги, снабженные фотовольтаичным покрытием, могут дать новый источник возобновляемой электроэнергии. Принцип работы этого дорожного полотна тот же, что и у фотоэлементов, которые устанавливают на солнечных батареях. Только покрытие для дорог делают не из стекла, а из специального прочного пластика. Обычные фотоэлементы очень хрупкие, но 7-ми миллиметровое покрытие для дорог должно работать при интенсивном автомобильном потоке в разных погодных условиях и выдерживать любое транспортное средство.

Революционная дорога позволит установить в городах дополнительное дешевое освещение, обеспечить электричеством не только расположенные в труднодоступных зонах поселки, но и наладить там промышленное производство небольшого масштаба (рис. 2).



Рис. 2. Фотовольтаическое покрытие территории парковки

Фотоэлементы встраиваются в многослойную подложку и собирают солнечную энергию с помощью тонкой пленки поликристаллического кремния, позволяющие производить электроэнергию. На нижней стороне панели установлено устройство связи с боковым модулем, в котором находятся электрические компоненты безопасности. Данное покрытие имеет длительный срок службы [1].

Система механизмов рассматривается для будущего развития фотовольтаических дорог и должна систематизировать информацию о состоянии покрытия и необходимости его технического обслуживания. Уникальность такой дороги состоит в производстве электроэнергии и передаче её на подзарядку двигателя АТС (рис. 3).



Рис. 3. Подзарядка АТС

Важность операционного контроля обуславливает возможность коррекции к повышению качества производства работ и срока службы автомобильной дороги. В частности, решим проблему контроля качества готового дорожного покрытия определением соответствия свойств пластика требованиям стандартов, определения фактической толщины покрытия и прочности сцепления слоев.

Предлагается за основу взять робот со следящей системой для проверки дорожного полотна. Предполагается размещение сервомеханизма, который даёт информацию о действительном положении фотовольтаического покрытия дороги.

Звено манипулятора, прикрепленное к платформе, снабжено видеокамерами и специальным рабочим органом, которым может произвести сканирование некоторого участка дорожного покрытия. Оно приводится в движение электрическим приводом в заранее запрограммированной последовательности движений под управлением контроллера (управляющего устройства), который основан на микропроцессоре. Для предполагаемого робота, который будет эксплуатироваться в достаточно простых по проходимости условиях, наиболее выгодно использовать четырехколесную платформу. Мини-лаборатория, выполняющая главную задачу робота, включает в себя:

плотномер пластика, для определения коэффициента уплотнения и степени плотности верхнего слоя дороги;

приспособление для определения шероховатости дорожных покрытий;

прибор для измерения толщины слоев дорожного покрытия.

Основываясь на встроенной базе данных, робот определяет соответствие качества данного дорожного покрытия. Результаты исследования предлагается записывать на твердотельный накопитель с помощью какого-либо микропроцессора. В связи со сложностью и существенной нелинейностью динамических характеристик манипуляционного робота проблема оптимального контурного управления такой системой является чрезвычайно трудной. Задача упрощается при ее решении в два этапа. На первом этапе до начала движения осуществляется планирование оптимальной траектории движения по фотовольтаическому покрытию дороги как функции времени, а на втором, в реальном времени, осуществляется отслеживание полученного движения. Для того, чтобы робот мог достаточно точно отследить сформированную траекторию, на этапе планирования необходимо располагать точным значением динамики манипуляционной системы. Однако, на практике инерционные характеристики объекта манипулирования часто бывают неизвестны.

Динамика манипуляционного робота в тензорных обозначениях может быть описана уравнением [1]:

$$u_i = J_{ij}\ddot{q}^j + C_{ijk}\dot{q}^j\dot{q}^k + R_{ij}\dot{q}^j + q_i, \quad (1)$$

где u_i – i-тая обобщенная сила, q_i – i-тая обобщенная координата, J_{ij} – матрица инерции, R_{ij} – матрица вязкого трения, C_{ijk} – массив кориолисовых коэффициентов, определяемый выражением:

$$C_{ijk} = \frac{1}{2}\left(\frac{\delta J_{ij}}{\delta q^k} + \frac{\delta J_{ij}}{\delta q^j} + \frac{\delta J_{ij}}{\delta q^i}\right). \quad (2)$$

Матрица инерции J_{ij}, массив кориолисовых коэффициентов C_{ijk} являются функциями положения манипулятора и матрицы псевдоинерции объекта манипулирования, включающей в себя массу, первые и вторые моменты объекта моделирования.

Желаемая геометрическая траектория задается в конфигурационном пространстве в параметрической форме, т. е. все координаты q^i, характеризующие перемещения в степенях подвижности манипулятора, выражаются через единственный параметр λ:

$$q^i = f^i(\lambda), 0 \le \lambda \le \lambda_{max}. \quad (3)$$

При такой форме представления появляется возможность выразить положения, скорости и ускорения в степенях подвижности через параметр λ и его производные по времени. Подставляя эти соотношения в уравнение динамики (1), можно получить

$$u_i = J_{ij}\frac{df^i}{d\lambda}\dot{\mu} + \left(J_{ij}\frac{d^2f^i}{d\lambda^2} + C_{ijk}\frac{df^i}{d\lambda}\cdot\frac{df^k}{d\lambda}\right)\mu^2 + R_{ij}\frac{df^i}{d\lambda} + q_i, \quad (4)$$

где $\mu = \dot{\lambda}$ – псевдоскорость.

Если объект манипулирования имеет некоторую номинальную матрицу псевдоинерции I_N, то уравнение (4) можно представить в форме:

$$u_i = M_i(\lambda, I_N)\dot{\mu} + Q_i(\lambda, I_N)\mu^2 + R_i(\lambda)\mu + S_i(\lambda, I_N), \quad (5)$$

где

$$M_i = \frac{J_{ij}(I_N)df^i}{d\lambda},$$

$$Q_i = \frac{J_{ij}(I_N)d^2f^i}{d\lambda^2} + \frac{C_{ijk}(I_N)df^i}{d\lambda} \cdot \frac{df^i}{d\lambda},$$

$$R_i = \frac{R_{ij}df^i}{d\lambda} S_i = g_i(I_N)\ .$$

Если инерционные характеристики объекта манипулирования отличаются от нормальных, то возмущённое уравнение динамики можно представить в виде

$$u_i' = M_i(\lambda, I_N + \Delta I_N)\dot{\mu} + Q_i(\lambda, I_N + \Delta I_N)\mu^2 + R_i(\lambda)\mu + S_i(\lambda, I_N + \Delta I_N). \quad (6)$$

Для того, чтобы требуемые моменты не превысили возможностей приводов, нужно выбрать такие μ и $\dot{\mu}$, что при отклонениях ΔI_N в известных пределах величина момента u_i', определенного выражением (6). Остается реализуемой, т. е.

$$u_i^{min}(\lambda, \mu) \le u_i' \le u_i^{max}(\lambda, \mu). \quad (7)$$

Также могут быть наложены ограничения на скорость изменения этого момента, как функции положения, скоростей и ускорений

$$|\dot{u}_i| = |F(q, \dot{q}, \ddot{q})| \le K_i, \quad (8)$$

где F: $R^N \cdot R^N \cdot R^N \to R$; K_i – константа.

Способ формирования податливого движения основан на изменении жесткости схвата манипулятора. Соответствующая концепция управления учитывает жесткость манипулятора в виде матрицы сил, воздействующих на схват при отклонении его от номинального положения. Стабилизация инерционных сил производится специальной системой [2].

Спроектированная модель робота обеспечивает высокий контроль точности и прочности фотовольтаического покрытия дороги. Таким образом, рассматривается система, позволяющая проектировать дороги, которые придут на смену асфальтобетонным и с помощью которых будет возможно более эффективно управлять трафиком.

Список литературы

1. Официальный сайт компании Wattway [Электронный ресурс] URL: http://www.wattwaybycolas.com (дата обращения 21.11.2016).

2. Поезжаева Е.В., Васенин А.С., Шумков А.Г. Роботизация обслуживания лакокрасочного покрытия // Молодой ученый, 2016. С. 194 - 196.

Поезжаева Елена Вячеславовна, канд. техн. наук, проф., nikitaivanov59@mail.ru, Россия, Пермь, Пермский национальный исследовательский политехнический университет,

Иванов Никита Константинович, студент, nikitaivanov59@mail.ru, Россия, Пермь, Пермский национальный исследовательский политехнический университет,

Шаякбаров Ильнур Эльмарович, студент, schayakbaroff.iln@yandex.com, Россия, Пермь, Пермский национальный исследовательский политехнический университет

THE ROBOT FOR THE FOTOVOLTAICHESKY ROAD SURFACING

E.V. Poezzhaeva, N.K. Ivanov, I.E. Shayakbarov

In the conditions of the modern world the mankind needs alternative energy sources. Such energy can be received from the sun by means of special coverings. In this article the structure of the road for absorption of solar energy with the help the fotovoltaicheskikh of plates and quality control of this covering by means of the robot is offered.

Key words: road, covering, robot, preliminary treatment, modeling.

Poezzhayeva Elena Vyacheslavovna, candidate of technical sciences, docent, nikitaivanov59@mail.ru, Russia, Perm, State National Research Polytechnical University of Perm,

Ivanov Nikita Konstantinovich, student, nikitaivanov59@mail.ru, Russia, Perm, State National Research Polytechnical University of Perm,

Shayakbarov Ilnur Elmarovich, student, schayakbaroff.iln@yandex.com, Russia, Perm, State National Research Polytechnical University of Perm

УДК.621.873.25

ОЦЕНКА ДИАПАЗОНА ПРИМЕНЕНИЯ ОПТИЧЕСКОЙ РЕФЛЕКТОМЕТРИИ ПРИ КОНТРОЛЕ ОТНОСИТЕЛЬНОГО РЕСУРСА МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ

П.А. Сорокин, В.К. Ушаков

Рассмотрена возможность применения оптических методов для контроля усталостной поврежденности металлоконструкций.

Ключевые слова: усталостное повреждение, оптическая рефлектометрия.

В процессе эксплуатации боковые рамы и надрессорные балки испытывают статические и динамические вертикальные и продольные нагрузки, воздействие крутящего момента при прохождении вагонов криволинейных участков пути. Следует учитывать, что основная часть динамических вертикальных нагрузок носит циклический характер, и усталостная прочность боковых рам является основной характеристикой их эксплуатационной надежности, то есть напрямую влияет на безопасность движения поездов. В боковых рамах усталостные трещины чаще всего возникают в зоне надбуксового проема и его наружных углах [1].

Усталостные разрушения находит свое отражение, в первую очередь, в поверхностных и приповерхностных слоях нагружаемой металлоконструкции, и если на первых стадиях обнаружить и получить их количественную оценку можно только с помощью специальных приборов, то в начале второго этапа (линия Френча) это можно сделать визуально с помощью простейших увеличительных средств. Причем каждой стадии усталости соответствуют свои изменения рельефа поверхности [2] от появления линий скольжения до образования макротрещин критического размера. Таким образом, количественная и качественная оценка изменений рельефа поверхности может дать объективные данные о степени усталостных повреждений исследуемой металлоконструкции и оценить ее ресурс до разрушения. Причем получить оценку изменений рельефа поверхности можно не только непосредственными измерениями, но и по косвенному признаку – по изменению оптических свойств с помощью средств сканирования рефлектометрическими методами дефектоскопии.

Для автоматизации процесса мониторинга применяется следующий способ [3]. Для его применения на исследуемой металлоконструкции определяют слабые места – места наиболее вероятного разрушения. Для этого проводят расчет металлоконструкции методом конечных элементов или пользуются готовыми статистическими данными. В том случае, если получена расчетная модель металлоконструкции (что предпочтительнее, чем использование статистических данных), определяют предполагаемое направление макротрещины, которая распространяется в плоскости, перпендикулярной направлению приложенной нагрузки в условиях реализации плоскодеформированного напряженного состояния у вершины трещины. В местах наиболее вероятного разрушения в зоне предполагаемого прохождения и развития трещины подготавливают контрольные площадки. Контрольная площадка представляет собой участок поверхности, обработанный с высокой чистотой. Чистота обработки поверхности контрольной площадки выбирается в зависимости от разрешающей способности используемых средств сканирования. Для сканирования поверхностей контрольных площадок применяют оптические рефлектометрические датчики, реализующие принципы регистрации параметров рассеянного контролируемой поверхностью оптического излучения и позволяющие выявить наличие изменений оптических свойств поверхности.

Схема сканирования и оптического датчика приведены на рис. 1. Для сканирования контролируемой поверхности применяется оптический датчик, состоящий из источника излучения 1, фотоприемников, расположенных в диффузном 2 и зеркальном 3 направлениях. Источник излучения представляет собой лазерный модуль, формирующий на контролируемой поверхности 4 метку подсвета. Световое излучение от подсвеченной поверхности регистрируют фотоприемники. Перемещение световой метки

осуществляется за счет шагового двигателя через винтовую передачу. Сигнал с фотоприемников усиливается, преобразуется в цифровой вид и передается на ПК.

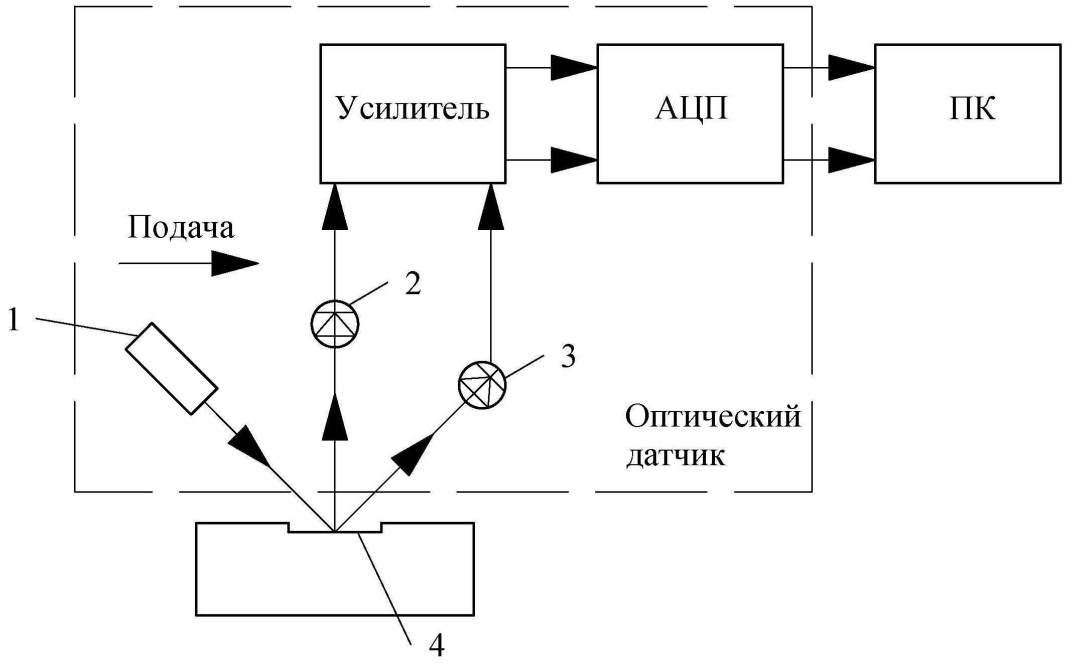


Рис. 1. Схема сканирования и оптического датчика

Информационный сигнал о наличии или отсутствии на поверхности контрольных площадок усталостных повреждений содержится в световом потоке, формируемом рассеянным контролируемой поверхностью оптическим полем на входе фотоприемников.

При решении задач оптической дефектоскопии, не требующих выяснения тонкой структуры рассеянного оптического поля на случайной границе двух однородных сред, используются методы теории рассеяния волн статистически неровной поверхностью, устанавливающие связь между статистическими характеристиками поверхности и характеристиками рассеянного этой поверхностью поля [4].

Одной из математических моделей, которая адекватно описывает рассеяния света оптически тонкими и оптически грубыми поверхностями, является модель П. Бекмана. Для больших микронеровностей модель рассеяния света шероховатой поверхностью записывается в виде:

$$\overline{\beta}(\psi,\zeta;\theta,\varphi)=\frac{\left(\frac{\alpha}{2\sigma}\right)^2}{\cos\theta\cos\psi}\overline{C}(\theta,\varphi;\psi,\zeta)\exp\left[-\left(\frac{\alpha}{2\sigma}\right)^2\overline{h}(\theta,\varphi;\psi,\zeta)\right], \qquad (1)$$

$$\overline{C}(\theta,\varphi;\psi,\zeta)=\frac{C(\theta,\varphi;\psi,\zeta)}{(\cos\theta+\cos\psi)^2}, \qquad (2)$$

$$\bar{h}(\theta, \varphi; \psi, \zeta) = \frac{h(\theta, \varphi; \psi, \zeta)}{(\cos\theta + \cos\psi)^2}. \qquad (3)$$

где α - корреляционный интервал; σ - среднеквадратическое отклонение высот микронеровностей поверхности; θ - угол отражения светового потока; ψ - угол падения светового потока; φ - азимутальный угол отражения; ζ - азимутальный угол падения.

Полный световой поток, входящий в оптическую систему, с учетом яркости световой марки, выраженной через коэффициент яркости равен:

$$F = \pi r^2 B_0 \int_{-\varphi}^{\varphi} d\varphi \int_{\theta_1}^{\theta_2} \beta(\theta, \varphi, \psi, \zeta) \sin\theta d\theta, \qquad (4)$$

где $\beta(\theta, \varphi, \psi, \zeta)$ – коэффициент яркости, определяемый выражениями (1 – 3); B_0 – яркость идеального непоглощающего рассеивателя.

Пределы интегрирования в (4) определяются размерами световой марки подсвета L_x и L_y:

$$\theta_1 = \theta_0 - \frac{\Delta\theta}{2}; \theta_2 = \theta_0 + \frac{\Delta\theta}{2}; \Delta\theta = \frac{L_x}{R}\cos\theta_0$$

и, окончательно:

$$\theta_1 = \theta_0 - \frac{L_x}{2R}\cos\theta_0; \theta_1 = \theta_0 + \frac{L_x}{2R}\cos\theta_0; \varphi = arctg\left(\frac{L_y}{2L} ctg\theta\right).$$

На результирующий световой поток, воспринимаемый фотоприемником, влияют две группы параметров. Первую группу составляют параметры оптического датчика:

- углы падения ψ и отражения θ светового потока;
- характеристика фотоприемника и его положение;
- размеры метки подсвета и мощность источника излучения.

Вторая группа определяет статистические характеристики контролируемой поверхности:

- среднеквадратическое отклонение высот микронеровностей σ;
- корреляционный интервал микрорельефа α, характеризующим угол наклона граней микронеровностей;
- отношениями этих характеристик между собой.

Таким образом, в качестве диагностических параметров при оценке относительного ресурса металлоконструкции можно использовать параметры шероховатости поверхности α и σ.

Проведенные исследования микрорельефа поверхностей лабораторных образцов, подвергнутых циклическому нагружению, подтверждают зависимость параметров α и σ от относительного ресурса образца. По

экспериментальным данным были рассчитаны регрессионные модели зависимости параметров поверхности α и σ от относительного ресурса N (рис. 2):

$$\alpha(N) = 0{,}02467 \cdot e^{-1{,}625 \cdot N}, \quad (5)$$

$$\sigma(N) = 0{,}06057 \cdot N^{13{,}52} + 0{,}0005213. \quad (6)$$

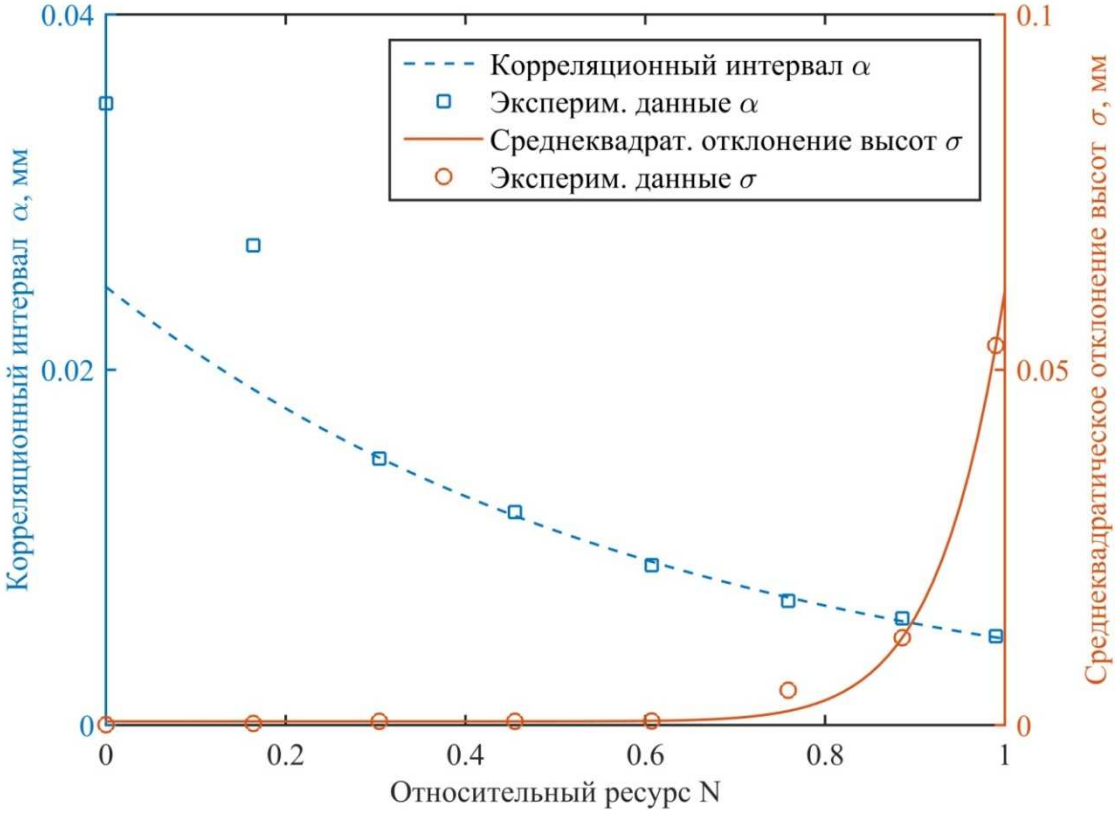


Рис. 2. Зависимость параметров шероховатости поверхности от относительного ресурса

Первые две точки экспериментальных данных не были учтены, чтобы исключить влияние чрезмерной полировки поверхности, равной Ra = 0,032 мкм. При этом исключении, из формул (5, 6) получим, что оптимальная чистота подготовки поверхности составляет α=24,67 мкм, σ=0,5213 мкм, что примерно соответствует Ra = 0,41704 мкм.

С целью анализа диапазона применения рефлектометрических средств контроля была разработана математическая модель, представленная на рис. 3.

Исходными данными для данной модели являются:

- характеристики и положение источника излучения;
- характеристики и положение фотоприемников;
- параметры поверхности α и σ.



Рис. 3. Математическая модель оптического рефлектометрического датчика

На основе зависимостей (5, 6) был смоделирован сигнал фотоприемников на протяжении всего ресурса (рис. 4). Исходными данными для моделирования являлись:

- источник излучения мощностью 1 мВт с длинной волны 650 нм, формирующий метку подсвета площадью 1 мм^2.

- в качестве фотоприемников использовалась модель фотодиода ФД-256А;

- углы падения ψ и отражения θ светового потока составляют 10 град;

Ввиду того, что темновой ток фотодиода ФД-256А равен 0.1 мкА, данный способ оценки остаточного ресурса эффективен в определённый период эксплуатации металлоконструкции – от 0 до 0.75 относительного ресурса.

Следует учитывать, что на завершающей стадии усталостных разрушений происходит образование микротрещин, которые могут быть обнаружены другими методами анализа.

На практике в качестве информативного сигнала используют параметр:

$$W = \frac{R_d}{R_s},$$

где R_d - сигнал фотоприемника диффузного направления, мкА; R_s - сигнал фотоприемника зеркального направления, мкА.

Это обусловлено тем, что в реальных условиях коэффициент отражения поверхности является случайной функций пространственных координат. Отношение диффузной и зеркальной составляющих позволяет компенсировать изменение цветности поверхности. На рис. 5 представлена зависимость параметра W от относительного ресурса. Вид этой кривой подтверждает вывод об ограничении диапазона использования данного способа.

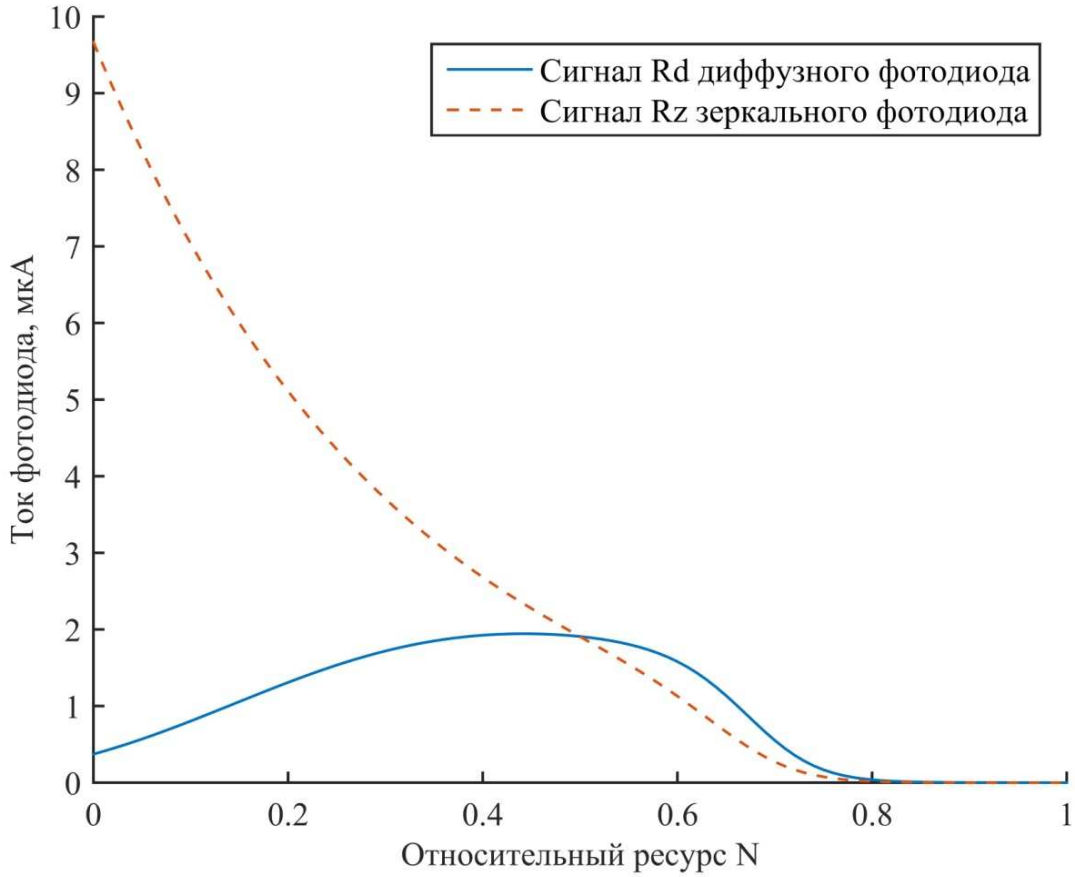


Рис. 4. Зависимость сигналов фотодиодов от относительного ресурса

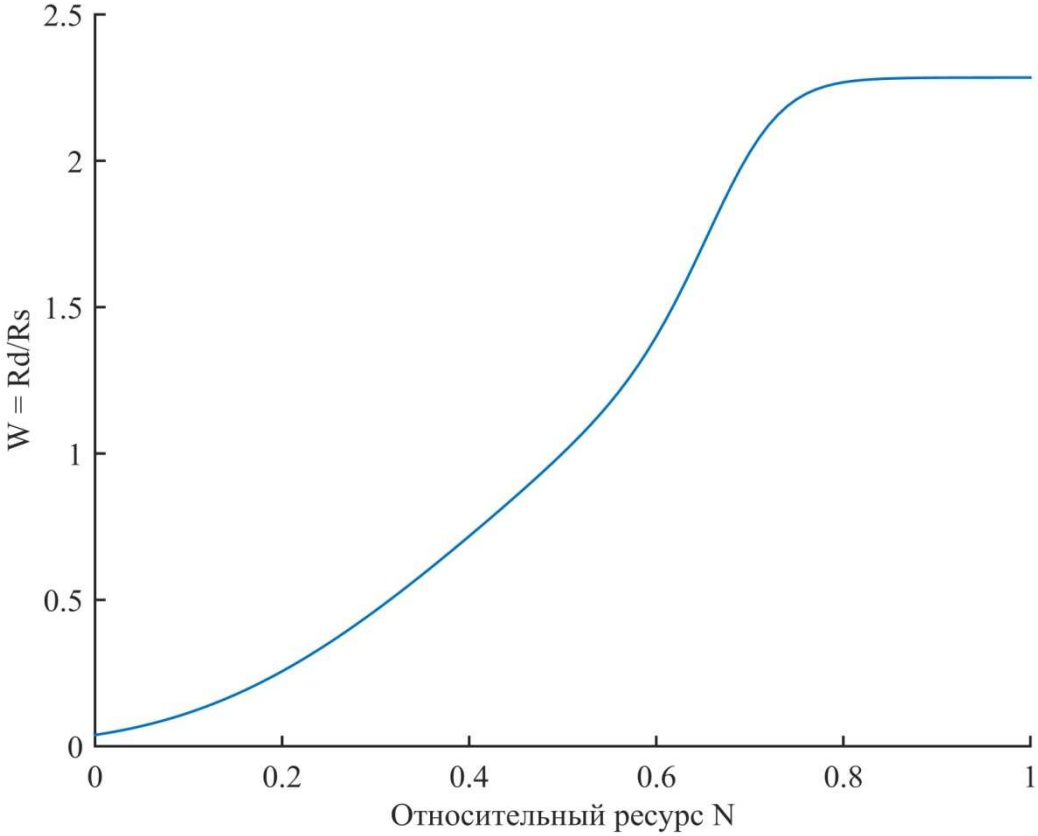


Рис. 5. График параметра W в зависимости от относительного ресурса

Данное исследование показывает, что применение рефлектометрии позволяет оценить остаточный ресурс металлоконструкций, в том числе боковых рам тележек грузовых вагонов. Но при проектировании систем контроля технического состояния металлоконструкций следует учитывать диапазон чувствительности фотоприемников.

Список литературы

1. Стальное литье и методы повышения качества // ИИС «Металлоснабжение и сбыт» [Электронный ресурс]. URL: http://www.metalinfo.ru/ (дата обращения: 18.02.2016).

2. Сорокин П.А., Дронов В.С., Селиверстов Г.В., Толоконников А.С.. Изменение оптических свойств поверхности при упругопластической деформации малой области металлоконструкции // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел и деталей машин: Межвуз. сб. науч. тр. / Под. Ред. Н.Б. Демкина. Тверь: ТГТУ, 2005. С. 34 – 37.

3. Патент РФ №2170923, G01N21/88, G01B11/30. Способ диагностики работоспособности металлоконструкций. / Сорокин П.А., Дронов В.С., Селиверстов Г.В., Григорьев А.В. 2001, № 20.

4. Басс Ф.Г., Фукс И.М. Рассеяние волн на статистически неровной поверхности. М.: Наука, 1972. 424 с.

Ушаков Вадим Константинович, асп., ushakovvk@gmail.com, Россия, Москва, Московский государственный университет путей сообщения (МИИТ),

Сорокин Павел Алексеевич, д-р техн. наук, проф., pavalsor@rambler.com, Россия, Москва, Московский государственный университет путей сообщения (МИИТ)

ASSESSMENT OF THE APPLICATION RANGE OF OPTICAL REFLECTOMETRY IN CONTROLLING THE RESIDUAL LIFE OF STEEL STRUCTURES

V.K. Ushakov, P.A.Sorokin

Consider the possibility of using optical methods for monitoring fatigue damage of steel structures.

Key words: fatigue damage, optical reflectometry.

Ushakov Vadim Konstantinovich, postgraduate, ushakovvk@gmail.com, Russia, Moscow, Moscow State University of Railway Communications (MIIT),

Sorokin Pavel Alekseyevich, doctor of technical science, professor, pavalsor@rambler.ru, Russia, Moscow, Moscow State University of Railway Communications (MIIT)

УДК 621.873.25

РАЗРАБОТКА И СРАВНЕНИЕ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ УСТОЙЧИВОСТИ БАШЕННЫХ КРАНОВ

П.А. Сорокин, А.В.Мишин, К.С. Хряков

Статья посвящена вопросу сохранения устойчивости башенных кранов. Рассмотрены этапы развития устройств для обеспечения безопасности башенных кранов и выявлены их недостатки. Предложена система, основанная на методах искусственного интеллекта. Предложены пути дальнейшей разработки темы.

Ключевые слова: башенный кран, устойчивость, ветровая нагрузка, искусственный интеллект

Башенные краны, являясь высотным подъемным сооружением, обладают чувствительностью к эксплуатационным нагрузкам. Нагрузки, действующие на башенные краны, являются совокупностью постоянных и ненормируемых составляющих.

Безопасность эксплуатации башенного крана зависит от устойчивости к ненормируемым составляющим нагрузок на металлоконструкцию. Для сохранения устойчивости башенного крана необходимо разработать устройство для стабилизации его положения при ненормируемых составляющих нагрузок.

В данной работе рассматриваются ненормируемые ветровые нагрузки.

Наиболее распространенными устройствами для контроля устойчивости при ветре рабочего состояния является разновидности ограничителей грузоподъемности. Эти приборы работают в индикаторном режиме, т.е. при возникновении аварийной ситуации происходит обесточивание грузоподъемной машины. При подъеме груза выше номинального это является условием сохранения устойчивости. Но при критической скорости ветра происходит только оповещение машиниста (звуковое, световое) без влияния на управление грузоподъемной машины.

Система ветровой защиты основана на регистрации скорости ветра и удержании передвижного грузоподъемного крана противоугонными захватами.

Система ветровой защиты изначально состояла из анемометра (датчик скорости ветра + блок управления). Затем функция измерения скорости ветра была интегрирована в ограничитель грузоподъемности (ОГП), т.е. использовалась связка: датчик скорости ветра + блок управления ОГП. С внедрением программируемых логических контроллеров (ПЛК) обработка сигналов от датчика скорости ветра возложена на них. В некоторых случаях применяют ПЛК, но обработка сигналов происходит в блоке управления ОГП.

На всех этапах развития систем ветровой защиты использовались противоугонные захваты (ручные, полуавтоматические, автоматические).

Недостаток систем ветровой защиты – приведение в действие защитных мероприятий после регистрации опасных параметров ветровых нагрузок, отсутствие в ОГП функции контроля устойчивости к опрокидыванию. Решение – внедрение в алгоритмы управления грузоподъемными машинами функции экстраполяции на основе нейро-нечеткой логики [1].

Система обеспечения устойчивости должна выполнять следующие функции:

- обеспечивать контроль параметров башенного крана и ветровых нагрузок;

- вырабатывать сигналы управления на механизмы приводов.

Объектом исследования являются стационарные и передвижные башенные краны.

Цель работы заключается в обеспечении устойчивости башенных кранов при ненормируемых внешних воздействиях.

В работе использованы методы искусственного интеллекта.

Научная новизна заключается в разработке системы обеспечения устойчивости башенных кранов при ветровых нагрузках на основе методов искусственного интеллекта.

Идея разработки состоит в осуществлении активного управления устойчивостью башенного крана с упреждением в период действия порывов ветра.

Преимущества предложенной системы:

- используется экстраполяция ветровых нагрузок на основе методов искусственного интеллекта;

- система разработана для стационарных и передвижных башенных кранов.

Известны системы управления грузоподъемных машин, построенные на методах искусственного интеллекта [2, 3].

Для задач прогнозирования параметров ветровой нагрузки используется нечетка логика, искусственные нейронные сети, нейро-нечеткая логика.

Принцип основан на корректировке положения поворотной части башенного крана относительно направления ветра и выдаче упреждающих сигналов на механизмы для принудительного изменения углового положения поворотной части.

Система безопасности основана на нейросетевом и логическом алгоритмах. Нейросетевой алгоритм используется для прогнозирования значений направления и скорости ветра, а логический алгоритм – для определения опасной скорости ветра (на основе прогнозируемых значений) в порыве и управления приводами в целях заблаговременного перевода башенного крана в безопасное положение.

Система безопасности башенных кранов состоит из подсистемы сбора информации о параметрах ветра и параметрах башенного крана, подсистем нейросетевого прогнозирования и управления приводами. Структурная схема представлена на рис. 1.

Подсистема сбора информации о параметрах ветра и параметрах башенного крана состоит из датчиков, многие из которых имеются в существующем ограничителе грузоподъёмности – датчик скорости ветра, положения стрелы, высоты подъёма крюка, вылета крюка. Дополнительно башенный кран необходимо оснастить датчиком направления ветра.

Подсистема нейросетевого прогнозирования реализуется на основе платы расширения с нейросетевым алгоритмом.

Подсистема управления приводами башенного крана основана на программируемом логическом контроллере (далее ПЛК).

Условием безопасности является выдача подсистемой нейросетевого прогнозирования сигнала управления и его обработки подсистемой управления для срабатывания приводов до возникновения критического опрокидывающего момента от порывов ветра.

Нейросетевая модель для прогнозирования представляет собой нелинейную авторегрессионную зависимость вида:

$$x_{\text{пр}}(t) = x(t-\Delta),...x(t-N\Delta)),$$

где $x_{пр}(t)$ – прогнозируемое значение; $x(t-\Delta),...x(t-N\Delta))$ – предшествующие значения, измеренные с шагом Δ (шаг дискретизации регистрируемых значений).

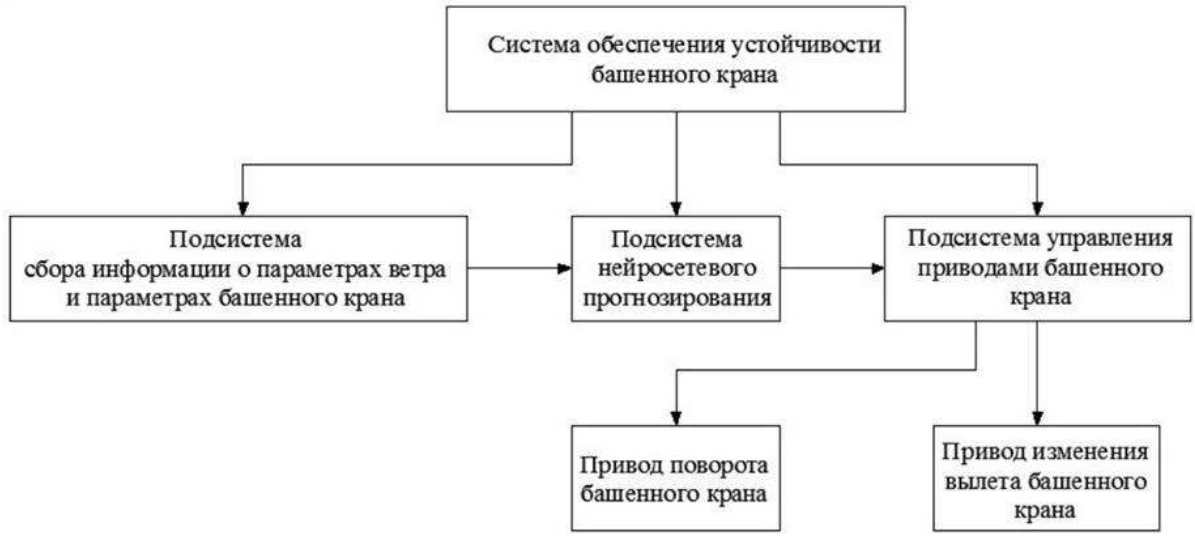


Рис. 1. Структурная схема системы безопасности башенного крана

Прогнозирование реализуется на основе нейросетевой модели с памятью, в качестве которой выступает линия задержки времени.

На рис. 2, а представлена структурная схема прогнозирования скорости ветра, на рис. 2, б – структурная схема прогнозирования направления ветра.

Для прогнозирования скорости и направления ветра используем ИНС прямого распространения с линией задержки, схемы которых представлены на рис. 3 и 4.

В ПЛК заложен алгоритм заблаговременного управления приводами поворота и/или изменения вылета. Алгоритм предназначен для выдачи сигнала управления на основе нейросетевой модели (программа нейросетевой модели записана в память платы расширения) и регистрируемых значениях датчиков скорости и направления ветра.

При прогнозировании опасного порыва и его направления ПЛК формирует сигнал управления, поступающий на привод поворота и/или привод изменения вылета крюка, для разворота поворотной части башенного крана по направлению прогнозируемого порыва ветра.

Если разворот происходит с грузом, то опасных ускорений груза не возникает, так как разворот производится заблаговременно с номинальной угловой скоростью.

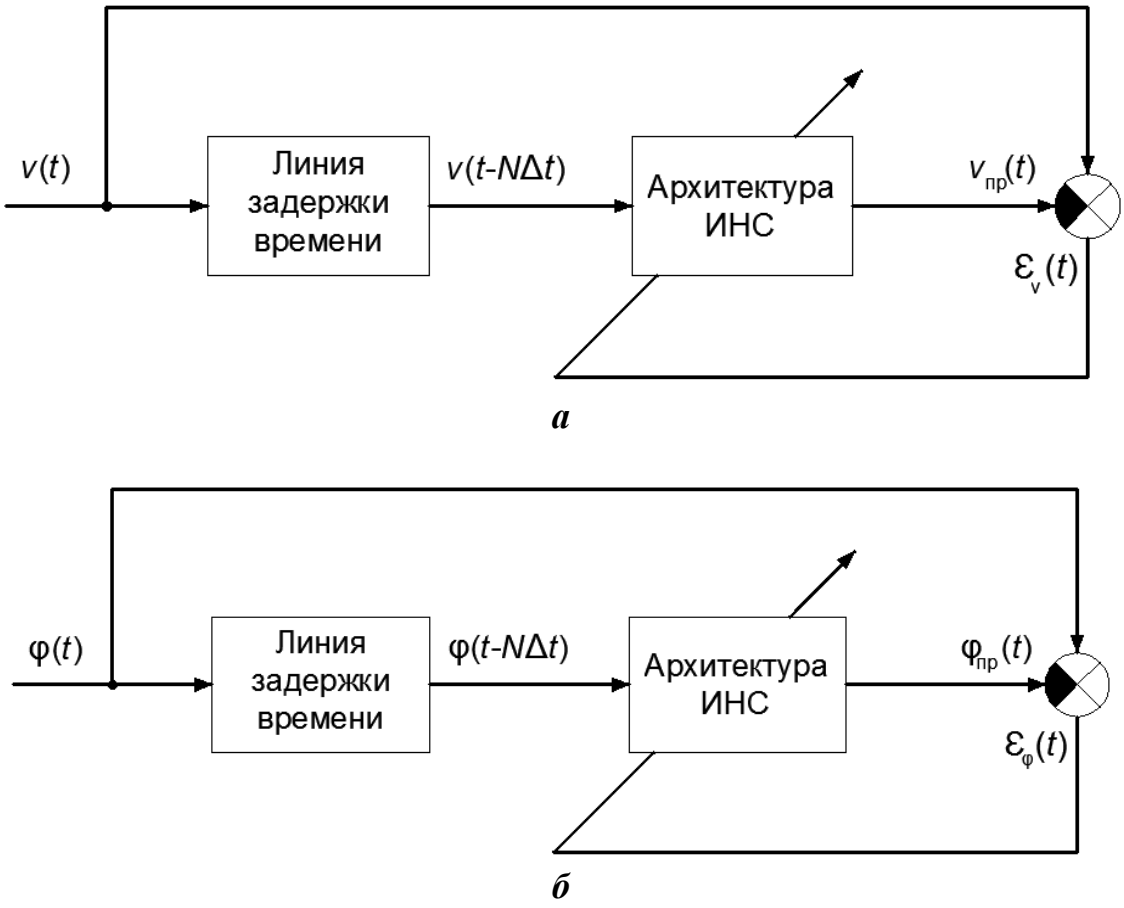


Рис. 2. Структурные схемы нейросетевой модели прогнозирования скорости ветра (а) и направления ветра (б)

В ПЛК предусмотрена блокировка, исключающая возможное столкновение крюковой подвески о возводимый объект при экстренном повороте.

Система безопасности автоматически вмешивается в работу машиниста только при прогнозировании опасной скорости ветра, которая превышает допустимое значение. При эксплуатации башенного крана возможна ситуация, когда прогнозируется опасная скорость ветра в порыве и требуется обеспечить разворот поворотной части башенного крана с грузом. В этом случае нарушается цикл работы.

В результате экспериментальных измерений скорости ветра для I ветрового района (по ГОСТ 1451 – 77) была определена повторяемость опасных скоростей (>12 м/с), равная 10 %. Поэтому опасные скорости ветра редки, но разработанной системой безопасности обеспечивается устойчивость башенных кранов при их возникновении. Нарушение цикла работы в эти моменты практически не влияет на эксплуатационную производительность.

Система разработана для обеспечения устойчивости башенного крана в рабочем состоянии.

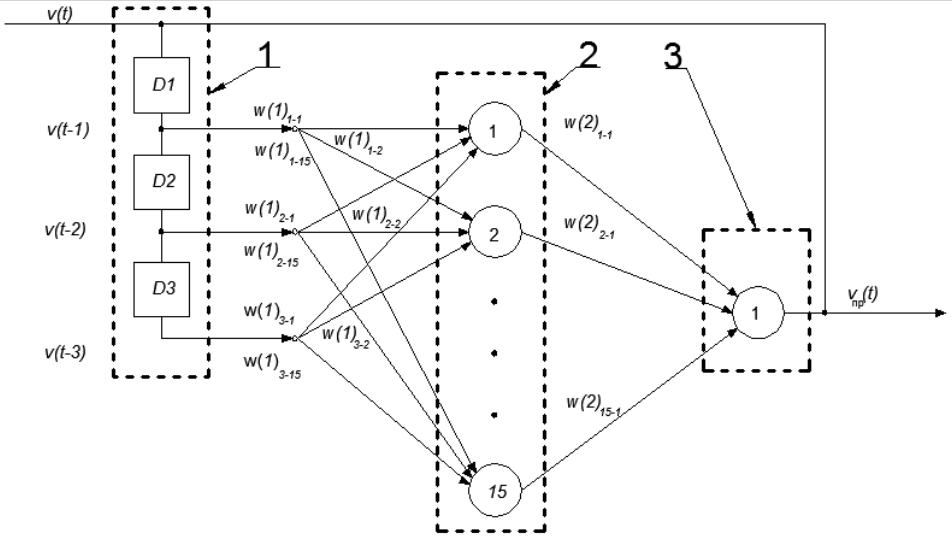


Рис. 3. Схема нейросетевой модели прогнозирования скорости ветра: 1 – линия задержки с отводами; 2 – промежуточный слой; 3 – выходной слой; $v(t)$ ***– текущее значение скорости ветра;*** $v_{\text{пр}}(t)$ ***– прогнозируемое значение скорости ветра;*** $v(t-1)...v(t-3)$ ***– предшествующие значения скорости ветра;*** $w(1)_{1-1}...w(1)_{3-15}, w(2)_{1-1}...w(2)_{15-1}$ ***– весовые коэффициенты;*** $D1...D3$ ***– элементы линии задержки***

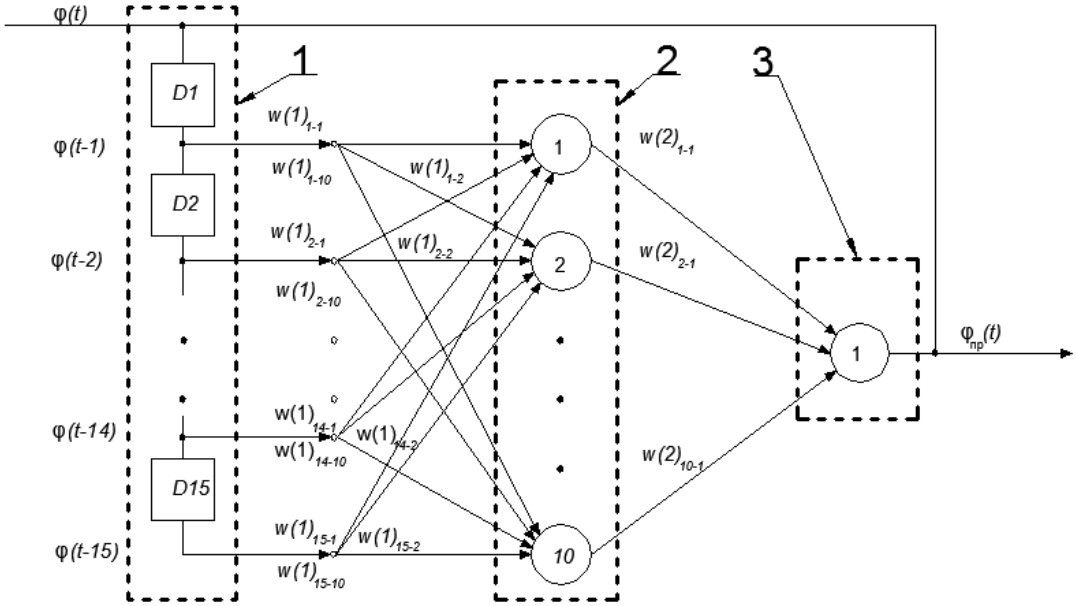


Рис. 4. Схема нейросетевой модели прогнозирования направления ветра: 1 – линия задержки с отводами; 2 – промежуточный слой; 3 – выходной слой; $\varphi(t)$ ***– текущее значение направления ветра;*** $\varphi_{\text{пр}}(t)$ ***– прогнозируемое значение направления ветра;*** $\varphi(t-1)...\varphi(t-15)$ ***– предшествующие значения направления ветра;*** $w(1)_{1-1}...w(1)_{15-10}, w(2)_{1-1}...w(2)_{10-1}$ ***– весовые коэффициенты;*** $D1...D15$ ***– элементы линии задержки***

В нерабочем состоянии башенный кран более устойчив к ветровым нагрузкам за счет меньшей парусности. В нерабочем состоянии (перерыв между сменами) продолжается сбор информации о параметрах ветра за счет работы системы безопасности от дополнительного блока питания. Это повышает точность прогноза опасных порывов в рабочем состоянии башенного крана. Возможна корректировка положения башенного крана в нерабочем состоянии при условии подключения его к питающей сети после окончания смены.

Для предотвращения отказа системы безопасности применимы следующие действия:

- обучение нейросетевых алгоритмов;
- планово-предупредительные проверки нейросетевых алгоритмов.

Для выполнения первого пункта необходимо создание базы данных параметров ветра местности, где будет эксплуатироваться башенный кран. База данных должна содержать значения параметров ветра за длительный период наблюдения с разными шагами регистрации. Далее проводится обучение нейросетевых алгоритмов в лабораторных условиях до начала эксплуатации башенного крана. Затем плата расширения с обученными алгоритмами подключается к ПЛК, который расположен в шкафу управления башенного крана.

При проведении проверок нейросетевых алгоритмов во время эксплуатации башенного крана, возможно его дообучение. Это обусловлено тем, что в процессе работы башенного крана база данных параметров ветра постоянно пополняется и вычислительной мощности архитектуры нейросетевых алгоритмов, заложенной при их обучении, может не хватить.

Непрерывный контроль с экстраполяцией параметров для будущего состояния позволит реализовать упреждающую защиту, которая обеспечивает раннее обнаружение опасных порывов ветра.

Дальнейшая работа сводится к сравнению результатов работы систем управления, построенных на методах:

- нечеткой логики;
- искусственных нейронных сетях;
- нейро-нечеткой логики.

Статья выполнена при поддержке Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере по программе УМНИК в рамках договора №8127ГУ2/2015 от 24.11.2015.

Список литературы

1. Хряков К.С., Мишин А.В. Системы ветровой и сейсмических защит для грузоподъемных кранов // Материалы XX Московской международной межвузовской научно-технической конференции студентов, аспи-

рантов и молодых ученых «Подъемно-транспортные, строительные, дорожные, путевые машины и робототехнические комплексы», 14-15 апреля 2016 г. в г. Москве. М.: МГАВТ.

2. Мишин А.В., Сорокин П.А. Нейросетевой алгоритм системы автоматического контроля устойчивости башенных кранов // Автоматизация и современные технологии. 2014. № 4. С. 7–11.

3. Патент РФ 2542850. Способ обеспечения устойчивости башенных кранов от опрокидывания / П.А. Сорокин, А.В. Мишин, К.С. Хряков, А.В. Редькин. Опубл. в Б.И № 6. 2015.

Сорокин Павел Алексеевич, д-р техн. наук, проф., pavalsor@rambler.ru, Россия, Москва, Московский государственный университет путей сообщения Императора Николая II,

Мишин Алексей Владимирович, канд. техн. наук, доц., alexeymishin89@gmail.com, Россия, Москва, Московский государственный университет путей сообщения Императора Николая II,

Хряков Кирилл Станиславович, асп., kirill-khryakov@mail.ru, Россия, Москва, Московский государственный университет путей сообщения Императора Николая II

RESERCH AND COMPARISON OF STABILITY CONTROL SYSTEM OF TOWER CRANES

P.A. Sorokin, A.V. Mishin, K.S. Khryakov

The article is devoted to the preservation of the stability of tower cranes. Considered the stages of development of devices for safety of tower cranes and revealed their shortcomings. The proposed system based on artificial intelligence techniques. Ways of further development of the topic.

Key words: tower crane, stability, wind loading, artificial intellegence.

Sorokin Pavel Alekseevich, doctor of technical science, professor, pavalsor@rambler.ru, Russia, Moscow, Moscow State University of Railway Engineering,

Mishin Alexey Vladimirovich, candidate of technical science, associate professor, alexeymishin89@gmail.com, Russia, Moscow, Moscow State University of Railway Engineering,

Khryakov Kirill Stanislavovich, postgraduate, kirill-khryakov@mail.ru, Russia, Moscow, Moscow State University of Railway Engineering

УДК 539.3

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ АНИЗОТРОПНОГО ПОКРЫТИЯ УПРУГОГО ШАРА ПО ОТРАЖЕННОМУ ЗВУКУ

С.А. Скобельцын

Решается задача определения величины плотности и модулей упругости трансверсально-изотропного покрытия упругого шара по измеренному звуковому давлению в окрестности шара при рассеянии плоской звуковой волны. Предполагается, что материальные параметры внутренней изотропной части шара и диапазон изменения параметров покрытия известны. Конкретные значения материальных параметров покрытия предлагается искать путем решения задачи минимизации функции многих переменных, которая представляет собой меру отклонения измеренных значений давления в рассеянной звуковой волны и их значений, полученных в результате численного решения задачи дифракции.

Ключевые слова: дифракция звука, гармоническая плоская волна, упругий шар, обратная задача.

Практическое использование решений задач об отражении звука упругими телами часто основано на том, что по характеру отраженного акустического поля можно судить о параметрах упругого объекта-препятствия.

Для анализа влияния упругих свойств материала конечного упругого препятствия на рассеяние звука часто используют модель упругого шара. Изучению отражения звука шаровыми объектами посвящен ряд работ. Основные элементы модели рассеяния звуковых волн упругими сферическими объектами рассмотрены в [1-2]. В работах [3-4] исследуются резонансные явления, возникающие при дифракции акустических волн на упругом шаре. Авторы работ [5-7] рассматривают задачи о рассеянии звуковых волн сферическими упругими телами с полостями. Влияние покрытий на отражение звука упругими сферическими объектами рассматривается в работах [8-9]. В работе [10] предложено решение задачи дифракции плоской звуковой волны трансверсально-изотропным сферическим слоем с полостью, заполненной идеальной жидкостью.

В данной работе рассматривается случай рассеяния звука упругим шаром с трансверсально-изотропным покрытием в виде шарового слоя. Внутренняя часть шара представляет собой изотропный упругий материал. Считается, что упругое тело помещено в идеальную жидкость. Требуется по характеристикам отражения плоской звуковой волны определить значения материальных параметров внешнего слоя шара. Геометрическая постановка задачи показана на рис. 1.

Содержащая акустическая среда Ω_1 характерезуется плотностью ρ_1 и скоростью звука c_1.

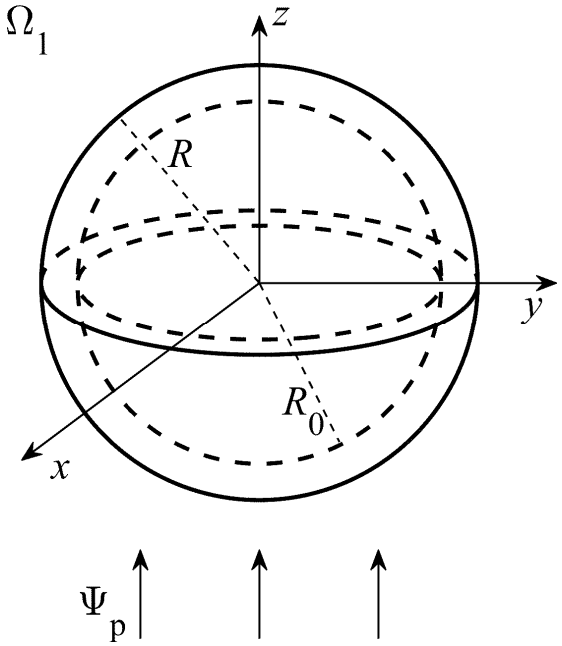


Рис. 1. Геометрия задачи

Внутренняя часть шара радиусом R_0 представляет собой однородную упругую среду с плотностью ρ_0 и модулями упругости Ламе – λ_0, μ_0. Внешняя часть шара – трансверсально-изотропный упругий слой с внутренним радиусом R_0 и внешним – R. Свойства материала слоя характеризуются плотностью ρ и модулями упругости λ_{ij}. Предполагается, что ось упругой симметрии анизотропии направлена по нормали к поверхностям слоя.

На упругий слой внешнего пространства Ω_1 падает плоская звуковая волна с частотой ω, потенциалом скорости Ψ_p и направлением распространения, определяемым волновым вектором $\mathbf{k}_1$ ($|\mathbf{k}_1| = k_1 = \omega / c_1$ – волновое число падающей волны). Введена декартова система координат x, y, z так, что начало координат O совпадает с центром тела, а ось z направлена по вектору $\mathbf{k}_1$. С декартовой системой связана сферическая система координат r, θ, φ так, что $x = r\sin\theta\cos\varphi$, $y = r\sin\theta\sin\varphi$, $z = r\cos\theta$. Такое введение сферической системы координат и предположение о характере анизотропии покрытия шара делают задачу двумерной, поскольку, очевидно, что нет зависимости от угла φ и смещения частиц жидкости и упругой среды могут происходить только по координатам r и θ.

В результате дифракции звука порождаются: отраженная акустическая волна в полупространстве Ω_1 с потенциалом Ψ_s и упругие колебания в шаре. Зная величины R_0, R, ρ_1, c_1, ρ_0, λ_0, μ_0, характеристики падающей и отраженной волны Ψ_s (например, на основе измерений), требуется оценить значения свойств ρ, λ_{ij} анизотропного покрытия шара.

Будем считать, что для искомых параметров известны интервалы изменения:

$$\rho^a \le \rho \le \rho^b, \quad \lambda_{ij}^a \le \lambda_{ij} \le \lambda_{ij}^b, \tag{1}$$

и относительная точность δ с которой нужно определить их значения.

Неизвестные величины ρ, λ_{ij} будем определять на основе постановки и решения прямой задачи о рассеянии плоской звуковой волны неоднородным упругим шаром в рамках линейных моделей движения идеальной жидкости и анизотропной неоднородной упругой среды [11, 12].

Положим, что потенциал скорости в падающей плоской звуковой волне имеет вид

$$\Psi_p = A_p \exp[i(\mathbf{k}_1 \cdot \mathbf{r} - \omega t)], \tag{2}$$

где A_p – константа, задающая амплитуду и начальную фазу падающей волны; $\mathbf{r}$ – радиус-вектор; t – время.

Отраженная от слоя звуковая волна определяется потенциалом скорости в ней – Ψ_s, а прошедшая в Ω_2 волна – потенциалом Ψ_2. Тогда скорость движения частиц жидкости в Ω_1 будут определяться выражением [11]

$$\mathbf{V}_1 = \nabla \Psi_1, \tag{3}$$

где $\Psi_1 = \Psi_p + \Psi_s$.

При этом потенциал Ψ_s должен удовлетворять волновому уравнению

$$\Delta \Psi_s = \frac{1}{c_1^2} \frac{\partial^2 \Psi_s}{\partial t^2}, \tag{4}$$

и условиям излучения на бесконечности [13]

$$\Psi_s\big|_{r\to\infty} = O\left(\frac{1}{r}\right), \quad \left(\frac{\partial \Psi_s}{\partial r} - ik_1 \Psi_s\right)\Big|_{r\to\infty} = O\left(\frac{1}{r^2}\right). \tag{5}$$

В изотропной части шара ($r \le R_0$) можно ввести потенциалы продольных Ψ_0 и поперечных $\mathbf{\Phi}_0$ волн так, что вектор смещения здесь будет представляться так

$$\mathbf{u}_0 = \nabla\Psi_0 + \nabla\times\mathbf{\Phi}_0 . \qquad (6)$$

С учетом симметрии задачи потенциал поперечных волн $\mathbf{\Phi}_0$ может быть записан в виде $\mathbf{\Phi}_0 = r\Phi_0\mathbf{e}_r$, где Φ_0 – скалярная функция координат r и θ, а $\mathbf{e}_r$ – орт координаты r.

Потенциалы Ψ_0 и Φ_0 удовлетворяют волновым уравнениям

$$\Delta\Psi_0 = \frac{1}{c_l^2}\frac{\partial^2\Psi_0}{\partial t^2}, \quad \Delta\Phi_0 = \frac{1}{c_\tau^2}\frac{\partial^2\Phi_0}{\partial t^2}, \qquad (7)$$

где $c_l = \sqrt{(\lambda_0 + 2\mu_0)/\rho_0}$, $c_\tau = \sqrt{\mu_0/\rho_0}$ – скорости продольных и поперечных волн, соответственно.

Колебания упругой среды во внешнем слое шара описываются общими уравнениями движения упругой среды в сферической системе координат:

$$\begin{gathered}\frac{\partial\sigma_{rr}}{\partial r} + \frac{1}{r}\frac{\partial\sigma_{r\theta}}{\partial\theta} + \frac{1}{r}\left(2\sigma_{rr} - \sigma_{\theta\theta} + \sigma_{r\theta}\operatorname{ctg}\theta\right) = \rho\frac{\partial^2 u_r}{\partial t^2},\\ \frac{\partial\sigma_{r\theta}}{\partial r} + \frac{1}{r}\frac{\partial\sigma_{\theta\theta}}{\partial\theta} + \frac{1}{r}\left(3\sigma_{r\theta} + \sigma_{\theta\theta}\operatorname{ctg}\theta\right) = \rho\frac{\partial^2 u_\theta}{\partial t^2},\end{gathered} \qquad (8)$$

где σ_{ij} – компоненты тензора напряжений, а u_r, u_θ – проекции на оси координат вектора смещений $\mathbf{u}$.

Компоненты тензора напряжений выражаются через компоненты вектора смещения посредством обобщенного закона Гука, который для случая трансверсально изотропного упругого материала с осью симметрии направленной по оси r имеет вид [14]

$$\begin{pmatrix}\sigma_{rr}\\ \sigma_{\theta\theta}\\ \sigma_{\varphi\varphi}\\ \sigma_{\theta\varphi}\\ \sigma_{r\varphi}\\ \sigma_{r\theta}\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}\lambda_{11} & \lambda_{12} & \lambda_{12} & 0 & 0 & 0\\ \lambda_{12} & \lambda_{22} & \lambda_{23} & 0 & 0 & 0\\ \lambda_{12} & \lambda_{23} & \lambda_{22} & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & \lambda_{22}-\lambda_{23} & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2\lambda_{55} & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2\lambda_{55}\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\varepsilon_{rr}\\ \varepsilon_{\theta\theta}\\ \varepsilon_{\varphi\varphi}\\ \varepsilon_{\theta\varphi}\\ \varepsilon_{r\varphi}\\ \varepsilon_{r\theta}\end{pmatrix}, \qquad (9)$$

где ε_{ij} – компоненты тензора малых деформаций. Заметим, в силу симметрии рассматриваемой задачи и независимости от координаты φ, компоненты $\varepsilon_{\varphi\varphi}$, $\varepsilon_{\theta\varphi}$ и $\varepsilon_{r\varphi}$ равны нулю.

Тензор модулей упругости содержит 5 независимых параметров λ_{11}, λ_{12}, λ_{22}, λ_{23}, λ_{55}. Таким образом, в качестве искомых неизвестных параметров внешнего упругого слоя выступают 6 величин: плотность ρ и модули упругости λ_{11}, λ_{12}, λ_{22}, λ_{23}, λ_{55}.

Рассматривая установившийся процесс рассеяния звуковой волны упругим шаром следует положить зависимость от времени всех характеристик движения такой же, что и в падающей волне, т. е. $\exp(-i\omega t)$. Далее этот множитель будем опускать.

Граничные условия на поверхности $r = R$ – границе сопряжения идеальной жидкости и упругого материала – состоят в требованиях равенства нормальных составляющих смещения (скорости), равенства нормальных напряжений и отсутствия касательных напряжений. На поверхности $r = R_0$ будем рассматривать условия непрерывности кинематических и динамических характеристик колебаний. Таким образом, совокупность граничных условий может быть представлена системой:

$$\begin{aligned} &r = R: \quad \partial u_r / \partial t = V_{1r}, \quad \sigma_{rr} = -p_1, \quad \sigma_{r\theta} = 0; \\ &r = R_0: \quad u_r = u_{0r}, \quad u_\theta = u_{0\theta}, \quad \sigma_{rr} = \sigma_{0rr}, \quad \sigma_{r\theta} = \sigma_{0r\theta}; \end{aligned} \tag{10}$$

где V_{1z}, u_{0j} – компоненты векторов (3), (6); $p_1 = -\rho_1 \dfrac{\partial \Psi_1}{\partial t}$ – давление звука в области Ω_1; σ_{0ij} – компоненты тензора напряжений в изотропной части шара.

Решая уравнения (4) и (7) методом разделения переменных [14], получим представление потенциалов в виде разложений:

$$\Psi_s = \sum_{n=0}^{\infty} A_n h_n(k_1 r) P_n(\cos\theta),$$

$$\Psi_0 = \sum_{n=0}^{\infty} B_{1n} j_n(k_l r) P_n(\cos\theta), \quad \Phi_0 = \sum_{n=0}^{\infty} B_{2n} j_n(k_\tau r) P_n(\cos\theta), \tag{11}$$

где $h_n(x)$ – сферическая функция Ханкеля первого рода порядка n; $P_n(x)$ – полином Лежандра степени n; $k_l = \omega / c_l$, $k_\tau = \omega / c_\tau$ – волновые числа продольных и поперечных волн во внутренней части шара; $j_n(x)$ – сферическая функция Бесселя первого рода порядка n. Выбор типа сферических функций Бесселя производится на основании требования условий излучения (5) и условий ограниченности значений потенциалов Ψ_0, Φ_0 в начале координат.

Для решения уравнений движения (8) разложим компоненты смещения и тензора напряжений в упругом анизотропном слое по полиномам Лежандра:

$$u_r = \sum_{n=1}^{\infty} u_{1n}(r) P_n(\cos\theta), \quad u_\theta = \sum_{n=1}^{\infty} u_{2n}(r) P_n(\cos\theta),$$

$$\sigma_{rr} = \sum_{n=1}^{\infty} \sigma_{1n}(r) P_n(\cos\theta),\ \sigma_{r\theta} = \sum_{n=1}^{\infty} \sigma_{2n}(r) P_n(\cos\theta).$$

Подставляя эти представления в уравнения движения (8) и закон Гука (9) и используя ортогональность полиномам Лежандра, получим для каждого n следующую систему обыкновенных дифференциальных уравнений для функций $u_{1n}(r)$, $u_{2n}(r)$, $\sigma_{1n}(r)$, $\sigma_{2n}(r)$:

$$\mathbf{U}' = C\mathbf{U} + D\mathbf{P}, \quad \mathbf{P}' = E\mathbf{U} + F\mathbf{P}, \tag{12}$$

где $\mathbf{U} = (u_{1n}, u_{2n})^T$, $\mathbf{P} = (\sigma_{1n}, \sigma_{2n})^T$, штрих обозначает дифференцирование по r; $C = \frac{1}{r}\begin{pmatrix} -2a & n_1 a \\ -1 & 1 \end{pmatrix}$; $D = \begin{pmatrix} 1/\lambda_{11} & 0 \\ 0 & 1/\lambda_{55} \end{pmatrix}$; $F = \frac{1}{r}\begin{pmatrix} 2(a-1) & n_1 \\ -a & -3 \end{pmatrix}$;

$E = \frac{1}{r^2}\begin{pmatrix} -2b - \rho r^2\omega^2 & n_1 b \\ 2(\lambda_{44} - c) & n_1 c - 2\lambda_{44} - \rho r^2\omega^2 \end{pmatrix}$; $a = \lambda_{12}/\lambda_{11}$; $n_1 = n+1$;

$b = 2a\lambda_{12} - \lambda_{22} - \lambda_{23}$; $\lambda_{44} = (\lambda_{22} - \lambda_{23})/2$; $c = \lambda_{22} - a\lambda_{12}$.

Из граничных условий (10) можно получить выражения для A_n, B_{1n}, B_{2n} через значения функций $u_{1n}(r)$, $u_{2n}(r)$, $\sigma_{1n}(r)$, $\sigma_{2n}(r)$ на поверхностях анизотропного слоя и краевые условия для дифференциальных уравнений (12)

$$\left[\mathbf{P} + G\mathbf{U}\right]_{r=R} = \mathbf{K}, \quad \left[\mathbf{P} + H\mathbf{U}\right]_{r=R_0} = 0, \tag{13}$$

где компоненты матриц G, $\mathbf{K}$, H определяются так, как показано в [10].

Таким образом, для определения коэффициентов A_n, B_{1n} и B_{2n} вначале требуется решение краевой задачи (12), (13). В общем случае ее решение выполняется численно [15].

Предполагается, что для идентификации материальных параметров ρ, λ_{11}, λ_{12}, λ_{22}, λ_{23}, λ_{55} анизотропного покрытия шара проводится серия k экспериментов по определению давления $P = P_1 - P_p$ в рассеянной волне в m точках в окрестности шара для различных частот ω. Действительные значения параметров ρ, λ_{ij} для материала исследуемого слоя обозначим ρ^*, λ_{ij}^*, а измеренные значения давления – P_q^* ($q = 1,2,...,M$ – порядковый номер замера давления $M = k \times m$), P_q^* объединим в вектор $\mathbf{W}^*$. В общем случае можно считать, что при проведении экспериментов по определению P_q^* возможна погрешность – $\boldsymbol{\eta}$ (она может быть связана с неточным заданием величин ω, погрешностями измерения P_q^*)

Решая теоретически задачу об отражении звука упругим слоем в соответствии с (10)-(13) для тех частот, при которых выполнялись измерения, для некоторого набора параметров ρ, λ_{ij}, построим вектор $\mathbf{B}$, составленный из расчетных значений давления P.

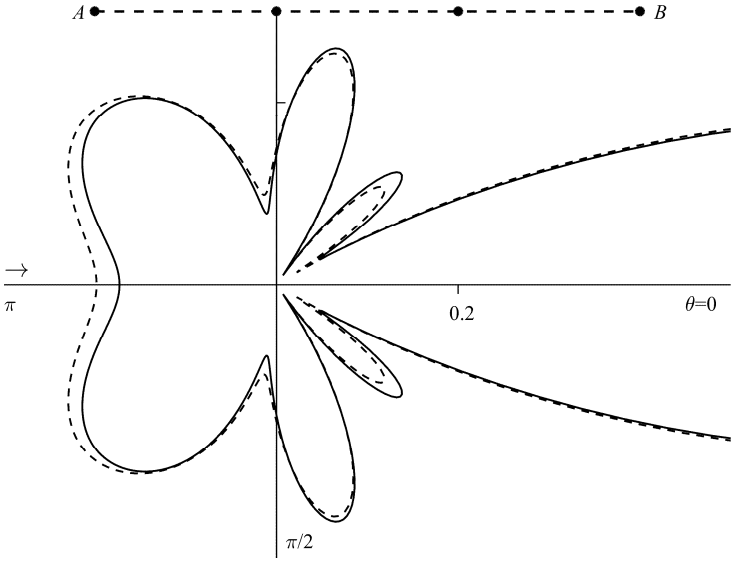


Рис. 2. Влияние модуля упругости λ11

На рис. 2, 3 представлены модельные расчеты $|P|$ для двух типов анизотропного материала покрытия на расстоянии R от поверхности шара.

В качестве параметров изотропной части шара использовались величины: $\rho_0 = 2700\,\text{кг/м}^3$, $\lambda_0 = 5.3\cdot 10^{10}\,\text{Н/м}^2$, $\mu_0 = 2.6\cdot 10^{10}\,\text{Н/м}^2$. Предполагается, что упругий шар помещен в идеальную жидкость с параметрами: $\rho_1 = 1000\,\text{кг/м}^3$, $c_1 = 1485\,\text{м/с}$. Соотношение радиусов определено величиной $R_0/(R-R_0) = 3$. Волновой размер тела задавался значением $k_1 R = 5$.

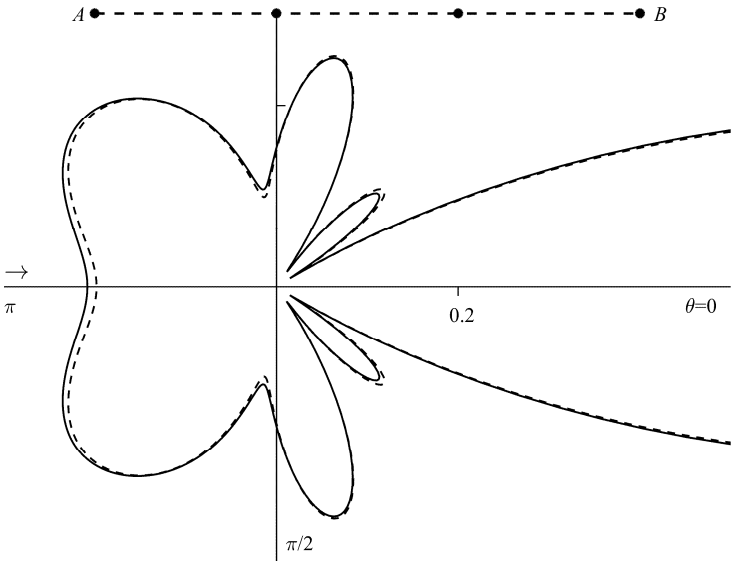


Рис. 3. Влияние модуля упругости λ12

Параметры материала покрытия выбирались почти совпадающими с параметрами изотропной части шара за исключением одного модуля упругости. На рис. 2 в покрытии модуль упругости λ_{11} уменьшен на 20% по сравнению с его значением в изотропной части шара (ниже такое покрытие называется покрытием типа 1). На рис. 3 в покрытии подобным образом изменен модуль упругости λ_{12} (далее обозначается как покрытие типа 2).

На рисунках представлена зависимость нормированного значения $|P|$ от угла θ. Пунктирной линией представлены значения для случая, когда материал покрытия совпадает с материалом изотропной части шара. Показаны участки зависимостей для $\theta > 30^\circ$, где видны явные отличия значений, полученных для случая анизотропного покрытия и без него. Из анализа подобных диаграмм можно определить наиболее информативные области для идентификации наличия, типа и степени анизотропии покрытия шара. Например, на представленных рисунках видно, что для рассматриваемых типов анизотропии покрытия эффект введения анизотропии больше проявляется в окрестности угла обратного отражения $\theta = 180^\circ$ и в области боковых лепестков при $45^\circ \le \theta \le 95^\circ$. Пунктирными отрезками AB с маркерами показан участок второй области. Далее в расчетах использовалась эта область для получения измеренных значения давления.

Для характеристики степени отличия действительного набора параметров ρ^*, λ_{ij}^* и использованного при расчетах ρ, λ_{ij} будем использовать функцию

$$Q(\rho, \lambda_{ij}) = \left\| \mathbf{W} - \mathbf{W}^* \right\|^2 = \sum_{q=1}^{M} \left(P_q - P_q^* \right)^2 . \qquad (14)$$

Очевидно, что в отсутствии погрешностей при проведении экспериментов по определению P_q^* в том случае, когда при расчетах используются $\rho = \rho^*$, $\lambda_{ij} = \lambda_{ij}^*$, функция (14) должна обращаться в 0. Следовательно, задачу поиска параметров анизотропного слоя ρ^*, λ_{ij}^* можно сформулировать как задачу

$$Q(\rho, \lambda_{ij})\Big|_{(\rho, \lambda_{ij}) \in D_f} \to \min , \qquad (15)$$

где D_f определяет диапазон изменения параметров в соответствии с (1) и некоторыми дополнительными ограничениями, например, шагом изменения, при поиске.

Задача минимизации (15) является нелинейной задачей оптимизации функции многих переменных. Поскольку тип функциональной зависимости Q от ее параметров оценить не представляется возможным, то

метод решения задачи (15) стоит выбирать, исходя из того, что характер зависимости $Q(\rho,\lambda_{ij})$ от ее параметров может быть достаточно общим. Для поиска параметров анизотропии покрытия упругого слоя на основе задачи (15) использовался алгоритм минимизации функции $Q(\rho,\lambda_{ij})$ на основе комбинации методов случайного поиска и покоординатного спуска [16].

На рис. 4 показана возможная схема размещения датчиков давления для идентификации параметров анизотропии при условиях, подобных условиям, при которых проводились описанные выше расчеты.

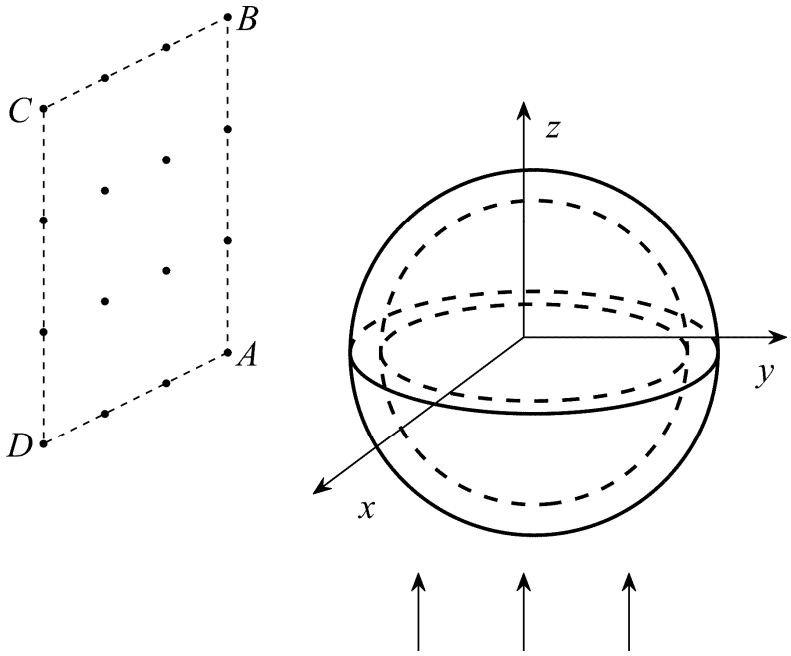


Рис. 4. Схема размещения датчиков давления

Датчики предлагается разместить на плоском квадратном участке $ABCD$ так, чтобы вектор $\mathbf{k}_1$ был параллелен его поверхности, а одна из сторон направлена по вектору $\mathbf{k}_1$. Пусть плоскость $ABCD$ отстоит от поверхности шара на расстояние β, а сторона $ABCD$ равна α. Тогда в соответствии с участком AB, выбранном на рис. 2, 3 можно задать координаты вершин области $ABCD$ так: $A(0,\beta,-\alpha/3)$, $B(0,\beta,2\alpha/3)$, $C(\alpha,\beta,2\alpha/3)$, $D(\alpha,\beta,-\alpha/3)$. Пусть на участке $ABCD$ равномерно расположены датчики давления, например, так, как показано на рис. 4.

На рис. 5-7 иллюстрируется поле давлений в рассеянной волне, которое можно зафиксировать в окрестности шара с покрытием. Расчеты проводились для случая $\alpha = 3R$ и $\beta = R$ в условиях свойств материалов и параметров падающей волны, описанных выше. На графиках строится поверхность характеристики давления $p' = \mathrm{Re}(P_S)/(\rho_1\omega)$ в рассеянной волне в области $ABCD$. На горизонтальных осях координат откладываются относительные координаты $x' = x/R$, $z' = z/R$ в пределах квадрата $ABCD$.

На рис. 5 показана поверхность p' в случае отсутствия анизотропного покрытия. Диапазон значений величины p' образует интервал $[-0.2, 0.2]$. Маркерами в виде точек обозначены значения, которые могут быть зафиксированы в системе датчиков со схемой размещения, представленной выше.

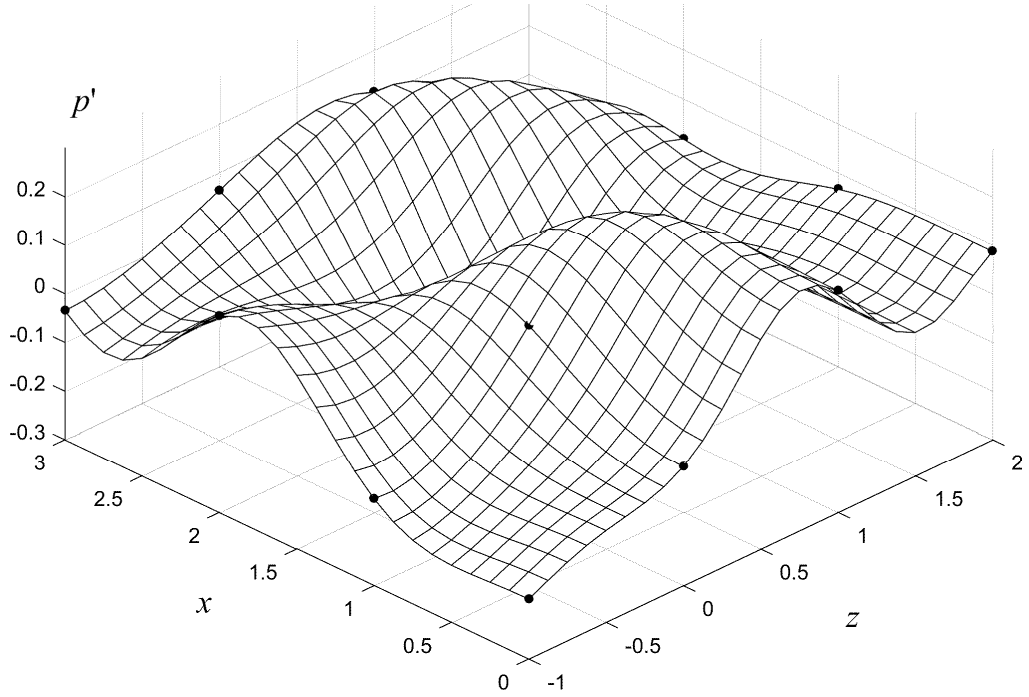


Рис. 5. Давление в рассеянной волне для шара без покрытия

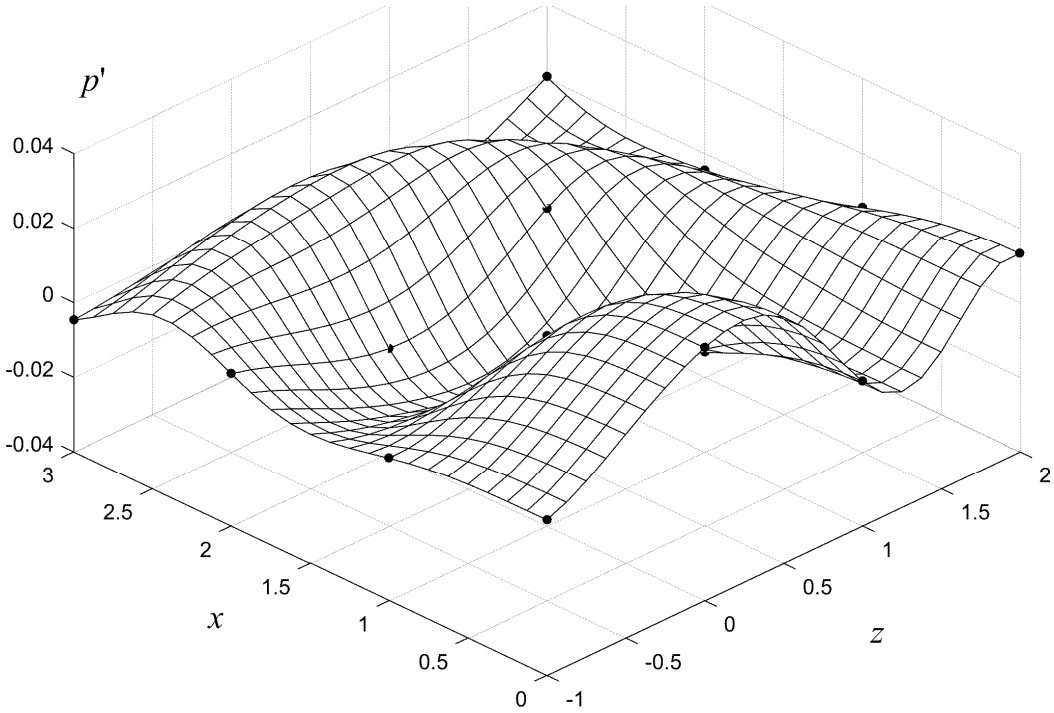


Рис. 6. Отклонение давления для покрытия типа 1

Графики на рис 6 и 7 показывают не саму характеристику давления p', а ее отклонение от соответствующей величины в случае шара без покрытия, т. е. от значений, представленных на рис 5. Как видно, масштаб значений этих отклонений на порядок ниже, чем само давление в рассеянной волне.

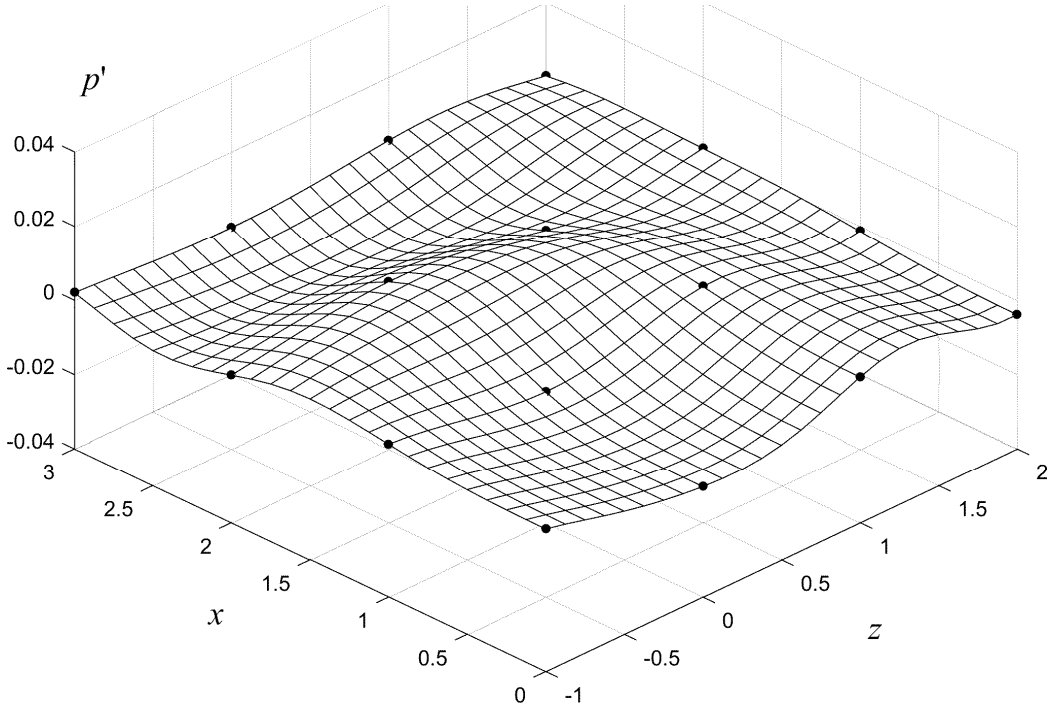


Рис. 7. Отклонение давления для покрытия типа 2

Рис. 6 показывает, что в пределах области $ABCD$ есть ряд участков, в которых влияние анизотропии покрытия типа 1 проявляется в отклонении давления до 10%. Значения, представленные на рис. 7, показывают, что влияние анизотропии покрытия типа 2 меньше в 2-3 раза, и при наличии погрешностей в измерениях его трудно будет идентифицировать. Однако сравнение поверхностей отклонения p' показывает, что отклонение, связанное с анизотропией типа 2 на большей части участков имеет другой знак. Это показывает, что алгоритм поиска параметров анизотропии покрытия может быть уточнен, если использовать не только величину абсолютного отклонения, но и учитывать направление отклонения на отдельных участках измерения.

Таким образом, проведенный анализ показывает, что в целом предлагаемый алгоритм может быть использован для идентификации параметров анизотропии покрытия шара, но для уточнения результатов определения параметров материала можно использовать априорную информацию о характере анизотропии.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Тульской области (проект № 16-41-710083) и Министерства образования и науки РФ (госзадание № 1.1333.2014).

Список литературы

1. Faran J.J. Sound scattering by solid cylinders and spheres // J. Acoust. Soc. Amer. 1951. V. 23. P. 405-420.

2. Hickling R. Analysis of echoes from a solid elastic sphere in water // J. Acoust. Soc. Amer. 1962. V. 34, P. 1582-1592.

3. Кулько В.Ф., Михнова М.С. Резонансные явления, возникающие при падении акустических волн на шар // Отбор и передача информации (Киев) 1979. № 58. С. 128-132.

4. Flax L., Gaunaurd G.C., Uberall H. Theory of resonance scattering / Physical Acoustics. 1981. V. 15. P. 191-294.

5. David H.Y. Yen Interaction of a Plane Acoustic Wave with an Elastic Spherical Shell // J. Acoust. Soc. Amer. 1970. V. 47. P. 1325-1333.

6. Векслер Н.Д. Дифракция плоской звуковой волны на полой упругой сфере // Акустический журнал. 1975. Т. 21. Вып. 5. С. 321-335.

7. Толоконников Л.А., Филатова Ю.М. Дифракция плоской звуковой волны на упругом шаре с произвольно расположенной сферической полостью // Известия Тульского государственного университета. Естественные науки. 2010. Вып. 1. С. 115-123.

8. Guild M.D., Alu A., Haberman M.R. Cancellation of acoustic scattering from an elastic sphere // J. Acoust. Soc. Amer. 2011. V. 129. P. 1355-1365.

9. Толоконников Л.А. Рассеяние плоской звуковой волны упругим шаром с неоднородным покрытием // Прикладная математика и механика, 2014. Т. 78, Вып. 4. С. 519-526.

10. Скобельцын С.А., Толоконников Л.А. Рассеяние звука неоднородным трансверсально-изотропным сферическим слоем // Акустический журнал. 1995. Т. 41. № 6. С. 917-923

11. Исакович М.А. Общая акустика. М.: Наука, 1973. 496 с.

12. Новацкий В. Теория упругости. М.: Мир, 1975. 872 с.

13. Скучик Е. Основы акустики, Т. 2. М.: Мир, 1976. 542 с.

14. Кошляков Н.С., Глинер Э.Б., Смирнов М.М. Уравнения в частных производных математической физики. М.: Высшая школа, 1970. 712 с.

15. Бахвалов Н.С., Жидков Н.П., Кобельков Г.М. Численные методы [Электронный ресурс]. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012. 636 с.

16. Васильев Ф.П. Численные методы решения экстремальных задач М.: Наука, 1988. 549 с.

Скобельцын Сергей Алексеевич, канд. физ.-мат. наук, доц., skbl@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

PARAMETERS IDENTIFICATION
OF ANISOTROPIC COATING OF ELASTIC SPHERE
ON THE SOUND REFLECTION

S.A. Skobeltsyn

The problem of determining the values of the density and elastic modules transversely isotropic inhomogeneous coating elastic sphere is considered. For solution using sound pressure in the vicinity of the sphere in the scattering of a plane sound wave. The initial data are the material parameters of the isotropic part of the inner ball and the range of variation of the coating parameters. The value of the parameters of the coating material is proposed to seek solution to the problem by minimizing the function of many variables. This function is a measure of the deviation of the measured pressure values in the scattered sound waves and their values obtained from the numerical solution of the problem of diffraction.

Key words: sound diffraction, harmonic plane wave, elastic sphere, inverse problem.

Skobeltsyn Sergey Alekseevich, candidate of physical and mathematical sciences, docent, skbl@rambler.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 658.562:621.9

ПРОГРАММНЫЙ МОДУЛЬ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СИНТЕЗА БУНКЕРНОГО ЗАГРУЗОЧНОГО УСТРОЙСТВА С ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ВОРОНКОЙ НА ЗАДАННУЮ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ

М.К. Галонска, В.В. Прейс

Рассматривается программный модуль параметрического синтеза бункерного загрузочного устройства с вращающейся воронкой на заданную производительность. Построение программного модуля базируется на оригинальной математической модели производительности, разработанной соавторами.

Ключевые слова: бункерное загрузочное устройство, вращающаяся воронка, производительность, параметрический синтез, программный модуль.

Автоматическая загрузка технологических роторных машин (РМ) штучными предметами обработки с производительностью до 300…400 шт./мин может осуществляться стационарными системами автоматической загрузки (САЗ), а с более высокой производительностью – роторными САЗ, представляющими собой многопозиционные непрерывно вращающиеся системы, построенные по принципу технологических РМ [1 - 3].

Надежность любой технологической РМ, а особенно сборочной РМ, во многом определяется надежностью роторной САЗ, которая на стадии проектирования обеспечивается рациональным выбором её расчетных технических параметров с учетом функциональных и параметрических отказов САЗ и эффективной стратегии обслуживания. Перспективным направлением повышения надежности роторных САЗ является создание резервированных систем методами замещения с ненагруженным или нагруженным резервом [4 - 8].

В структуре роторных САЗ широко применяют бункерные загрузочные устройства (БЗУ) с захватывающими органами в виде вращающихся воронок, теоретические основы проектирования и расчета которых были представлены в работах [9 - 12]. Авторами обосновано, что наиболее эффективным способом, позволяющим интенсифицировать процесс захвата предметов обработки, является подбор рациональной конфигурации приемной части вращающейся воронки, в общем случае, криволинейного профиля, поскольку это не требует введения никаких дополнительных элементов в захватный механизм БЗУ [13]. Математическая задача поиска рациональной конфигурации приемной части воронки формулировалась следующим образом: подобрать вид аналитической непрерывной функции, описывающей образующую приемной части воронки, и найти такие её параметры, которые удовлетворяют принятым конструктивным ограничениям и обеспечивают экстремальное значение критерия выбора [14].

Захватные механизмы БЗУ с вращающимися воронками криволинейного профиля более производительны, надежны и экономичны. Они обеспечивают расширение технологических возможностей роторных БЗУ по захвату различных типоразмеров осесимметричных предметов обработки формы тел вращения и наилучшие условия для унификации конструкций захватных механизмов БЗУ. Применение БЗУ с вращающимися воронками позволяет создавать эффективные роторные САЗ, обеспечивающие требуемую фактическую производительность в рациональных габаритах системы [15 - 17].

При проектировании БЗУ с вращающейся воронкой решаются следующие задачи параметрического синтеза БЗУ: исходя из физико-технических параметров загружаемых предметов обработки, обеспечить выбор рациональной конфигурации приемной части воронки и её геометрических параметров, а затем определить частоту вращения воронки, обеспечивающую требуемую фактическую производительность БЗУ.

С целью автоматизированного выбора рациональной конфигурации приемной части воронки, имеющей криволинейный профиль или составленной из двух сопряженных конусов, предназначенной для захвата равноразмерных или близких к ним предметов обработки, был разработан программный модуль параметрического синтеза [18]. Программный модуль разработан с использованием стандартного пакета *Visual Basic 6.0* по аналогии с известными программными продуктами и содержит большой набор сервисных функций, необходимых для повышения производительности расчетов и упрощения организации работы конструктора.

Программный модуль предусматривает работу в режимах расчета методом оптимизированного дискретного перебора и верификации. Расчет методом оптимизированного дискретного перебора позволяет определить параметры функций, формирующие оптимальные конфигурации, соответствующие им геометрические размеры воронки и значения критериев выбора. Исходными данными для расчета служат параметры предмета обработки: длина l, диаметр d, масса m, коэффициент трения скольжения $\mu_{тр}$, продольное положение центра масс.

В режиме верификации проводится детальный анализ результатов, полученных методом оптимизированного перебора: корректировка параметров функций, анализ влияния параметров на геометрические размеры воронки, графическое построение конфигурации воронки и схем для определения частных критериев выбора, распечатка результатов. Имеется возможность сохранения рассчитанной базы в отдельном текстовом файле для возврата к данному расчету без необходимости повторного ввода исходных данных и повторного проведения расчета.

После выбора эффективной конфигурации приемной части вращающейся воронки переходят к определению частоты вращения воронки, обеспечивающей требуемую производительность БЗУ.

Фактическая производительность [шт./мин] однопозиционного БЗУ с захватывающими органами в виде вращающихся воронок

$$\Pi_{\text{ф}} = c_{\max}\omega \cdot \eta, \qquad (1)$$

где $c_{\max}$ – максимальное число предметов обработки, которое может быть захвачено одной воронкой за один кинематический цикл; ω – частота вращения воронки, об./мин; η – коэффициент выдачи БЗУ.

Коэффициент выдачи БЗУ определим как произведение «условных вероятностей перехода» (по определению проф. М.В. Медвидя)

$$\eta = \prod_{i=1}^{5} p_i. \qquad (2)$$

Вероятность p_1 перевода предмета обработки из устойчивого положения поперек выходного отверстия воронки в положение вдоль образующей приемной части воронки, благоприятное для захвата представим в виде выражения

$$p_1 = e^{-4{,}6e^{-6{,}1K_P}}. \qquad (3)$$

где $K_p = \dfrac{\theta_1}{\theta_2}$ – критерий, характеризующий возможность перевода предмета обработки из устойчивого положения поперек входного отверстия воронки в положение вдоль образующей приемной части воронки, благоприятное для захвата, следующего отношения; $\theta_1 = (\pi/2 - \alpha_{\text{уд}})$ – угол, характеризующий положения предметов обработки в зоне захвата, при которых возможно удаление поперек лежащего предмета обработки; $\alpha_{\text{уд}}$ – минимальное значение угла наклона образующей приемной части воронки, при котором возможно удаление поперек лежащего предмета обработки под действием предмета, находящегося на поверхности приемной части; $\theta_2 = (\pi/2 - \alpha_{\text{бунк}})$ – угол, характеризующий все возможные положения предметов обработки в зоне захвата; $\alpha_{\text{бунк}}$ – угол наклона образующей конического дна бункера БЗУ.

Величину угла $\alpha_{\text{уд}}$ определяют, решая уравнение

$$\text{tg}^4\frac{\alpha_{\text{уд}}}{2} + 2\frac{B}{C}\text{tg}^3\frac{\alpha_{\text{уд}}}{2} + 2\left(1 - 2\frac{A}{C}\right)\text{tg}^2\frac{\alpha_{\text{уд}}}{2} - 2\frac{B}{C}\text{tg}\frac{\alpha_{\text{уд}}}{2} + 1 = 0, \qquad (4)$$

где

$$A = \left(1 + \mu_{\text{тр}}^2\right)\left[1 - \left(\frac{2}{l/d} + \text{tg}\varphi\right)\mu_{\text{тр}}\right]\text{tg}\varphi; \quad B = \left(1 + \mu_{\text{тр}}^2\right)\left[1 - \left(\frac{2}{l/d} + \mu_{\text{тр}}\right)\text{tg}\varphi\right];$$

$$C = \mu_{\text{тр}}\left\{2 + \left[\left(1 - \mu_{\text{тр}}^2\right)\text{tg}\varphi - \left(1 + \mu_{\text{тр}}^2\right)\frac{2}{l/d}\right]\text{tg}\varphi\right\}; \; \varphi = 50^\circ ... 60^\circ.$$

Вероятность p_2 западания в выходное отверстие воронки предмета обработки, находящегося в благоприятном положении определяют как

$$p_2 = e^{-4,6e^{-6,1K_{M\text{ср}}}}, \tag{5}$$

$$K_{M_{\text{ср}}} = \frac{2}{mg(D_{\text{вх}} + D_{\text{вых}})} \times \frac{\sum_{i=1}^{N}(M_\Sigma)_i}{N}, \tag{6}$$

где $D_{\text{вх}}$ – входной диаметр приемной части воронки; $D_{\text{вых}}$ – выходной диаметр приемной части воронки на расстоянии $L = (1,1\ldots2)\,l$ от входа в воронку (L – длина приемной части воронки); N – число расчетных положений предмета обработки на всем протяжении её возможного перемещения по образующей приемной части воронки из начального положения в конечное; $(M_\Sigma)_i$ – сумма моментов сил относительно i-й точки касания предмета обработки о поверхность приемной части воронки.

Сумму моментов $(M_\Sigma)_i$ сил относительно i-й точки касания для симметричного предмета обработки определяют по выражению

$$(M_\Sigma)_i = m\,g\left\{\begin{array}{l} x_i + \dfrac{D_{\text{вых}}}{2} - \dfrac{d}{2}\sin\alpha_i - \dfrac{l}{2}\cos\alpha_i + \\ + \dfrac{\operatorname{tg}\alpha_i - \mu_{\text{тр}}}{2\mu_{\text{тр}}\sin\alpha_i + \left(1-\mu_{\text{тр}}^2\right)\cos\alpha_i} \times \\ \times\left[\left(x_i + \dfrac{D_{\text{вых}}}{2}\right)\left(\sin\alpha_i - \mu_{\text{тр}}\cos\alpha_i\right) - d\right] \end{array}\right\}, \tag{7}$$

где $\alpha_i = \operatorname{arctg}\left(\dfrac{dy}{dx}\right)_i$.

Вероятность p_3 того, что захвату предметов обработки не помешает их взаимная сцепляемость, характеризуемая их геометрической формой и величиной коэффициента трения между сопрягающимися поверхностями предметов для цилиндрических предметов обработки определяют по известной зависимости

$$p_3 = 1 - \frac{\operatorname{arctg}\mu_{\text{тр}}}{\pi} \times \frac{0,9 + 1,4\dfrac{l}{d}}{1 + 2\dfrac{l}{d}}. \tag{8}$$

Вероятность p_4 вероятность того, что процесс захвата предметов обработки произойдет в течение одного кинематического цикла работы (одного оборота) захватывающей воронки определяют по выражению

$$p_4 = \frac{1}{1 + \dfrac{a_1 c_{\max} \sqrt{\dfrac{l}{d} K_\omega}}{2\pi \sqrt{\left(\sin \alpha_{\text{бунк}} - \mu_{\text{тр}} \cos \alpha_{\text{бунк}}\right)}}}, \qquad (9)$$

где a_1 - эмпирический коэффициент, учитывающий приближенный характер выражения; $K_\omega = \dfrac{\pi^2}{900} \cdot \dfrac{\omega^2 d}{2g}$ - безразмерный динамический параметр.

Выражение для определения вероятности p_5 того, что скорость потока предметов обработки на выходе БЗУ при негативном действии центробежных сил инерции, возникающих от вращения захватывающей воронки, будет близка к её максимальному значению, имеет вид

$$p_5 = \sqrt{1 - a_2 K_\omega \left(\frac{D}{d} - 1\right) \mu_{\text{тр}}}, \qquad (10)$$

где a_2 - эмпирический коэффициент, учитывающий приближенный характер данного выражения.

Математическая модель производительности БЗУ с вращающимися воронками криволинейного профиля (1) – (10) реализована с применением пакета прикладных математических программ *MathCad Pro* (см. в [16]).

Для решения этой задачи параметрического синтеза БЗУ был разработан программный модуль, позволяющий моделировать фактическую производительность БЗУ в зависимости от параметров загружаемого предмета обработки, параметров выбранной конфигурации приемной части воронки и частоты её вращения. Программный модуль параметрического синтеза БЗУ на требуемую производительность также разработан с использованием стандартного пакета *Visual Basic 6.0* (рисунок).

Входными параметрами моделирования производительности БЗУ являются:

- геометрические параметры предмета обработки, вращающейся воронки и бункера БЗУ;

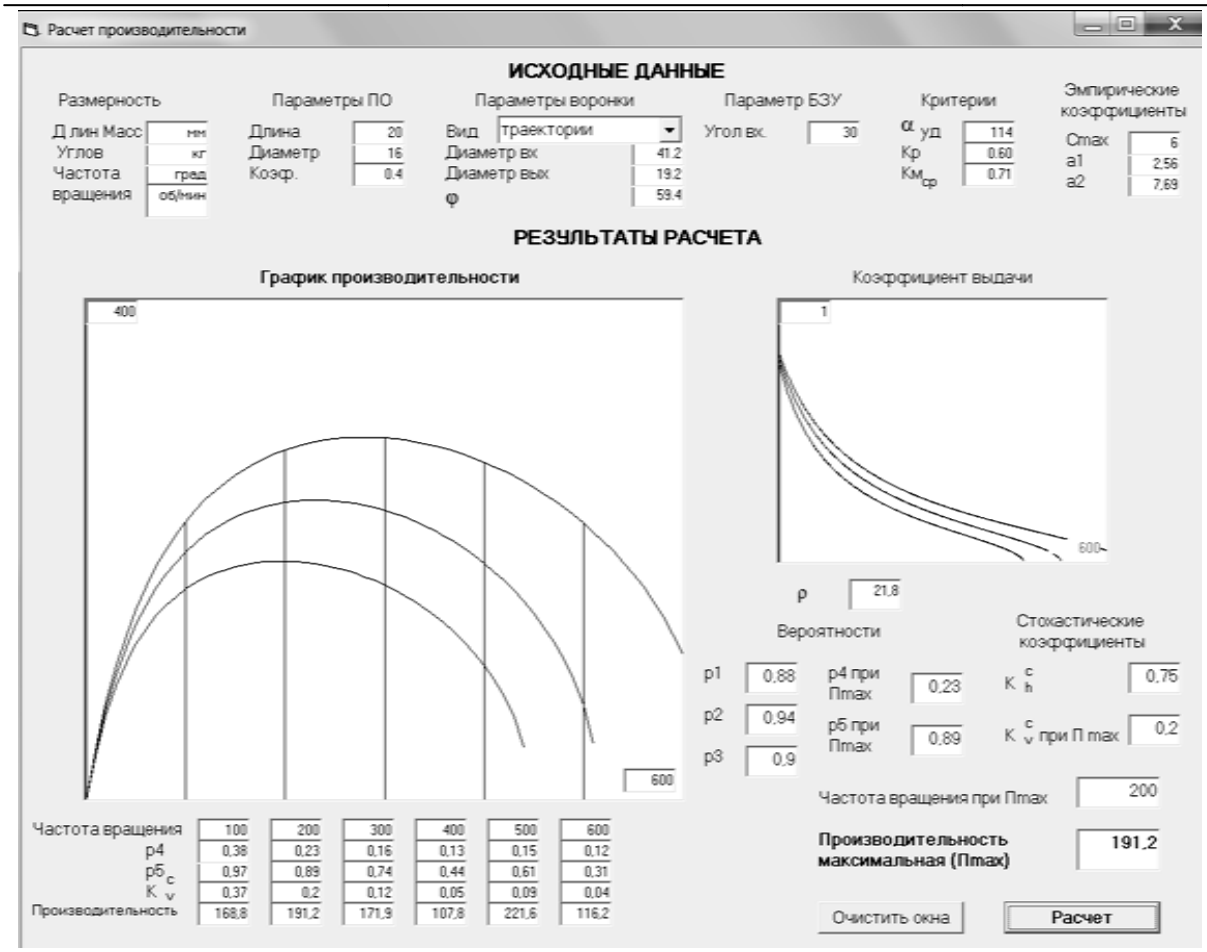
- минимальное значение угла наклона образующей приемной части воронки в зоне захвата, при котором возможно удаление поперек лежащего предмета $\alpha_{\text{уд}}$;

- критерий удаления поперек лежащего предмета $K_{\text{р}}$ и критерий вращательного момента $K_{\text{Мср}}$;

- максимальное число предметов обработки, которое может быть захвачено воронкой за один кинематический цикл $c_{\max}$;

- эмпирические коэффициенты a_1, a_2;

- диапазон варьирования частоты вращения воронки ω.



Интерфейс программного модуля параметрического синтеза бункерного загрузочного устройства на заданную производительность

Для повышения сервиса проектирования в программном модуле предусмотрена возможность вывода одновременно нескольких графиков производительности БЗУ (левое окно интерфейса) и коэффициента выдачи (правое окно интерфейса), например, для различных значений коэффициента трения (см. рисунок).

Разработанный программный модуль позволяет:

- анализировать значения вероятностей перехода предмета обработки, входящих в математическую модель производительности БЗУ;

- определить максимальное значение фактической производительности БЗУ и соответствующую ей частоту вращения воронки;

- выбрать частоту вращения воронки для достижения требуемой фактической производительности БЗУ;

- проанализировать и скорректировать выбор конфигурации приемной части воронки, исходя из требуемой производительности БЗУ и частоты вращения воронки, используя результаты параметрического синтеза рациональной конфигурации приемной части воронки.

Разработанные программные модули при введении соответствующих редакторов связей, могут быть использованы для автоматического формирования программно-технологического алгоритма автоматизированного изготовления вращающихся воронок БЗУ на станочных комплексах с ЧПУ.

Дальнейшее развитие работ в этом направлении связано с созданием универсальных и интегрированных программных комплексов параметрического синтеза оптимальных конфигураций вращающихся воронок как для равноразмерных, так и для стержневых длинномерных предметов обработки с последующим параметрическим синтезом БЗУ как стационарных, так и роторных САЗ на заданную производительность. Создание таких программных комплексов будет базироваться на разработанных авторами оригинальных математических моделях и результатах теоретических и экспериментальных исследований роторных БЗУ с вращающимися воронками [19 - 23].

Конечной целью проводимых научно-исследовательских работ является создание математического, методического и программного обеспечения интегрированной САПР стационарных и роторных САЗ, имеющих в своей структуре БЗУ с вращающимися воронками, для загрузки осесимметричных предметов обработки формы тел вращения.

Список литературы

1. Прейс В.В. Автоматизация загрузки дискретных деталей в роторные и роторно-конвейерные линии // Кузнечно-штамповочное производство.1987. № 1. С. 12-15.

2. Прейс В.В. Роторные системы автоматической загрузки штучных предметов обработки // Автоматизация и современные технологии. 2002. № 9. С. 3-8.

3. Прейс В.В. Системы автоматической загрузки штучных предметов обработки в роторные и роторно-конвейерные линии // Вестник машиностроения. 2002. № 12. С. 16-19.

4. Прейс В.В. Модели и оценка надежности роторных систем автоматической загрузки с функциональными отказами // Автоматизация и современные технологии. 2002. № 10. С. 3-8.

5. Прейс В.В. Модели и оценка надежности роторных систем автоматической загрузки с параметрическими отказами // Автоматизация и современные технологии. 2003. № 1. С. 9-15.

6. Прейс В.В. Надежность автоматических роторно-конвейерных линий для сборки многоэлементных изделий // Сборка в машиностроении, приборостроении. № 10. 2003. С. 17-22.

7. Прейс В.В. Резервирование систем автоматической загрузки роторных и роторно-конвейерных линий // Кузнечно-штамповочное производство. 1990. № 6. С. 18-21.

8. Прейс В.В., Беляев С.В., Севрюкова С.В. Пути повышения надежности роторных и роторно-конвейрных линий для сборки многоэлементных изделий // Комплексная автоматизация производства на базе роторных и роторно-конвейерных линий: сборник научных.трудов / под научн. ред. В.В. Прейса. Тула: ИПП «Гриф и К°», 2002. С. 88-96.

9. Прейс В.В. Надежность роторных систем автоматической загрузки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2012. 110 с.

10. Прейс В.В. Основы теории производительности бункерных загрузочных устройств для автоматических роторных линий // Кузнечно-штамповочное производство. 1989. № 5. С. 23-25.

11. Прейс В.В. Математическая модель функционирования роторных бункерных загрузочных устройств поштучно-непрерывного захвата // Кузнечно-штамповочное производство. 1989. № 12. С. 25-27.

12. Прейс В.В., Галонска М.К. Теория и практика создания систем автоматической загрузки роторных и роторно-конвейерных линий // Комплексная автоматизация производства на базе роторных и роторно-конвейерных линий: Сб. науч..труд. / Под науч. ред. В.В.Прейса. Тула: ИПП «Гриф и К°», 2002. С. 56-62.

13. Патент РФ № 42465 на полезную модель. Бункерное загрузочное устройство / М.К. Галонска, В.В. Прейс. Опубл. 10.12.2004. Бюл. № 34.

14. Галонска М.К., Прейс В.В. Математическая постановка задачи синтеза оптимальных конфигураций захватывающих воронок // Комплексная автоматизация производства на базе роторных и роторно-конвейерных линий: Сб. науч..труд. / под научн. ред. В.В. Прейса. Тула: ИПП «Гриф и К°», 2002. С. 72-78.

15. Галонска М.К., Прейс В.В. Повышение эффективности роторных бункерных загрузочных устройств с вращающимися воронками // Автоматизация и современные технологии. 2003. № 11. С. 18-22.

16. Прейс В.В., Галонска М.К. Бункерные загрузочные устройства с вращающимися воронками криволинейного профиля / под ред. В.В. Прейса. Тула: Изд-во ТулГУ. 2004. 128 с.

17. Бочарова И.В., Галонска М.К., Прейс В.В. Прогнозирование производительности роторного бункерного загрузочного устройства с вращающимися воронками криволинейного профиля // Автоматизация и современные технологии. 2008. № 1. С. 3-7.

18. Галонска М.К., Прейс В.В. Программный модуль синтеза оптимальных конфигураций захватывающих воронок бункерного загрузочного устройства // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2011. Вып. 1. С. 123-133.

19. Ионов А.О., Прейс В.В. Аналитическая модель производительности роторного бункерного загрузочного устройства для стержневых предметов обработки // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2010. Вып. 2. Ч. 1. С. 79-85.

20. Ионов А.О., Прейс В.В. Регрессионные модели производительности роторного бункерного загрузочного устройства для стержневых предметов обработки // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2010. Вып. 2. Ч. 1. С. 98-106.

21. Ионов А.О., Прейс В.В. Совершенствование аналитической модели производительности роторного бункерного загрузочного устройства с вращающейся воронкой // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2011. Вып. 5. Ч. 3. С. 27-40.

22. Галонска М.К., Прейс В.В. Модели, варианты и принципы синтеза структур роторных систем автоматической загрузки // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2012. Вып. 12. Ч. 2. С. 30-40.

23. Галонска М.К., Ионов А.О., Прейс В.В. Теоретические основы проектирования роторных бункерных загрузочных устройств с вращающимися воронками // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2013. Вып. 7. Ч. 1. С. 21-29.

Галонска Михаил Константинович, канд. техн. наук, начальник отдела, galonska@tula.net, Россия, Тула, филиал ОАО «Конструкторское бюро приборостроения» - «Центральное конструкторское исследовательское бюро спортивно-охотничьего оружия»,

Прейс Владимир Викторович, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой, rabota-preys@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

A SOFTWARE MODULE PARAMETRIC SYNTHESIS HOPPER FEEDING DEVICE WITH ROTATING FUNNEL GIVEN PRODUCTIVITY

M.K. Galonska, V.V. Preis

We consider the software module parametric synthesis hopper feeding device with a rotating funnel at a given productivity. Building a software module based on the original mathematical model, whether performance, co-developed.

Key words: hopper feeding device, rotating funnel, productivity, parametric synthesis, software modules.

Galonska Michael Konstantinovich, candidate of technical science, the chief of department, galonska@tula.net, Russia, Tula, branch of the Open Society «Design bureau of instrument making» - «Central designer exploratory bureau of the sports-hunting weapon»,

Preis Vladimir Viktorovich, doctore of technical science, professor, manager of chair, rabota-preys@yandex.ru, Russia, Tula, Tula state university

УДК 669.017.118

К ВОПРОСУ О ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ СТАДИЙ СПИНОДАЛЬНОГО РАСПАДА СПЛАВА 75Mn25Cu

Г.В. Маркова, Е.С. Клюева, Е.М. Гринберг, С.С. Гончаров

В ходе старения сплава 75Mn25Cu при температуре 440 °С наблюдается одновременное развитие двух процессов: распад по механизму спинодального расслоения и образование выделений α-Mn. При старении при 540 °С после завершения спинодального распада вначале происходит образование частиц α-Mn на границах зерен, затем область выделения второй фазы охватывает весь объем.

Ключевые слова: марганцево-медные сплавы, спинодальный распад.

Целью данной работы является получение новых данных о последовательности стадий спинодального распада метастабильной γ-фазы и образования частиц стабильной a-Mn фазы в сплаве 75Mn25Cu.

В качестве объекта исследования был выбран порошковый высокомарганцевый сплав 75Mn25Cu, полученный методом горячей экструзии порошковых спеченных заготовок. Химический состав сплава приведен в таблице.

***Химический состав сплава* 75Mn25Cu**

Содержание элемента, мас. %						
Cu	Al	Ni	Fe	S	P	Mn
25	1,2	3	0,03	0,03	0,03	70,71

Образцы для исследований были термообработаны по следующим режимам: отжиг в вакууме при 830 °С в течение 1 часа, закалка в 10 % водном растворе NaCl, затем старение при температурах 440 или 540 °С продолжительностью от 10 мин до 30 ч с последующим охлаждением на воздухе. Как видно из рис. 1, температуры старения соответствуют внутренней части метастабильной области расслоения.

Для измерения микротвердости использовали твердомер ПМТ-3 (нагрузка на индентор – 1 Н, объем выборки параллельных измерений – 50, погрешность измерений не выше 5 %). В качестве меры изменения свойств принимали среднее значение микротвердости $\overline{HV}$ и ее относительное изменение по сравнению с закаленным состоянием

$$\delta_{HV} = \frac{\overline{HV}_{\text{стар}} - \overline{HV}_{\text{зак}}}{\overline{HV}_{\text{зак}}} \cdot 100\%. \qquad (1)$$

Рентгеноструктурные исследования проводили на дифрактометре «ДРОН-2.0» в Со-$К_\alpha$-излучении.

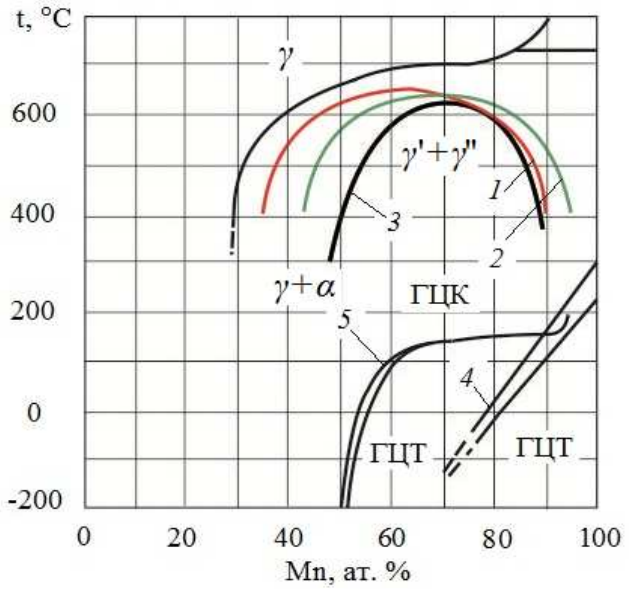


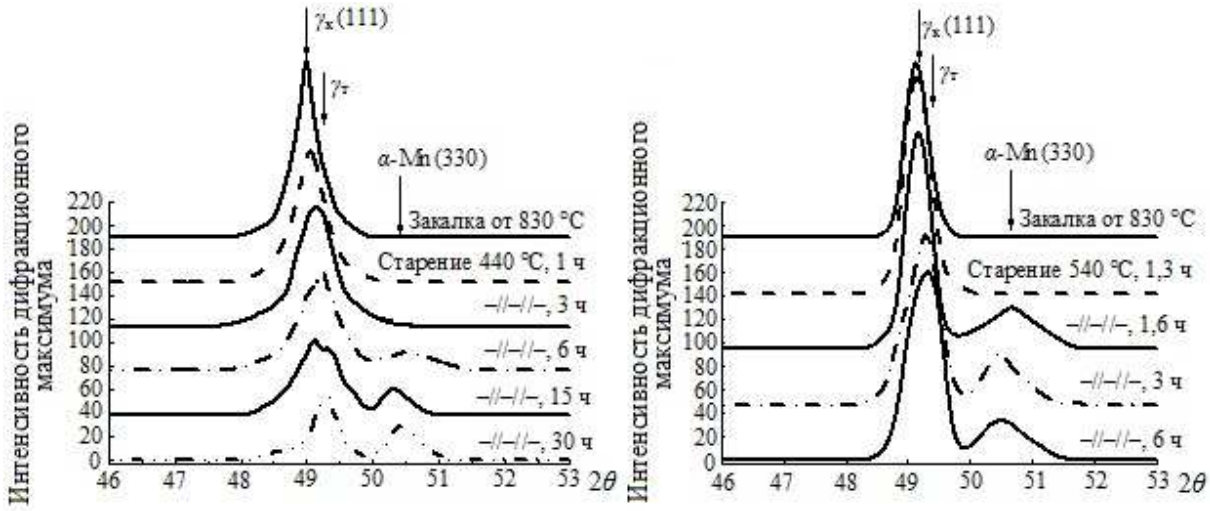
Рис. 1. Фрагмент диаграммы состояния системы* Mn-Cu *[1]: 1 – метастабильная область расслоения; 2 – химическая спинодаль; 3 – когерентная спинодаль; 4 – температуры мартенситного превращения в закаленных сплавах; 5 – температуры мартенситного превращения в состаренных сплавах

Результаты экспериментов. В данной работе значение микротвердости принято в качестве одной из мер развития процесса распада метастабильного твердого раствора при старении. Микротвердость образцов сплава 75Mn25Cu в закаленном состоянии составила 119±3 *HV*.

Известно, что в спинодальной области процесс распада метастабильного твердого раствора при температуре старения 540 °С идет достаточно интенсивно, но при этом остается возможность проведения исследований различных стадий кинетики превращений в закаленном γ-твердом растворе. Выбор более низкой температуры старения (440 °С) связан с тем, что состаренный при этой температуре сплав 75Mn25Cu приобретает наибольшую демпфирующую способность. [1, 2].

Исследование фазового состава и параметров решетки методом рентгеноструктурного анализа было проведено для образцов сплава 75Mn25Cu в закаленном состоянии, после старения при 440 °С продолжительностью от 10 мин до 30 ч (режим 1) или при 540 °С от 20 мин до 6 ч (режим 2).

Установлено, что в закаленном состоянии и после старения по режиму 1 от 10 мин до одного часа или по режиму 2 от 20 до 30 мин исследуемый сплав имеет однофазную структуру ГЦК γ-твердого раствора (рис. 2) с параметром решетки a = 0,3768 нм. Этот результат оказался несколько выше известных значений параметра решетки закаленного сплава 75Mn25Cu a = 0,3743…0,3746 нм [3, 4], что связано с присутствием в сплаве Ni и Al.



а *б*

Рис. 2. Вид рентгенограмм сплава 75Mn25Cu после закалки и старения при 440 °С (а) и 540 °С (б) с различной продолжительностью временем выдержки

Увеличение продолжительности старения при 440 °С приводит к появлению тетрагональной фазы. Как видно из рис. 3, старение в течение времени до 15 ч сопровождается уменьшением параметра *c* и ростом степени тетрагональности (1 - *c*/*a*) элементарной ячейки кристаллической решетки, что свидетельствует о повышении содержания марганца в тетрагональной фазе [5]. После старения в течение 30 ч происходит обеднение $\gamma_т$-фазы марганцем и степень тетрагональности несколько снижается.

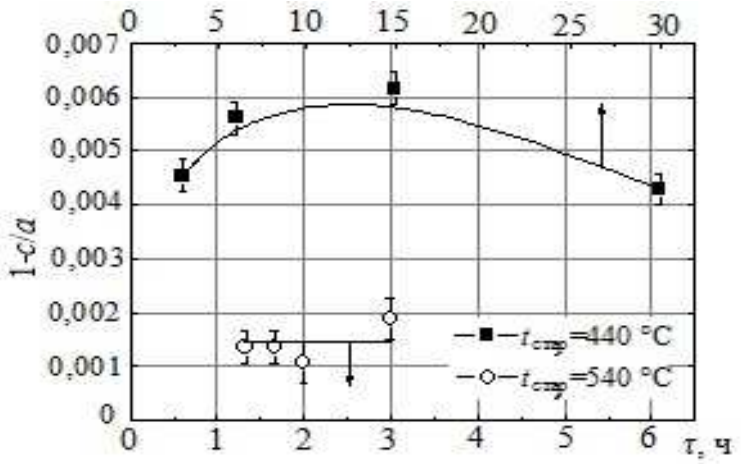


***Рис. 3. Изменение степени тетрагональности при старении сплава* 75Mn25Cu**

Старение при более высокой температуре 540 °С свыше 1,3 ч приводит к уширению рефлекса (111), что свидетельствует о появлении тетрагональной фазы. При этом значения степени тетрагональности оказываются существенно меньше, чем после старения при 440 °С, и мало изменяются при увеличении продолжительности выдержки до 3 ч.

При больших временах старения свыше 6 ч при 440 °С и 1,6 ч при 540 °С на рентгенограмме отмечено появление линии (330) сложной кубической решетки α-Mn (см. рис. 2).

Результаты измерения микротвердости сплава 75Mn25Cu в ходе старения при температурах 440 °С 540 °С приведены на рис. 4.

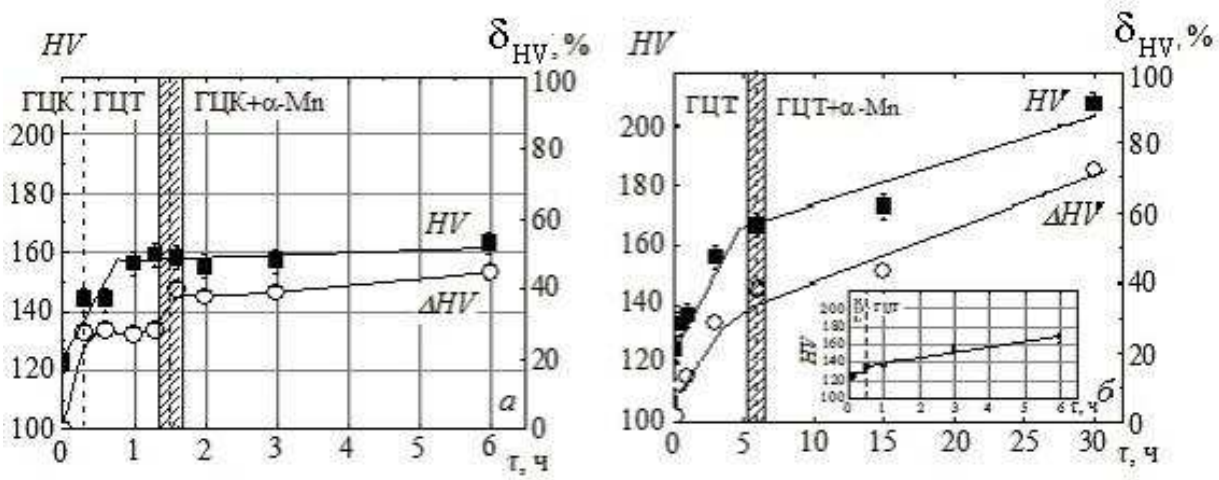


Рис. 4. Зависимость микротвердости от продолжительности старения при 440 °С (а) и 540 °С (б)

Обсуждение результатов.

Полученные результаты изучения кинетики старения показывают, что процессы превращений при распаде метастабильного γ-твердого раствора имеют многостадийный характер.

На первой стадии старения сохраняется однофазная ГЦК структура закаленного сплава. Это означает, что степень расслоения твердого раствора еще недостаточна для того, чтобы температура ГЦК-ГЦТ превращения в обогащенных марганцем областях стала выше комнатной.

На второй стадии при высокотемпературом распаде (540 °С) в процессе выдержки до 1,3 часа, видимо, преобладает расслоение γ-твердого раствора по спинодальному механизму, сопровождающееся образованием областей, обогащенных и обедненных марганцем. Это приводит к формированию при охлаждении слабо тетрагональной мартенситной фазы и некоторому повышению твердости. Кроме того, в обогащенных марганцем областях γ-фазы достигается предельная для этой температуры концентрация Mn и спинодальный распад завершается.

Распад γ-фазы при 440 °С завершается, по-видимому, при при более продолжительной изотермической выдержке при старении свыше 6…15 ч, когда достигается максимальная степень тетрагональности ГЦТ фазы, соответствующая окончанию спинодального расслоения.

После старения в течение 1,6 ч при 540 °С и 6 ч при 440 °С наступает третья стадия распада, в которой основным процессом является образование стабильной фазы α-Mn. Следует отметить, что при высокотемпературном старении выделению *α*-Mn предшествует завершение спинодального распада, в то время, как при 440 °С стабильный α-Mn появляется до достижения предельной концентрации марганца в обогащенных им областях.

Данные рентгеноструктурного анализа были использованы для установления зависимости изменения количества α-Mn в структуре состаренного сплава [6]

$$\Delta V_{\alpha} = \frac{1}{1 + K\left(I_{\gamma} / I_{\alpha}\right)}, \qquad (2)$$

где ΔV_{α} – прирост количества α-Mn, доли; K – коэффициент, характеризующий вклад различных факторов (структурного, температурного, адсорбционного и др.); I_{γ}, I_{α} – интегральные интенсивности линий (111) и (330). При расчете ΔV_{α} принимали следующие значения коэффициента K: $K_{440\,^{\circ}C} = 3{,}028$; $K_{540\,^{\circ}C} = 0{,}73$.

Как видно из рис. 5, при температуре старения 540 °С максимально возможное количество α-Mn выделяется за 2 часа и в дальнейшем не увеличивается. Это подтверждается стабильными значениями твердости (см. рис. 4).

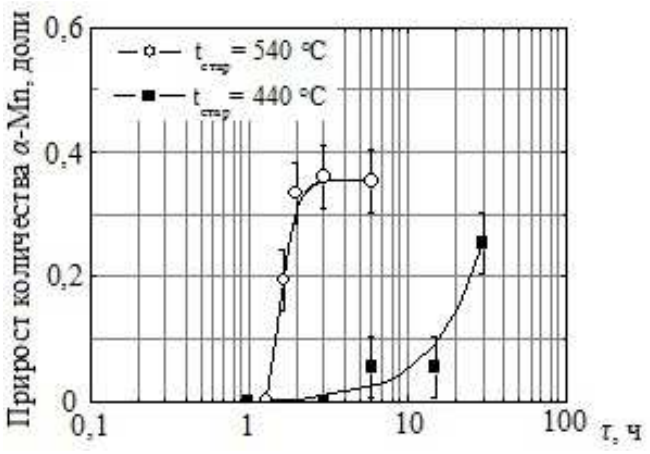


Рис. 5. Изменение доли* α-Mn *при 440 °С и 540 °С

Старение при 440 °С продолжительностью от 6 до 30 ч приводит к увеличению количества α-Mn, что вызывает рост микротвердости. Однако во всем исследованном интервале времен старения значения микротвердо-

сти не выходят на постоянный уровень. Эти результаты свидетельствуют о незавершенности процессов выделения α-Mn даже за 30 часов старения при 440 °С. Следовательно, граница спинодальной области, соответствующая переходу системы в стабильное состояние, за это время не достигается.

Известно, что процесс спинодального расслоения приводит к образованию в твердом растворе концентрационных волн, длина которых определяется температурой распада, а амплитуда – продолжительностью. Обогащенные марганцем области, закономерно расположенные в модулированной структуре, могут являться центрами выделения α-Mn. В связи с этим представляет интерес установление мест предпочтительного зарождения частиц α-Mn на заключительных стадиях спинодального распада.

Для описания кинетики зарождения и роста частиц α-Mn использовали уравнение Меля-Аврами-Джонсона-Колмогорова (MAJ) являющегося базовым для описания старения метастабильных твердах растворов

$$V_\alpha = 1 - \exp(-Rt^n), \qquad (3)$$

где V_α – доля объема α-Mn; n – показатель степени, характеризующий условия зарождения и роста частиц, t – время изотермической выдержки [7].

Согласно модели MAJ по величине n можно судить о предпочтительных местах образования частиц новой фазы.

Наиболее наглядно степень n может быть выявлена при построении зависимости $V_\alpha(t)$ в координатах $\ln\left(\ln\left(\frac{1}{1-V_\alpha}\right)\right) - \ln t$ (рис. 6).

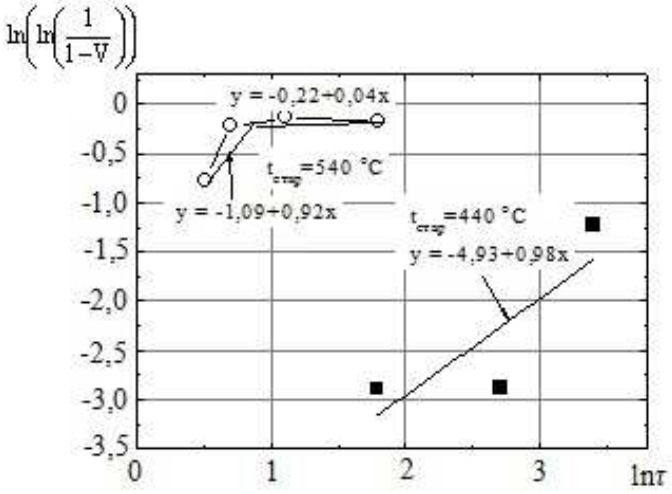


Рис. 6. Зависимость $\ln\left(\ln\left(\frac{1}{1-V_\alpha}\right)\right)$ ***от*** $\ln t$

Как видно из рис. 6, на первом этапе старения при температуре 540 °С значение параметра $n \approx 0{,}92$, а на втором этапе $n \approx 0{,}04$.

В кинетической модели MAJ значение величины n близко к единице в случае, когда выполняются следующие условия:

1. Зарождение частиц новой фазы происходит на поверхности, ограничивающей объем метастабильного твердого раствора. В нашем случае это границы зерен.

2. Полное превращение вещества на единицу поверхности происходит за время много меньшее времени распространения фронта превращения на единичную глубину материала.

3. Растущие участки образующейся новой фазы в значительной степени перекрываются, что ограничивает рост в плоскости, параллельной поверхности метастабильного вещества.

Таким образом, полученное для первой фазы значение показателя степени n свидетельствует о развитии диффузионно-контролируемого процесса выделения частиц α-Mn по границам зерен. Перегиб на кривой при $\ln\tau \approx 1$ может трактоваться, как исчерпание мест зарождения новой фазы.

Более поздняя стадия соответствует фактически нулевой скорости зарождения на границах. В этом случае кинетика процесса эквивалентна кинетике случайного зарождения частиц в объеме зерен ($n \approx 0{,}04$). Полученные результаты подтверждаются данными микроструктурного анализа. Таким образом, при высокотемпературном старении модулированная структура спинодального расслоения не влияет на процесс образования частиц стабильной фазы α-Mn.

При более низкой температуре старения 440 °С выделение α-Mn протекает существенно медленнее. Как видно из кинетических зависимостей (рис. 7), за 30 часов старения достигается только начальная стадия образования α-Mn на границах зерен ($n \approx 0{,}98$). Выделение α-Mn в объеме зерен не развивается, хотя спинодальный распад уже завершился.

Заключение.

Как видно из полученных результатов, распад γ-твердого раствора в ходе старения закаленного сплава 75Mn25Cu проходит в несколько стадий. На первой стадии сохраняется структура закаленной фазы с ГЦК решеткой. Вторая стадия характеризуется развитием спинодального расслоения, в результате которого при охлаждении от температуры старения образуется мартенсит с ГЦТ решеткой. Третья стадия сопровождается выделением стабильной фазы α-Mn. Высокотемпературное старение приводит к последовательной реализации трех стадий. В ходе старения при 440 °С наблюдается наложение второй и третьей стадии.

Выделение частиц α-Mn на третьей стадии проходит, прежде всего, на границах зерен. При высокой температуре старения 540 °С после исчерпания ресурса зернограничного роста частиц новой фазы включается механизм случайного зарождения частиц α-Mn в объеме зерен.

Исследование выполнено при поддержке РФФИ в рамках научного проекта 16-42-710770 р_а и Правительства Тульской области (договор ДС/49).

Список литературы

1. Удовенко В.А., Маркова Г.В., Ростовцев Р.Н. Сплавы системы Mn-Cu. Структура, свойства. Тула: Гриф и К, 2005. 152 с.

2. Markova G. V. Internal friction during martensitic transformation in high manganese Mn-Cu alloys // Material Science and Engineering: A. 2004. V. 370, N 1-2. P. 473-476.

3. Фастов Ю.К., Шульга Ю.Н., Рахштадт А.Г. Металловедение высокодемпфирующих сплавов. М.: Металлургия, 1080. 272 с.

4. Гусева Л.Н., Долинская Л.К., Скурихин М.Н. Старение сплавов. Кочеткова Л.П., Фастов Ю.К. // МиТОМ. 1976. № 2. С. 39-42.

5. Попова Е.Е., Спектор Э.Н. Особенности формирования метастабильных структур в сплавах системы Mn-Cu // МиТОМ. 1985. № 4. С. 39-41.

6. Волынова Т. Ф. Высокомарганцовистые стали и сплавы. М.: Металлургия, 1988. 343 с.

7. Кристиан Дж. Теория превращений в металлах и сплавах: [в 2 ч.] / Часть 1. Термодинамика и общая кинетическая теория. Пер. с англ. А. Я. Беленького и Д. Е. Темкина; под ред. А. Л. Ройтбурда. М.: Мир, 1978.

Маркова Галина Викторовна, д-р техн. наук, проф., зав кафедрой, galv.mark@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Клюева Екатерина Сергеевна, канд. техн. наук, инженер, klueva.ekaterina@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Гринберг Евгений Маркусович, д-р техн. наук, проф., klueva.ekaterina@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Гончаров Сергей Стефанович, канд. техн. наук, доц., klueva.ekaterina@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

ON THE SEQUENCE OF STAGES OF SPINODAL DECOMPOSITION OF 75Mn25Cu ALLOYS

G.V. Markova, E.S. Klyueva, E.M. Grinberg, S.S. Goncharov

During the aging of 75Mn25Cu alloy at 440 °C it was observed a combination of two processes: spinodal decomposition of supercooled solid solution and the formation of the α-Mn precipitates. At the aging temperature 540 °C after completion of the spinodal decomposition firstly we observed the formation of α-Mn precipitates at the grain boundaries, and then the formation of the second phase spans the entire volume.

Key words: Mn-Cu alloys, spinodal decomposition.

Markova Galina Victorovna, doctor of technical science, professor, head of the chear, galv.mark@rambler.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Kluyeva Ekaterina Sergeevna, candidate of technical science, engineer, klueva.ekaterina@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Grinberg Evgeniy Markusovich, doctor of technical science, professor, klueva.ekaterina@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Goncharov Sergey Stephanovich, candidate of technical science, docent, klueva.ekaterina@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 669.131

ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ НАПЛАВЛЕННОГО ПОКРЫТИЯ

Н.В. Мельниченко, Г.Д. Петрушин

Приводятся особенности структурообразования в наплавленном слое.

Ключевые слова: трение скольжения, структура наплавленного покрытия, твёрдость, скорость изнашивания.

Рабочие поверхности деталей, эксплуатируемые в условиях ударных нагрузок и абразивного износа, наплавляют износостойкими покрытиями типа ПЛ-АН 179. На сопротивление ударным нагрузкам и абразивному изнашиванию наплавленного покрытия на основе белого чугуна большое влияние оказывают износостойкость, механические свойства образующихся структур, их количественное соотношение и характер распределения.

В процессе наплавки износостойкого покрытия карбидные частицы могут формироваться мелкодисперсными, крупноигольчатыми и округлыми. Дисперсность и конфигурация карбидных частиц в основном зависят от состава наплавочной ленты и режимов наплавки [1].

В качестве основных легирующих элементов применяют хром, марганец. В незначительных количествах в состав вводят: молибден, титан, ванадий, вольфрам, никель, бор, медь, цирконий.

В данной работе рассматриваются структурообразование в наплавленном покрытии и его износостойкость.

Целью исследований является:

1. Оценка структуры, сформированной в наплавленном покрытии.

2. Измерение износостойкости покрытия при абразивном изнашивании.

Эксперименты проводились на установке трения по схеме штифт-абразивная поверхность. Коэффициент перекрытия – 0,05. Режимы изнашивания: скорость трения-скольжения – 1 м/с, контактное давление 2 МПа.

Условие трения скольжения: изнашивание без смазочного материала.

Материал для исследования: наплавленное покрытие (НП), полученное при наплавлении лентой ПЛ-АН 179, ГОСТ 26467-85, ТУ 14-127-321-2003.

Наплавка проводилась плазмотроном в защитной среде в 2 слоя на плиты толщиной 40 мм из низкоуглеродистой стали. Общая толщина НП 9…12 мм. Толщина верхнего слоя – 7…8 мм.

Металлографический анализ осуществлялся при увеличении от 3 до 1000 крат. Количественные измерения параметров и характеристик структурных зон проводились при увеличении 100 и 500 крат.

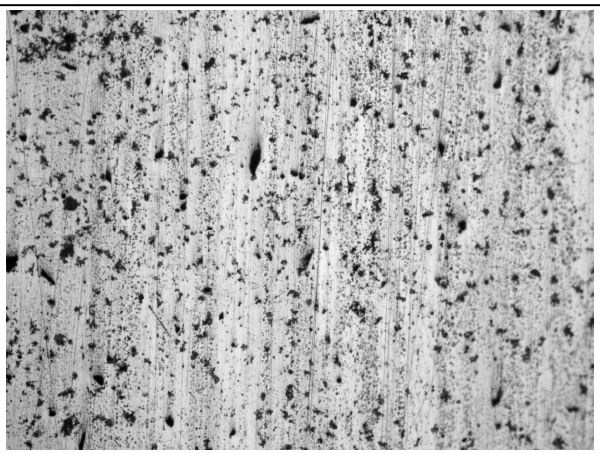
Дюрометрический анализ осуществлялся на твердомере ТК-2М. Износостойкость наплавленного слоя оценивалась по результатам изнашивания образца (штифта) об абразивную поверхность при комнатной температуре.

Результаты исследований

В наплавленном покрытии наблюдаются неметаллические включения высокой плотности (рис.1) и трещины термической природы. Неметаллические включения достаточно равномерно распределены по объёму наплавленного слоя. Их высокая плотность отрицательно сказывается на механических свойствах покрытия. В зависимости от их состава они могут также значительно снижать коэффициент трения скольжения.

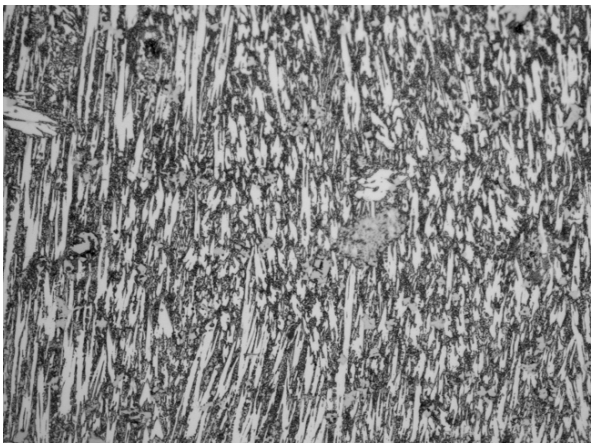
Карбиды в структуре имеют как округлую, так и игольчатую форму. Минимальные размеры игл наблюдаются в зоне сплавления слоев (рис. 2, 3).

Мелкодисперсная структура образуется при определённом химическом составе шихты в наплавочной ленте и зависит от скорости охлаждения шва при наплавке. В верхней части слоя длина игл цементита имеет размеры 0,02…0,12 мм, диаметр округлых включений и игл составляет около 5 мкм. В нижней части слоя длина игл ~ 0,02 мм, а диаметр округлых включений и игл около 3 мкм. Нижний слой имеет преимущественно дендритную структуру. Зоны сплавления слоёв, а также нижнего слоя с матричным материалом имеют четко выраженные границы.



×500

Рис. 1. Неметаллические включения в НП



×500

Рис. 2. Структура верхней части поверхностного слоя

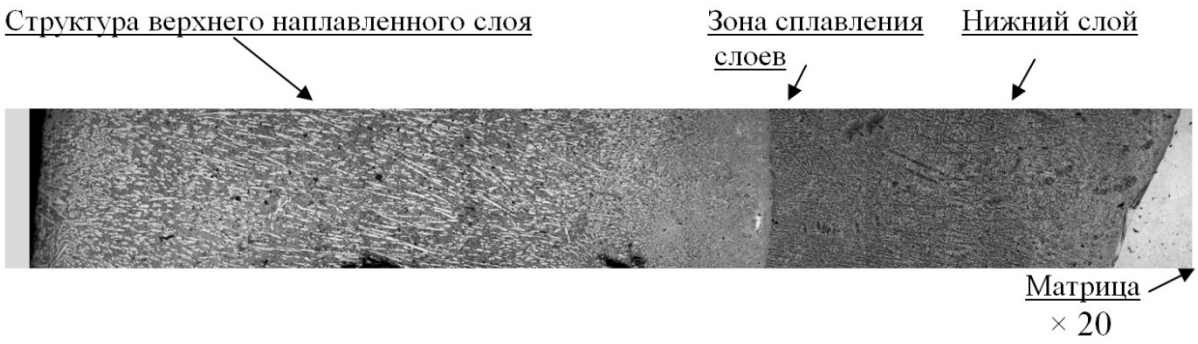


Рис. 3. Структура наплавленного покрытия

В верхней части НП твердость составляет: 57…59 $HRC_э$, в средней около 60 $HRC_э$, в нижней менее 54 $HRC_э$ (рис. 4). Низкая твёрдость нижнего слоя объясняется уменьшением в нём легирующих элементов за счёт перемешивания расплавленного металла основы и наплавочной ленты.

Пониженная твёрдость в верхней части НП связана с повышенной дефектностью структуры (поры, неметаллические включения), которые значительно снижают износостойкость (рис. 4). В средней части НП износостойкость значительно выше, чем в нижней его части (на глубине около 6 мм). Высокая износостойкость обеспечивается более мелкодисперсной структурой (рис. 3).

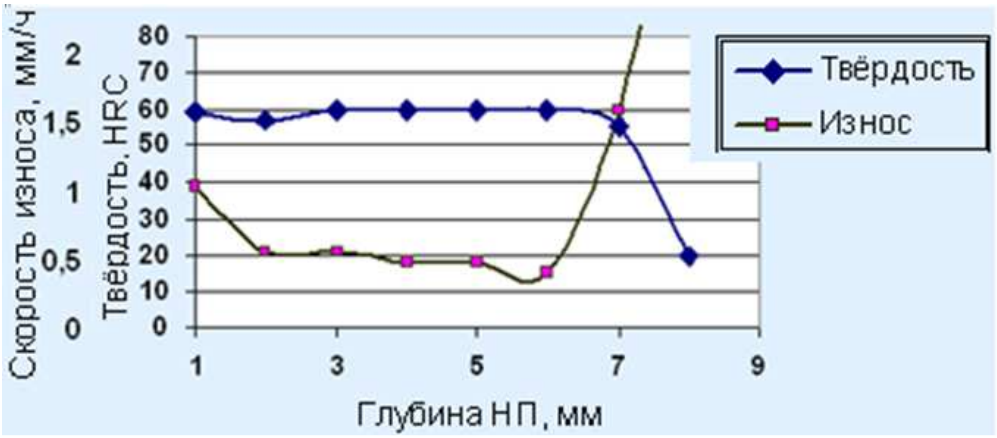


Рис. 4. Твердость и износостойкость НП

Таким образом, проведенные исследования позволяют сделать вывод, что высокая износостойкость наплавленного покрытия зависит от дисперсности карбидной фазы и дефектности структуры.

Список литературы

1. Левин Д.М., Кулбасов В.С., Гутковский Л.Б., Власов В.М., Гончаренко И.А., Мельниченко Н.В. Структура и свойства высоколегированного наплавочного материала, работающего в условиях термоциклирования // Известия ТулГУ. Серия Физика. Вып.4. 2004. С. 71-81.

Мельниченко Николай Васильевич, канд. техн. наук, доц., fmm@tsu.tula.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Петрушин Геннадий Дмитриевич, канд. техн. наук, доц., fmm@tsu.tula.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

THE WEAR RESISTANCE OF THE DEPOSITED COATING

N.V. Melnichenko, G.D. Petrushin

The working surfaces of details operating under shock loads and abrasive wear, are deposited the PL-AN 179 wear-resistant coatings. Large influence is rendered wear resistance, mechanical properties of the resulting structures of the proportion and distribution in the impact resistance and abrasion wear deposited on the white cast iron.

Key words: the sliding friction, deposited wear structure, hardness, wear rate.

Melnichenko Nikolaj Vasilevich, candidate of technical sciences, docent, fmm@tsu.tula.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Petrushin Gennadij Dmitrievich, candidate of technical sciences, docent, fmm@tsu.tula.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 539.3

ПРОНИКАНИЕ УПРУГОГО СТУПЕНЧАТОГО СТЕРЖНЯ В ГРУНТ

В.В. Аверин, В.И. Желтков

Рассматривается задача о проникании в грунт упруго-деформируемого индентора, имеющего n однородных участков. Сила сопротивления прониканию задается квадратичной зависимостью от скорости проникания. В предположении об однородности деформированного состояния в пределах каждого участка индентора с помощью уравнений Лагранжа второго рода сформирована система уравнений относительно глубины проникания и деформаций на каждом его участке. Система решается численным методом. Результаты расчетов наибольших глубин проникания на примере двухступенчатого индентора хорошо согласуются с результатами экспериментальных исследований.

Ключевые слова: проникание, грунт, индентор, упругие деформации.

Вопросам исследования процессов соударения и проникания инденторов различного типа посвящено большое число работ как теоретического, так и экспериментального характера. Достаточно полный обзор научной литературы по этой проблеме приведён в монографиях [1,6]. При этом, как правило, рассматривается индентор, выполненный из одного материала и имеющий форму цилиндрического кругового стержня постоянного поперечного сечения с плоским торцом или с оголовком полусферической или конической формы [3, 4, 5]. Предполагается, что при проникании индентора вся кинетическая энергия удара расходуется на преодоление сил сцепления среды и их инерции, то есть энергия на собственно деформацию самого индентора не расходуется. Так, например, в работе [2] было показано, что максимальное значение контактных сил в случае удара о грунт жёсткого и деформируемого индентора отличается не более, чем на 5%. Тем не менее, информация об интенсивности упругих деформаций, возникающих в отдельных отсеках сложной стержневой конструкции в процессе проникания, будет полезна для её оптимальной компоновки.

В данной работе рассматривается подход к решению задачи проникания в грунт цилиндрического индентора кругового поперечного сечения, имеющего оголовок конической, оживальной или сферической формы. Индентор состоит из n упруго деформируемых однородных участков. Физико-механические параметры каждого участка могут быть различны, а площадь поперечного сечения участка постоянна по его длине, но может отличаться, за счет наличия внутренних цилиндрических полостей, соосных с продольной осью цилиндра, от площади миделева сечения индентора. Со стороны среды на контактную поверхность индентора действуют нормальные напряжения, зависящие от скорости проникания индентора. Определению подлежат: глубина и продолжительность проникания и наибольшие деформации на каждом участке индентора.

Пусть упругий индентор длиной l и диаметром d встречает плоскость полупространства, заполненного грунтом. Вектор скорости $\vec{V}$ направлен вдоль продольной оси индентора и перпендикулярен плоскости полупространства. Начало прямоугольной системы координат в момент контакта зафиксируем на свободном торце индентора. Положительное направление оси OX совместим с продольной осью индентора и направим по ходу его движения. Индентор состоит из n однородных участков длиной l_k и площадью поперечного сечения S_k (k=1,2,…n). Нумерацию участков проведем в направлении оси OX. В пределах каждого k-го участка $(l_{k=1} \le x_k \le l_k,\ k = 1,2,\ldots,n)$ материал индентора предполагается упругим и однородным, характеризующимся модулем упругости E_k и плотностью ρ_k. Площадь поперечного сечения S_k=const.

Со стороны среды на индентор действует продольная нагрузка, модуль которой определяется соотношением

$$F = S\,(k_0 + k_1 V_c + k_2 V_c^{\,2}),\quad V_c > 0, \qquad (1)$$

где V_c – скорость индентора в сечении контакта со средой; $S = \dfrac{\pi d^2}{4}$ – площадь миделева сечения индентора; k_0, k_1, k_2 – экспериментально определяемые [3, 4] или теоретически обоснованные [5, 6] параметры процесса проникания, зависящие от характеристик материала грунта и формы головной части индентора.

Пусть $U_k(x,t)$ – перемещение поперечных сечений k-го участка индентора в направлении оси OX

$$U_k(x,t) = U_0 + \sum_{i=1}^{k-1} \varepsilon_i l_i + \varepsilon_k \Big(x - \sum_{i=1}^{k-1} l_i\Big), \qquad \sum_{i=1}^{k-1} l_i \le x \le \sum_{i=1}^{k} l_i, \qquad (2)$$

где U_0=$U_1(x,t)$ – перемещение сечения x=0 первого участка индентора; $\varepsilon_i(t)$ – деформации i-го участка (i=1,2,…,n), предполагаемые постоянными по длине каждого участка.

Перемещения точек контакта определяется формулой, следующей из уравнения (2), при $x = \sum_{i=1}^{n} l_i = l$ и $k = n$

$$U_c = U_n(L,t) = U_0 + \sum_{i=1}^{n-1} \varepsilon_i l_i + \varepsilon_n l_n = U_0 + \sum_{i=1}^{n} \varepsilon_i l_i . \qquad (3)$$

В качестве обобщенных координат выберем U_c, ε_1, ε_2,…ε_n. Тогда из выражений (3) и (2) следует

$$U_k(x,t) = U_c - \sum_{i=1}^{n} \varepsilon_i l_i + \sum_{i=1}^{k-1} \varepsilon_i l_i + \varepsilon_k (x - \sum_{i=1}^{k-1} l_i) = .$$

$$= U_c - \sum_{i=k+1}^{n} \varepsilon_i l_i + \varepsilon_k (x - \sum_{i=1}^{k} l_i) . \qquad (4)$$

Поле скоростей участков индентора определяется из (4) соотношениями:

$$V_k = \dot{U}_c - \sum_{i=k+1}^{n} \dot{\varepsilon}_i l_i + \dot{\varepsilon}_k (x - \sum_{i=1}^{k} l_i), \qquad k = 1,2,\ldots,n. \qquad (5)$$

Найдем кинетическую энергию индентора:

$$T = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{n} \int_{\Omega_k} \rho_k V_k^2 d\Omega_k , \qquad (6)$$

где Ω_k – объем k-го участка индентора.

С учетом того, что $d\Omega_k = S_k dx \qquad (\sum_{i=1}^{k-1} l_i \le x \le \sum_{i=1}^{k} l_i)$, и формулы (5), получим

$$T = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{n} \rho_k S_k l_k ((\dot{U}_c - \sum_{i=k+1}^{n} \dot{\varepsilon}_i l_i)^2 - (\dot{U}_c - \sum_{i=k+1}^{n} \dot{\varepsilon}_i l_i)\dot{\varepsilon}_k l_k + \frac{1}{3}\dot{\varepsilon}_k^2 l_k^2) . \qquad (7)$$

Энергия упругих деформаций индентора определяется известной формулой

$$U = \sum_{k=1}^{n} \frac{1}{2} E_k \int_{\Omega_k} \varepsilon_k^2 d\Omega_k = \sum_{k=1}^{n} \frac{1}{2} E_k S_k l_k \varepsilon_k^2 . \qquad (8)$$

Лагранжиан

$$L = T - U . \qquad (9)$$

В него не входит работа обобщенных сил, зависящих от скорости.

Уравнения Лагранжа

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_j}\right) - \frac{\partial L}{\partial q_j} = Q_j , \qquad (j=1,2,\ldots,n+1),$$

где

$$q_1 = U_c\,, q_2 = \varepsilon_1, \ldots, q_{n+1} = \varepsilon_n\,.$$

Для определения обобщенных сил Q_j воспользуемся соотношениями, полученными в монографии [7]. Тогда

$$Q_j = -S(k_0 + k_1\dot{U}_c + k_2\dot{U}_c^2)\frac{\partial U_c}{\partial q_j},$$

и

$$Q_1 = -S(k_0 + k_1\dot{U}_c + k_2\dot{U}_c^2),\ Q_j =$$

$$= -S(k_0 + k_1\dot{U}_c + k_2\dot{U}_c^2)l_{j-1}\ \ (j = 2,3,\ldots,n+1),$$

если $\dot{U}_c > 0$, $Q_1 = Q_2 = \ = Q_{n+1} = 0$, если $\dot{U}_c \le 0$; $S = \pi d^2/4$.

Найдем

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{U}_c} = \frac{1}{2}\sum_{k=1}^{n}\rho_k S_k l_k (2(\dot{U}_c - \sum_{i=k+1}^{n}\dot{\varepsilon}_i l_i) - \dot{\varepsilon}_k l_k),$$

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{U}_c}\right) = \frac{1}{2}\sum_{k=1}^{n}\rho_k S_k l_k (2(\ddot{U}_c - \sum_{i=k+1}^{n}\ddot{\varepsilon}_i l_i) - \ddot{\varepsilon}_k l_k),$$

$$\frac{\partial L}{\partial U_c} = 0\,,$$

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{\varepsilon}_k} = \frac{1}{2}\sum_{m=1}^{k-1}\rho_m S_m l_m l_k (\dot{\varepsilon}_m l_m - 2(\dot{U}_c - \sum_{i=m+1}^{n}\dot{\varepsilon}_i l_i)) -$$

$$-\frac{1}{2}\rho_k S_k l_k^2 ((\dot{U}_c - \sum_{i=k+1}^{n}\dot{\varepsilon}_i l_i) - \frac{2}{3}\dot{\varepsilon}_k l_k),$$

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\varepsilon}_k}\right) = \frac{1}{2}\sum_{m=1}^{k-1}\rho_m S_m l_m l_k (\ddot{\varepsilon}_m l_m - 2(\ddot{U}_c - \sum_{i=m+1}^{n}\ddot{\varepsilon}_i l_i)) -$$

$$-\frac{1}{2}\rho_k S_k l_k^2 ((\ddot{U}_c - \sum_{i=k+1}^{n}\ddot{\varepsilon}_i l_i) - \frac{2}{3}\ddot{\varepsilon}_k l_k),$$

$$\frac{\partial L}{\partial \varepsilon_k} = -E_k S_k l_k \varepsilon_k\,, \qquad (k = 1,2,\ldots,n).$$

Сформируем систему уравнений Лагранжа.

$$\begin{cases} \sum_{k=1}^{n}\rho_k S_k l_k (2(\ddot{U}_c - \sum_{i=k+1}^{n}\ddot{\varepsilon}_i l_i) - \ddot{\varepsilon}_k l_k) = -2S(k_0 + k_1\dot{U}_c + k_2\dot{U}_c^2) \\ \sum_{m=1}^{k-1}\rho_m S_m l_m (\ddot{\varepsilon}_m l_m - 2(\ddot{U}_c - \sum_{i=m+1}^{n}\ddot{\varepsilon}_i l_i)) - \rho_k S_k l_k ((\ddot{U}_c - \sum_{i=k+1}^{n}\ddot{\varepsilon}_i l_i) - \frac{2}{3}\ddot{\varepsilon}_k l_k) = \\ = -2E_k S_k \varepsilon_k - 2S(k_0 + k_1\dot{U}_c + k_2\dot{U}_c^2),\ (k = 1,2,\ldots,n)\,. \end{cases}$$

Приведем полученную систему к безразмерному виду. Введём обозначения:

$$U_c = w_c l,\ \ l = \sum_{i=1}^{n} l_i,\ \ \xi_i = \frac{l_i}{l},\ \ \mu_i = \frac{S_i}{S},\ \ a = \sqrt[n]{a_1 a_2 .. a_n},\ \ a_i = \sqrt{\frac{E_i}{\rho_i}},\ \ \varsigma_i = \frac{a_i^2}{a^2},\ \ \chi_i = \frac{\rho_i \mu_i l_i}{\rho_n l_n},$$
$$\tau = \frac{a}{l} t,\quad \frac{d}{dt} = \frac{a}{l}\frac{d}{d\tau},\quad f = C_0 + C_1 w_c' + C_2 (w_c')^2,\quad C_0 = \frac{k_0}{\rho_n \xi_n a^2},\ \ C_1 = \frac{k_1}{\rho_n \xi_n a},\ \ C_2 = \frac{k_2}{\rho_n \xi_n}. \tag{10}$$

Получим систему

$$\begin{cases} \sum\limits_{k=1}^{n} \chi_k (2(w_c'' - \sum\limits_{i=k+1}^{n} \varepsilon_i'' \xi_i) - \varepsilon_k'' \xi_k) = -2f \\ \sum\limits_{m=1}^{k-1} \chi_m (2(w_c'' - \sum\limits_{i=m+1}^{n} \varepsilon_i'' \xi_i) - \varepsilon_m'' \xi_m) + \chi_k ((w_c'' - \sum\limits_{i=k+1}^{n} \varepsilon_i'' \xi_i) - \frac{2}{3}\varepsilon_k'' \xi_k) = 2\zeta_k \chi_k \frac{\varepsilon_k}{\xi_k} + 2f, \end{cases} \tag{11}$$

где $(k = 1,2,\ldots,n)$.

Здесь штрихом обозначено дифференцирование по переменной τ. Начальные условия для переменных, входящих в систему, следующие:

при τ=0:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \ldots = \varepsilon n = 0,\quad \varepsilon_1' = \varepsilon_2' = \ldots = \varepsilon_n' = 0,\quad w_c = 0,\ w_c' = W, \tag{12}$$

где $W = \frac{V}{a}$.

В уравнениях (11) выделим суммирование по слагаемым, содержащим ε_i'' $(i = 1,2,\ldots,n)$, и приведем систему к виду

$$\begin{cases} 2\sum\limits_{k=1}^{n} \chi_k w_c'' - \sum\limits_{k=1}^{n} (2\sum\limits_{m=1}^{k-1} \chi_m + \chi_k) \xi_k \varepsilon_k'' = -2f \\ (2\sum\limits_{m=1}^{k-1} \chi_m + \chi_k) w_c'' - \sum\limits_{i=1}^{k-1} (2\sum\limits_{m=1}^{i-1} \chi_m + \chi_i) \xi_i \varepsilon_i'' - (2\sum\limits_{m=1}^{k-1} \chi_m + \frac{2}{3}\chi_k) \xi_k \varepsilon_k'' - \\ - \sum\limits_{i=k+1}^{n} (2\sum\limits_{m=1}^{k-1} \chi_m + \chi_k) \xi_i \varepsilon_i'' = 2\zeta_k \chi_k \frac{\varepsilon_k}{\xi_k} + 2f, \end{cases} \tag{13}$$

где $k = 1,2,\ldots,n.$

В полученной системе введём обозначения:

$$y_1 = w_c,\quad y_2 = \varepsilon_1, \ldots, y_{n+1} = \varepsilon_n,$$
$$y_{n+2} = w_c',\quad y_{n+3} = \varepsilon_1', \ldots,\quad y_{2n+2} = \varepsilon_n'. \tag{14}$$

Приходим к системе уравнений:

$$\begin{cases} 2\sum\limits_{k=1}^{n}\chi_k y'_{n+2} - \sum\limits_{k=1}^{n}(2\sum\limits_{m=1}^{k-1}\chi_m+\chi_k)\xi_k y'_{n+2+k} = -2f \\ (2\sum\limits_{m=1}^{k-1}\chi_m+\chi_k)\xi_k y'_{n+2} - \sum\limits_{i=1}^{k-1}(2\sum\limits_{m=1}^{i-1}\chi_m+\chi_i)\xi_k\xi_i y'_{n+2+i} - (2\sum\limits_{m+1}^{k-1}\chi_m+\frac{2}{3}\chi_k)\xi_k^2 y'_{n+2+k} - \\ \quad - \sum\limits_{i=k+1}^{n}(2\sum\limits_{m=1}^{k-1}\chi_m+\chi_k)\xi_k\xi_i y'_{n+2+i} = 2\zeta_k\chi_k y_{k+1} + 2f\xi_k, \qquad (k=1,2,\ldots,n) \\ y'_1 = y_{n+2} \\ y'_2 = y_{n+3} \\ \ldots\ldots\ldots\ldots \\ y'_{n+1} = y_{2n+2}\,. \end{cases}$$

Разрешим первые $(n+1)$ уравнения относительно $y'_{n+1},\ y'_{n+2},\ldots,y'_{2n+2}$.

Обозначим:

$$\Delta = \begin{vmatrix} 2\sum\limits_{k=1}^{n}\chi_k & -\chi_1\xi_1 & -(2\chi_1+\chi_2) & \ldots & -\sum\limits_{k=1}^{n}(2\sum\limits_{m=1}^{k-1}\chi_m+\chi_n)\xi_n \\ \chi_1\xi_1 & -\frac{2}{3}\chi_1\xi_1^2 & -\chi_1\xi_1\xi_2 & \ldots & -\sum\limits_{i=2}^{n}\chi_1\xi_1\xi_i \\ (2\chi_1+\chi_2)\xi_2 & -\chi_1\xi_1\xi_2 & -(2\chi_1+\frac{2}{3}\chi_2)\xi_2^2 & \ldots & -\sum\limits_{i=3}^{n}(2\chi_1+\chi_2)\xi_2\xi_i \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ (2\sum\limits_{m=1}^{n-1}\chi_m+\chi_n)\xi_n & -\chi_1\xi_1\xi_n & -(2\chi_1+\chi_2)\xi_2\xi_n & \ldots & -(2\sum\limits_{m=1}^{n-1}\chi_m+\frac{2}{3}\chi_n)\xi_n^2 \end{vmatrix}$$

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} -2f & -\chi_1\xi_1 & -(2\chi_1+\chi_2)\xi_2 & \ldots & -\sum\limits_{k=1}^{n}(2\sum\limits_{m=1}^{k-1}\chi_m+\chi_n)\xi_n \\ 2\zeta_1\chi_1 y_2 + 2f\xi_1 & -\frac{2}{3}\chi_1\xi_1^2 & -\chi_1\xi_1\xi_2 & \ldots & -\sum\limits_{i=2}^{n}\chi_1\xi_1\xi_i \\ 2\zeta_2\chi_2 y_3 + 2f\xi_2 & -\chi_1\xi_1\xi_2 & -(2\chi_1+\frac{2}{3}\chi_2)\xi_2^2 & \ldots & -\sum\limits_{i=3}^{n}(2\chi_1+\chi_2)\xi_2\xi_i \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ 2\zeta_n\chi_n y_{n+1} + 2f\xi_n & -\chi_1\xi_1\xi_n & -(2\chi_1+\chi_2)\xi_2\xi_n & \ldots & -(2\sum\limits_{m=1}^{n-1}\chi_m+\frac{2}{3}\chi_n)\xi_n^2 \end{vmatrix}$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} 2\sum\limits_{k=1}^{n}\chi_k & -2f & -(2\chi_1+\chi_2)\xi_2 & \ldots & -\sum\limits_{k=1}^{n}(2\sum\limits_{m=1}^{k-1}\chi_m+\chi_n)\xi_n \\ \chi_1\xi_1 & 2\zeta_1\chi_1 y_2 + 2f\xi_1 & -\chi_1\xi_1\xi_2 & \ldots & -\sum\limits_{i=2}^{n}\chi_1\xi_1\xi_i \\ (2\chi_1+\chi_2)\xi_2 & 2\zeta_2\chi_2 y_3 + 2f\xi_2 & -(2\chi_1+\frac{2}{3}\chi_2)\xi_2^2 & \ldots & -\sum\limits_{i=3}^{n}(2\chi_1+\chi_2)\xi_2\xi_i \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ (2\sum\limits_{m=1}^{n-1}\chi_m+\chi_n)\xi_n & 2\zeta_n\chi_n y_{n+1} + 2f\xi_n & -(2\chi_1+\chi_2)\xi_2\xi_n & \ldots & -(2\sum\limits_{m=1}^{n-1}\chi_m+\frac{2}{3}\chi_n)\xi_n^2 \end{vmatrix};$$

… … … … … … … … … … … … … … … … … … … …

$$\Delta_{n+1}=\begin{vmatrix} 2\sum\limits_{k=1}^{n}\chi_k & -\chi_1\xi_1 & -(2\chi_1+\chi_2)\xi_2 & \dots & -2f \\ \chi_1\xi_1 & -\frac{2}{3}\chi_1\xi_1^2 & -\chi_1\xi_1\xi_2 & \dots & 2\zeta_1\chi_1 y_2+2f\xi_1 \\ (2\chi_1+\chi_2)\xi_2 & -\chi_1\xi_1\xi_2 & -(2\chi_1+\frac{2}{3}\chi_2)\xi_2^2 & \dots & 2\zeta_2\chi_2 y_3+2f\xi_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ (2\sum\limits_{m=1}^{n-1}\chi_m+\chi_n)\xi_n & -\chi_1\xi_1\xi_n & -(2\chi_1+\chi_2)\xi_2\xi_n & \dots & 2\zeta_n\chi_n y_{n+1}+2f\xi_n \end{vmatrix},$$

и приходим к системе в нормальном виде:

$$\begin{cases} y_1' = y_{n+2} \\ y_2' = y_{n+3} \\ \dots \quad \dots \quad \dots \\ y_{n+1}' = y_{2n+2} \\ y_{n+2}' = \dfrac{\Delta_1}{\Delta} \\ y_{n+3}' = \dfrac{\Delta_2}{\Delta} \\ \dots \quad \dots \quad \dots \\ y_{2n+2}' = \dfrac{\Delta_{n+1}}{\Delta} \end{cases}, \qquad (15)$$

которая решается при начальных условиях:

$$\tau=0,\ y_1=y_2=\dots=y_{n+1}=0,\quad y_{n+2}=W,\quad y_{n+3}=y_{n+4}=\dots=y_{2n+2}=0. \qquad (16)$$

Продолжительность процесса проникания определяется из условия

$$y_{n+2}=0 \qquad (17)$$

Достоверность предложенной модели расчёта процесса проникания в грунт упруго деформируемого индентора была апробирована на результатах прямых экспериментальных исследований [3], в которых определялись глубины $U_{c.max}$ проникания в песчаный грунт стальных снарядов диаметром d=0,511 дюйма, длиной l=5,11 дюйма и состоящих из двух участков. Первый участок имеет цилиндрическую полость диаметром 0,404 дюйма и переменную длину l_1, равную длине цилиндрической полости. Второй участок, непосредственно контактирующий с грунтом, имеет коническую форму головной части с углом 2φ при вершине конуса и длину $l_2=l-l_1$. Угол конуса 2φ, начальная скорость снаряда V_0, масса m и глубина цилиндрической полости $x= l_1$ представлены в столбцах 1-4 таблицы. Авторы использовали аналитическое решение задачи проникания в грунт абсолютно жёсткого тела для квадратичной зависимости ускорения движущегося тела от скорости проникания V:

$$-\frac{dV}{dt} = \alpha V^2 + \beta V + \gamma,$$

и по экспериментально полученным глубинам проникания $U_{c\ max}$ (столбец 8) определили параметры α, β,γ данного закона (столбцы 5,6,7) для каждого эксперимента. Коэффициенты k_0, k_1, k_2 зависимости (1) связаны с α, β и γ соотношениями

$$k_0 = \frac{m\gamma}{S},\ \ k_1 = \frac{m\beta}{S},\ \ k_2 = \frac{m\alpha}{S},$$

где m– масса снаряда, S– площадь миделева сечения.

Результаты расчётов глубин проникания по предложенной в данной работе методике представлены в столбце 9. В расчётах принималось: количество участков n=2, плотности материалов участков индентора $\rho_1=\rho_2$=7850кг/м^3, модули упругости $E_1=E_2=2\cdot10^5$ МПа.

В связи с неустойчивостью движения снаряда в грунте при малых углах заострения конуса и, как следствие, малой достоверностью измеренных глубин проникания в расчётах ограничились рассмотрением результатов экспериментов для углов 2φ=180...90°.

Результатов экспериментов для углов 2φ=180°...90°

Угол конуса 2φ, град	V_0, м/с	Масса m, кг	Глубина полости x, дюйм	α, см$^{-1}$	β, см$^{-1}$	$\gamma\cdot10^{-3}$, см/с^2	$U_{c.max}$, см			
							[3], экс	[3]	[6], μ=0	[6], $\mu\neq0$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
180	674	80,30	3,169	0,0250	23	55	137	140,7	131,8	101,4
180	716	81,20	3,169	0,0257	30	35	128	139,6	133,4	102,6
170	721	80,60	3,160	0,0265	50	10	133	134,8	132,4	101,8
160	714	80,45	3,151	0,0260	45	12	135	139,0	132,8	102,1
150	687	80,35	3,141	0,0243	40	22	140	144,4	133,8	102,9
140	707	80,15	3,131	0,0253	58	0	142	141,4	137,9	106,1
130	703	79,90	3,120	0,0243	46	8	144	149,0	142,0	109,3
120	712	79,70	3,109	0,0242	57	0	145	148,4	147,3	113,4
120	673	79,40	3,109	0,0243	44	14	140	146,8	145,6	112,1
110	712	79,35	3,096	0,0246	40	9	146	153,7	153,1	117,9
100	730	79,05	3,081	0,0247	40	1	153	162,6	160,8	123,9
100	695	80,05	3,081	0,0217	50	2	156	163.6	159,0	122,6
90	718	78,60	3,064	0,0228	57	0	154	159,5	169,0	130,3

Сравнение полученных значений глубин проникания позволяет установить, что их расхождение не превышает 7%, что соизмеримо с погрешностями измерений и подтверждает достоверность предложенной модели расчёта.

Для оценки влияния упругих деформаций на параметры процесса проникания двухступенчатого индентора, была рассмотрена задача о проникании в грунт абсолютно жесткого индентора. Для этого в системе (13)

полагаем n=2 (k=1,2), $\varepsilon_1=\varepsilon_2=0$ и из полученных трех уравнений отбрасываем два последних, соответствующих нулевым обобщенным координатам ε_1 и ε_2. Остается одно уравнение

$$(\chi_1+\chi_2)w_c''=-(C_0+C_1w_c'+C_2(w_c')^2), \tag{18}$$

которое решается при начальных условиях :

$$w_c(0)=0,\quad w_c'(0)=W, \tag{19}$$

и имеет аналитическое решение в форме двух табличных интегралов для наибольшей глубины проникания

$$w_{c\max}=-(\chi_1+\chi_2)\int_W^0\frac{\eta d\eta}{C_0+C_1\eta+C_2\eta^2} \tag{20}$$

и для продолжительности проникания

$$\tau_{\max}=-(\chi_1+\chi_2)\int_W^0\frac{d\eta}{C_0+C_1\eta+C_2\eta^2} \tag{21}$$

Установлено, что в рамках рассматриваемой математческой модели проникания наличие упругих деформаций элементов индентора практически не влияет на глубину и длительность проникания, что согласуется с выводами работы [2].

Расчёт глубин проникания снарядов по условиям экспериментальных исследований [3] был выполнен также с использованием моделей проникания, предложенных в монографии [6]. Пренебрегая влиянием ускорения на величину силы сопротивления и предполагая, что глубина проникания $U_{\text{c.max}}$ превосходит длину конической части, а плотность возмущенной среды ρ=const, сопротивление проникаию задавалось соотношением (1), в котором для идеально связного грунта (коэффициент внутреннего трения μ=0)

$$k_0=\frac{\kappa\tau_0}{2}(1+\cos\phi)\ln a_*,\quad k_1=0,\quad k_2=\frac{\kappa\rho_0}{2}(1+\frac{\ln a_*}{b})(1+\cos^4\phi)\sin^2\phi, \tag{21}$$

а для грунта с внутренним трением ($\mu\neq0$)

$$\begin{gathered}k_0=\kappa(p_a+\frac{\tau_0}{\nu(1+\mu)})(a_*^{\frac{\nu}{2}}-1)(1+\cos^4\phi),\quad k_1=0,\\ k_2=\kappa\rho_0(\frac{a_*^{\frac{\nu}{2}}-1}{\nu b}+a_*^{\frac{\nu}{2}}+\frac{a_*^{\frac{\nu}{2}-1}-1}{b(2-\nu)})(1+\cos^4\phi)\sin^2\phi.\end{gathered} \tag{22}$$

В формулах (21) и (22) использовались обозначения:

$$\kappa=1+\mu_0 ctg\phi.\quad a_*=\frac{1}{1-b},\quad \tau_0=2k_*\cos\theta,\quad \nu=\frac{2\mu}{1+\mu},\quad \mu=\sin\theta,\quad b=\frac{\rho_0}{\rho},$$

где ρ_0 – плотность грунта до начала движения; ρ– плотность грунта за ударной волной; k_* – коэффициент сцепления грунта; θ– угол внутреннего трения грунта; b – коэффициент сжимаемости грунта; p_a – давление впереди ударной волны; μ_0 – коэффициент трения грунта о поверхность проникающего тела; μ– коэффициент внутреннего трения грунта.

В расчётах принималось:

μ_0=0.2; b=0.735; $\theta=20^0$; k_* =0.05МПа; ρ_0=1640кг/м^3.

Расчётные значения глубин проникания для идеально связного грунта (μ=0) и грунта с внутренним трением ($\mu\neq0$) представлены в столбцах 10 и 11 таблицы соответственно. Глубины проникания, вычисленные для идеально связного грунта, хорошо согласуются с результатами экспериментальных исследований даже для конусов с малым удлинением, несмотря на то, что автор [6] рекомендует использовать предложенную модель для конусов с углом раствора $2\varphi<120^0$. Модель, учитывающая внутреннее трение грунта, дает существенно заниженные значения глубин проникания.

Деформации, возникающие на участках составного стержня, имеют периодический характер и быстро затухают во времени. Так, например, по истечении относительного времени τ=10 деформации снижаются более чем вдвое. Деформации существенно зависят от начальной скорости соударения и выбранной модели грунта и в значительно меньшей степени от формы головной части. Наибольшие максимальные деформации были зафиксированы при скорости соударения V = 721 м/с (масса снаряда m=80,60г, $\varphi=85^0$), а наименьшие – при скорости V = 695 м/с (m=80,05 г, $\varphi=50^0$).

Для грунта, сопротивление прониканию которого описывается трехчленным квадратичным законом с коэффициентами, экспериментально определенными в [3], наибольшие значения максимальных сжимающих деформаций на первом и втором участках составили ε_{1max}= –0,0252, ε_{2max}= –0,0122, а их наименьшие значения: ε_{1max}= –0,0199, ε_{2max}= –0,0094 соответственно.

В случае модели идеально связного грунта (μ=0) значения максимальных сжимающих деформаций таково: ε_{1max}= –0,0338 и ε_{2max}= –0,0163 для V=721м/с; ε_{1max}= –0,0261 и ε_{2max}= –0,0123 для V=695м/с.

Для грунта с внутренним трением ($\mu\neq0$) величины максимальных сжимающих деформаций достигают своих наибольших значений: ε_{1max}= –0,0434, ε_{2max}= –0,0208 для V=721м/с; ε_{1max}= –0,0339, ε_{2max}= –0,016 для V=695м/с.

Значительное отличие максимальных значений сжимающих деформаций для рассмотренных моделей грунтов объясняется, прежде всего, их физико-механическими характеристиками. Так, грунт, в котором учитыва-

ется внутреннее трение, дает наибольшие величины деформаций и наименьшие значения глубин проникания при прочих равных условиях испытания.

Продолжительность проникания в исследуемом диапазоне скоростей оставалась практически неизменной. Для квадратичного эмпирического закона сопротивления [3] длительность процесса изменялась в интервале t=0,040…0,060 с, для грунта с внутренним трением t=0,073 с, а для идеально связного грунта t=0,080 с.

Список литературы

1. В.Г. Баженов, В.Л. Котов. Математическое моделирование нестационарных процессов удара и проникания осесимметричных тел и идентификация свойств грунтовых сред. М.: Физматлит, 2011. 208 с.

2. Баженов В.Г., Брагов А.М., Котов В.Л., Кочетков А.В. Исследование удара и проникания тел вращения в мягкий грунт // Прикладная математика и механика, 2003 Т.67. Вып. 4. С. 686-697.

3. Аллен У., Мэйсфилд Э., Моррисон Г. Динамика проникания снаряда в песок // Механика: Сб. пер. 1957. N6. С. 125-137.

4. Баранов В.Л., Иванов В.Н., Щитов В.Н. Динамика проникания жестких вращающихся инденторов в грунты. М.: ЦНИИТМ Тула: ТулГУ, 2005. 107 с.

5. Григорян С.С. Приближённое решение задачи о проникании тела в грунт // Изв. РАН. Механика жидкости и газа, 1993. N4. С. 18-24.

6. Сагомонян А.Л. Проникание. М.: Изд-во МГУ, 1974. 299 с.

7. Лурье А.И. Аналитическая механика. М.: Физматлит,1961. 824 с.

Аверин Валерий Владимирович, канд. техн. наук, доц., glob4361@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Желтков Владимир Иванович, д-р физ.-мат. наук, доц., glob4361@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

PENETRATION OF THE ELASTIC STEP CORE INTO SOIL

V.V. Averin, V.I. Zheltkov

The problem of the penetration of the soil elastically deformable indenter having n homogeneous areas is under analysis. The strength of the penetration resistance is defined by a quadratic dependence on the penetration rate. Under the assumption of homogeneity of strain state within each area of the indenter with the help of Lagrange equations of the second kind formed a system of equations with respect to the depth of penetration and deformation at each area. The system is solved numerically. The calculation results are the greatest depth of penetration of the example of a two-step indentation in good agreement with experimental results.

Key words: penetration, the soil, the indenter, the elastic deformation.

Averin Valerij Vladimirovich, candidate of technical science, docent, glob4361@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Zheltkov Vladimir Ivanovich, doctor of physical and mathematical sciences, docent, glob4361@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 621.822

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВИБРАЦИЙ ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

С.С. Андреев, Ю.В. Мягков, В.В. Курицин

В настоящей работе впервые построена универсальная математическая 3D модель вибрацийдвигателя внутреннего сгорания, применимая как для рядных, так и для V-образных моделей двигателей.

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания, колебания, математическая модель.

Расчёт колебаний двигателя автомобиля – достаточно не простая задача, связанная с громоздкими вычислениями. Поэтому во многих случаях, например для определения амплитуд вынужденных и резонансных колебаний, ориентировочной оценки спектра частот собственных колебаний, а также для предварительного выбора параметров подвески, целесообразно воспользоваться имеющимися ресурсами персональных компьютеров с их вычислительными комплексами. Несмотря на доступные исследовательские и вычислительные мощности, в этой работе будет вводиться ряд допущений, позволяющих, в значительной мере, упростить расчёты и получить первое представление об особенностях колебаний исследуемого двигателя.

Примем, что двигатель состоит из следующих основных блоков: блоков цилиндров, картера, головок блоков цилиндров с крышками, коленчатого вала с шатунно-поршневыми группами, механизма газораспределения, навесного оборудования (сцепление с его картером, стартера и генератора и т.д.). Все блоки будем считать абсолютно твердыми телами (АТТ). Принятие двух блоков цилиндров позволит учесть основные конструктивные особенности двигателя: рядного, когда два блока совмещаются боковыми плоскостями, V-образного, когда между ними имеется определенный угол φ_V и горизонтально-оппозитного, когда этот угол равен 180^o (π радиан). Таким образом, построенная физическая модель позволит изучать движение практически любого двигателя внутреннего сгорания. На рис. 1 показана расчетная схема для V-образного двигателя.

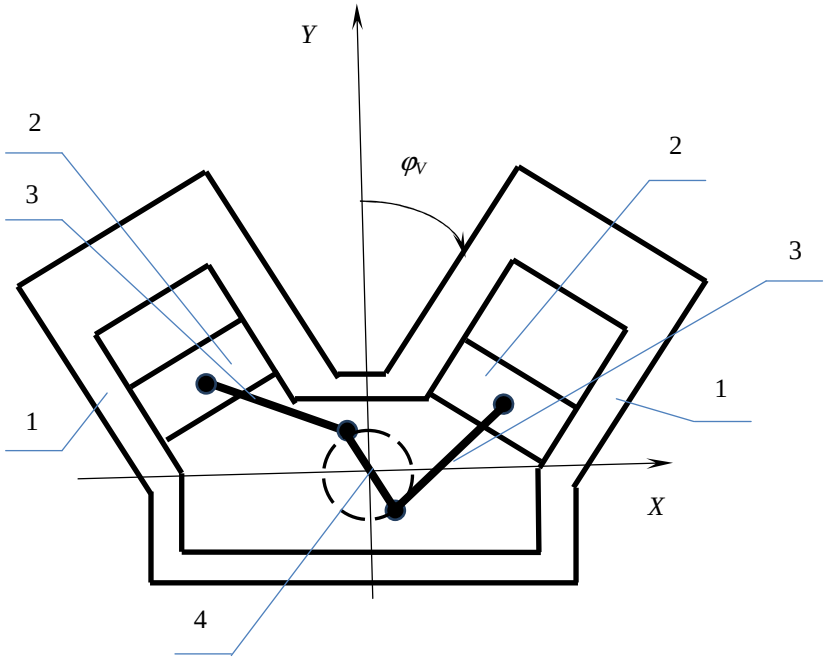


Рис. 1. Расчетная схема двигателя:
1 – блок цилиндров с крышкой и картером; 2 - поршень;
3 – шатун; 4 – коленвал

На рис. 1 приведено одно поперечное сечение V-образного двигателя со случайным положением коленвала. Условимся отсчитывать угловое положение коленвала против часовой стрелки от верхней мертвой точки (ВМТ) правого цилиндра. Если двигатель содержит более одной пары цилиндров, то расчетная схема для последующих пар будет отличаться только угловым положением, которое задается конструкцией коленвала и циклограммой газораспределения. На этой схеме не показаны опоры двигателя, для которых следует определять жесткости и места расположения.

Введем две системы координат: связанную с жестким основанием *Oxyz*, например, с испытательным стендом, и подвижную *OXYZ*, расположенную следующим образом: ось *OZ* совместим с осью коленчатого вала (далее коленвал); плоскость *OXY* выберем так, чтобы она проходила через поперечную плоскость симметрии блока цилиндров (предполагая, что она существует). Предполагая также, что существует продольная вертикальная плоскость симметрии блока цилиндров, проходящая через ось коленвала, выберем оси *X*и *Y* как показано на рис. 1. Направление оси *Z*выберем так, чтобы единичные векторы осей образовывали правую тройку:

$$\mathbf{e}_X \times \mathbf{e}_Y = \mathbf{e}_Z . \qquad (1)$$

Неподвижную систему координат выберем так, чтобы ее оси *x*, *y*, *z*в начале движения были бы параллельны осям системы *OXYZ*.

В общем случае двигатель совершает пространственное сложное движение, которое ограничено его опорами различной конструкции, которые могут включать в себя как упругие, так и вязкие элементы. Обратим внимание на то, что связи двигателя с основанием являются голономными, то есть явно не зависят от времени, а только от характеристик движения двигателя (перемещений и скоростей точек опирания). Так как число степеней свободы двигателя как АТТ равно 6 (то есть три перемещения выбранного начала координат и три угла поворота подвижных осей относительно начала координат), то опоры должны исключать движение двигателя как АТТ, то есть суммарное количество связей, накладываемых на движение двигателя, должно быть не менее 6.

Тогда в качестве обобщенных координат [1] следует выбрать координаты точек опоры; для того, чтобы выяснить их пригодность для этого, выясним их независимость.

Предположим, что координаты опорных точек в системе OXYZ известны. Тогда можно использовать формулу распределения скоростей в твердом теле [1]:

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}_0 + \boldsymbol{\omega} \times (\mathbf{r} - \mathbf{r}_0), \tag{2}$$

где $\boldsymbol{v}$– скорость точки; $\boldsymbol{v}_0$ – скорость полюса (то есть начала координат *OXYZ*); $\boldsymbol{\omega}$ - вектор угловой скорости; $\boldsymbol{r}$ и $\boldsymbol{r}_0$ – координаты точки и полюса. Перемещения и углы поворота считаем малыми.

Распределение перемещений при условии малости углов поворота определяется формулой:

$$\mathbf{r} + \delta\mathbf{r} = \mathbf{r} + \boldsymbol{\theta} \times \mathbf{r} \Rightarrow \mathbf{u} = \delta\mathbf{r} = \boldsymbol{\theta} \times \mathbf{r}, \tag{3}$$

где $\boldsymbol{u} = \delta\boldsymbol{r}$ - вектор перемещения; $\boldsymbol{\theta}$ - вектор малого поворота, связанный с угловой скоростью соотношением:

$$\boldsymbol{\theta} = \boldsymbol{\omega} \times \boldsymbol{r}. \tag{4}$$

Общепринято выражение угловой скорости и малого поворота через углы Эйлера [1]. В системе координат *OXYZ* проекции вектора угловой скорости имеют вид:

$$\begin{aligned} &\omega_X = \dot{\psi}\sin\theta\sin\varphi + \dot{\theta}\cos\varphi; \quad \omega_Y = \dot{\psi}\sin\psi\cos\varphi - \dot{\theta}\sin\varphi; \\ &\omega_Z = \dot{\psi}\cos\theta + \dot{\varphi}, \end{aligned} \tag{5}$$

а в неподвижной системе координат *Oxyz*:

$$\begin{aligned} &\omega_x = \dot{\theta}\cos\psi + \dot{\varphi}\sin\theta\sin\psi; \quad \omega_x = \dot{\theta}\sin\psi - \dot{\varphi}\sin\theta\cos\psi; \\ &\omega_z = \dot{\psi}\cos\theta + \dot{\varphi}\cos\theta. \end{aligned} \tag{6}$$

Чтобы получить выражения для вектора малого поворота, надо заменить в (5), (6) производные от углов Эйлера $\dot{\psi}, \dot{\theta}, \dot{\varphi}$ на вариации $\delta\psi, \delta\theta, \delta\varphi$.

Таким образом, независимых переменных, через которые выражаются координаты, шесть: перемещения точки O – u_0, v_0, w_0относительно осей и три угла Эйлера: ψ, θ, φ. Их и следует принять за обобщенные координаты.

Возбуждение пространственного движения двигателя определяется наличием в составе его подвижных частей, совершающих относительные движения – это элементы шатунно-поршневой группы (ШПГ) и коленвал. Поршни совершают возвратно-поступательные движения относительно блока цилиндров, шатуны – плоскопараллельные, и коленвал – вращательное движение.

Для вывода уравнений движения используем уравнения Лагранжа II рода, использующие выражения кинетической и потенциальной энергий системы через обобщенные координаты и обобщенные скорости.

Система «Двигатель» совершает сложное пространственное движение, в котором можно выделить переносное движение – движение подсистемы «Блок цилиндров+картер», которые примем за «несущее» тело [1] и относительное движение – вращение коленвала в коренных подшипниках, плоское прямолинейное движение поршней в цилиндрах и плоскопараллельное движение шатунов. Кинетическая энергия системы «Двигатель» может быть представлена в виде суммы трех групп слагаемых:

$$T = T_e + T_m + T_r . \tag{7}$$

Кинетическая энергия переносного движения T_eвычисляется как будто бы подвижные тела образуют единое твердое тело с несущим:

$$T_e = \frac{1}{2}\left[Mv_0^2 + 2M\mathbf{v}_0 \cdot \left(\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}'_C\right) + \boldsymbol{\omega} \cdot \boldsymbol{\Theta} \cdot \boldsymbol{\omega}\right]. \tag{8}$$

Здесь M – масса системы, $\boldsymbol{\Theta}$ - тензор инерции системы в выбранной подвижной системе координат, $\mathbf{r}'_C$ - радиус-вектор полюса подвижной системы координат в неподвижной $Oxyz$. Так как и полюс, и моменты инерции связаны с относительными перемещениями подвижных частей, то в общем случае обе эти величины зависят от обобщенных координат.

Составляющая T_m определяется формулой:

$$\begin{gathered} T_m = \mathbf{v}_0 \cdot \mathbf{Q}_r + \boldsymbol{\omega} \cdot \mathbf{K}_r; \\ \mathbf{Q}_r = M_r \mathbf{v}_{Cr};\ \mathbf{K}_r = \sum_{k=1}^{N} m_k \mathbf{v}_k \end{gathered}, \tag{9}$$

где $\boldsymbol{v}_0$ – скорость полюса подвижной системы координат $OXYZ$; $\boldsymbol{Q}_r$, $\boldsymbol{K}_r$ - главный вектор относительных количеств движения и их главный момент относительно полюса подвижной системы координат; m_k – массы подвижных частей; $\boldsymbol{v}_k$ – их скорости относительно полюса; N– количество подвижных тел.

Составляющая T_m представляет кинетическую энергию относительного движения, которая выражается квадратичной формой обобщенных скоростей с матрицей коэффициентов:

$$T_r = \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n}\sum_{i=1}^{n} A_{ij}\dot{q}_i\dot{q}_j;\ A_{ij} = \sum_{k=1}^{N} m_k \frac{\partial \mathbf{r}'_k}{\partial q_i}\cdot\frac{\partial \mathbf{r}'_k}{\partial q_j}. \qquad (10)$$

Здесь *n*- количество обобщенных координат (и обобщенных скоростей).

Виртуальное перемещение любой точки системы определится следующим образом:

$$\delta\mathbf{r} = \delta\mathbf{r}_0 + \delta\mathbf{r}' = \delta\mathbf{r}_0 + \sum_{k=1}^{n}\frac{\partial \mathbf{r}'}{\partial q_k}\delta q_k + \boldsymbol{\theta}\times\mathbf{r}'. \qquad (11)$$

где $\boldsymbol{\theta}$ - вектор бесконечно малого поворота несущего тела (4).

Элементарная работа активных сил, приложенных как к несущему, так и к носимым телам, определится равенством:

$$\delta' W = \mathbf{V}\cdot\delta\mathbf{r}_0 + \boldsymbol{\theta}\cdot\mathbf{m} + \sum_{k=1}^{n} Q_k\delta q_k\ . \qquad (12)$$

Здесь $\boldsymbol{V}$ **–** главный вектор; $\boldsymbol{m}$ – главный момент активных сил относительно полюса.

Располагая выражениями для кинетической энергии и элементарной работы, можно получить систему уравнений движения несущего тела и всех подвижных тел.

При выводе уравнений движения несущего тела используем уравнения Лагранжа IIрода [1]:

$$\frac{d}{dt}\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_k} - \frac{\partial T}{\partial q_k} = Q_k,\ k = 1,2,...n. \qquad (13)$$

Используем выражение для кинетической энергии (7), замечая, что кинетическая энергия относительного движения T_rне зависит от обобщенных скоростей переносного движения:

$$M\left[\dot{\mathbf{v}}_0 + \boldsymbol{\omega}\times\mathbf{v}_0 + \dot{\boldsymbol{\omega}}\times\mathbf{r}'_C + \boldsymbol{\omega}\times\left(\boldsymbol{\omega}\times\mathbf{r}'_C\right) + 2\boldsymbol{\omega}\times\dot{\mathbf{r}}'_C + \ddot{\mathbf{r}}'_C\right] = \mathbf{V}, \qquad (14)$$

Здесь

$$\mathbf{a}_e = \dot{\mathbf{v}}_0 + \boldsymbol{\omega}\times\mathbf{v}_0 + \dot{\boldsymbol{\omega}}\times\mathbf{r}'_C + \boldsymbol{\omega}\times\left(\boldsymbol{\omega}\times\mathbf{r}'_C\right) \qquad (15)$$

– переносное ускорение, которое складывается из ускорения полюса:

$$\mathbf{a}_0 = \dot{\mathbf{v}}_0 + \boldsymbol{\omega}\times\mathbf{v}_0, \qquad (16)$$

центростремительного и вращательного ускорений:

$$\mathbf{a}^{вр} = \dot{\boldsymbol{\omega}}\times\mathbf{r}'_C,\ \mathbf{a}^{ЦС} = \boldsymbol{\omega}\times\left(\boldsymbol{\omega}\times\mathbf{r}'_C\right);. \qquad (17)$$

К ним добавляются ускорение Кориолиса:

$$\mathbf{a}^{Cor} = 2\boldsymbol{\omega}\times\dot{\mathbf{r}}'_C;\qquad \dot{\mathbf{r}}'_C = \sum_{k=1}^{n}\frac{\partial \mathbf{r}'_C}{\partial q_k}\dot{q}_k\ . \qquad (18)$$

и относительное ускорение:

$$\mathbf{a}_r = \sum_{k=1}^{n}\left(\frac{\partial \mathbf{r}'_C}{\partial q_k} + \sum_{m=1}^{n}\frac{\partial^2 \mathbf{r}'_C}{\partial q_k \partial q_m}\dot{q}_k\dot{q}_m\right). \qquad (19)$$

Формула (14) выражает теорему об изменении количества движения системы.

Уравнение вращательного движения несущего тела имеют вид [1]:

$$\boldsymbol{\Theta}^C \cdot \boldsymbol{\omega} + \boldsymbol{\omega} \times \boldsymbol{\Theta}^C \cdot \boldsymbol{\omega} = \mathbf{m}^C + \mathbf{m}^C_{Cor} - \dot{\mathbf{K}}^C_r, \qquad (20)$$

где

$$\boldsymbol{\Theta}^C = \boldsymbol{\Theta} - M\left(\mathbf{E}\mathbf{r}'_C \cdot \mathbf{r}'_C - \mathbf{r}'_C\mathbf{r}'_C\right) - \qquad (21)$$

- тензор инерции системы в ее центре тяжести,

$$\mathbf{K}^C_r = \mathbf{K}^O_r - M\mathbf{r}'_C \times \dot{\mathbf{r}}'_C - \qquad (22)$$

- главный момент количеств движения относительно центра инерции,

$$\mathbf{m}^C_{Cor} = -\boldsymbol{\Theta}^C \cdot \boldsymbol{\omega} - \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{K}^C_r - \qquad (23)$$

– момент относительно центра инерции кориолисовых сил инерции,

$$\mathbf{m}^C = \mathbf{m}^O - \mathbf{r}'_C \times \mathbf{V} - \qquad (24)$$

– главный момент активных сил относительно центра инерции.

Из выражений (14), (20) нетрудно заметить, что если определены характеристики относительного движения (относительная скорость, относительное ускорение и т.п.), то пространственное движение несущего тела также определено.

Для составления уравнений относительного движения удобнее исходить из очевидных соображений, связанных с кинематикой вращения коленвала и характером приложения сил, развиваемых поршнями во время выполнения цикла «рабочий ход – продувка – всасывание – сжатие».

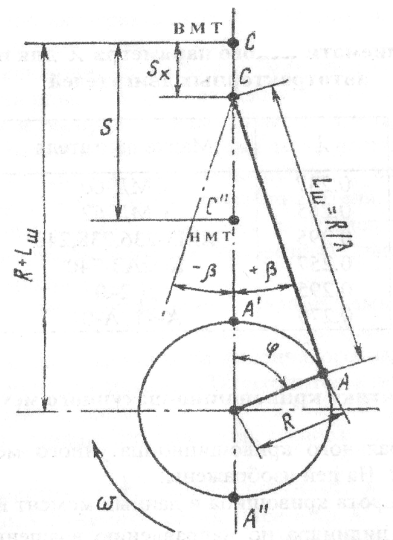


Рис. 2. Кинематика шатунно-поршневой группы

На рис. 2 показано промежуточное положение ШПГ при произвольном положении поршня между верхней и нижней мертвыми точками (вмт и нмт). Пренебрегая деформациями, т.е. считая элементы ШПГ абсолютно твердыми телами, из прямоугольного треугольника OAC’ получим очевидное соотношение:

$$C'O\sin\varphi = C'A = L_{ш}. \qquad (25)$$

Положение вмт получается при φ=0: $S_{вмт}=R+L_{ш}$; положение нмт – при φ=π: $S_{нмт}=L_{ш}–R$. Условимся отсчитывать координату s – ход поршня – от вмт. Тогда из (25) получим уравнение голономной связи:

$$L_{ш} = (S_{вмт} - s)\sin\varphi. \qquad (26)$$

В точке C к шатуну AC присоединен поршень диаметром $d_{пор}$ и массой $m_{пор}$, на который действует сила давления газов в цилиндре

$$F = \frac{\pi d_{пор}^2}{4} p(s), \qquad (27)$$

где $p(s)$ – давление продуктов сгорания в цилиндре на такте «рабочий ход», или давление сжимаемой смеси на такте «сжатие».

Сопротивлением газов при продувке и всасывании смеси пренебрежем. Величина давления определяется по индикаторной диаграмме двигателя, которую полагаем известной (например, рис 3). В дальнейшем для использования в решении дифференциальных уравнений движения каждую ветвь представим в аналитической форме политропы:

$$p(s) = p_0 s^a, \qquad (28)$$

определяя параметры зависимостей (28) методом наименьших квадратов [2, 3] по реальной индикаторной диаграмме.

Кинетическая энергия поршня вычисляется через координату sследующим образом:

$$T_r^{пор} = m_{пор}\frac{\dot{s}^2}{2}. \qquad (29)$$

Элементарная работа внешних сил, приложенных к поршню:

$$\delta' A_{пор} = \delta s \frac{\pi d_{пор}^2}{4} p(s). \qquad (30)$$

Следующий элемент системы – шатун AC – совершает плоскопараллельное движение. Примем за полюс точку C’; тогда кинетическая энергия его движения определится следующим образом:

$$T_r^{ш} = m_{ш}\frac{\dot{s}^2}{2} + J_{ш}^{C'}\frac{\dot{\beta}^2}{2}. \qquad (31)$$

где $m_{ш}$ - масса шатуна; $J_{ш}^{C'} = \frac{m_{ш}L_{ш}^2}{3}$ - момент инерции шатуна относительно его конца в предположении, что шатун – однородный стержень.

Так как из рис. 2 следует, что

$$\beta = \frac{\pi}{2} - \varphi,\ \dot{\beta} = -\dot{\varphi}.$$

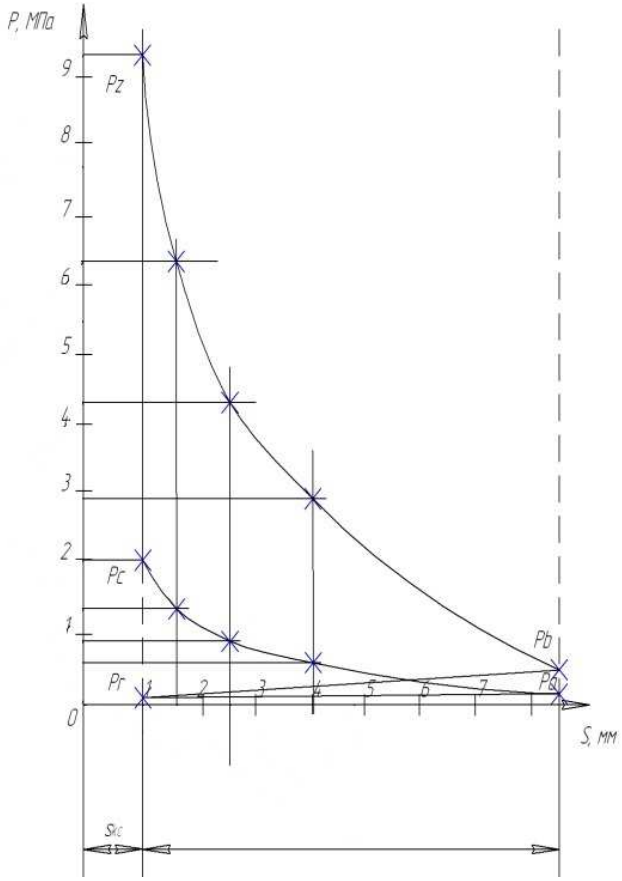


Рис. 3. Индикаторная диаграмма FordFocus

Таким образом (31) принимает вид:

$$T_r^{ш} = m_{ш}\frac{\dot{s}^2}{2} + J_{ш}^{C'}\frac{\dot{\varphi}^2}{2}. \qquad (32)$$

На точку *C'* действует сила, приложенная к поршню; ее элементарная работа определяется формулой (30).Коленвал совершает вращательное движение относительно оси, перпендикулярной плоскости рис. 2 (ось *Z*). Его кинетическая энергия:

$$T_r^{KB} = \frac{J_{KB}}{2}\dot{\varphi}^2. \qquad (33)$$

Предполагается, что коленвал идеально сбалансирован и J_{KB} – его осевой момент инерции.

Вращение коленвала вокруг оси происходит под действием вращающего момента; его элементарная работа:

$$\delta A' = \delta\varphi M_{вр} = \delta\varphi \cdot R \frac{\pi d_{пор}^2}{4} p(s)\cos\beta = \delta\varphi \cdot R \frac{\pi d_{пор}^2}{4} p(s)\sin\varphi . \qquad (34)$$

Приведенные соотношения справедливы для одноцилиндрового двигателя. Предположим, что у 4-х тактного двигателя имеется 2*N* цилиндров рядного расположения (*N*=1, 2, 3…). Тогда конструкция коленвала предполагает «зеркальное» расположение шатунных шеек в *N*плоскостях, угол между которыми составляет $2\pi/N$[4]. Для такого двигателя угловой интервал между вспышками равен $2\pi/N$.

Если двигатель многорядный, то угловой интервал между вспышками равен

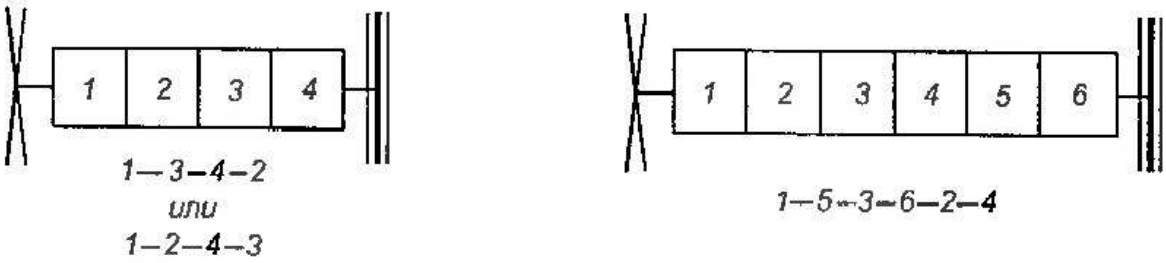
$$\alpha_{всп} = \frac{2\pi}{nN}, \qquad (35)$$

где *n*– количество рядов.

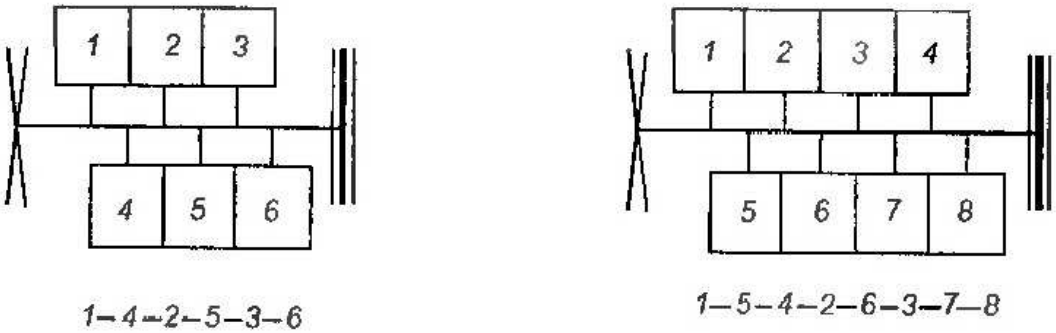
Обычно для легковых автомобилей *n*=2, так что

$$\alpha_{всп} = \frac{\pi}{N}. \qquad (36)$$

Последовательность рабочих ходов в цилиндрах приведена на рис. 4. На этом рисунке предполагается, что каждому цилиндру соответствует один кривошип коленвала.



а



б

Рис. 4. Последовательность работы цилиндров 4-х тактных двигателей: а однорядных; б – V – образных

В дальнейшем ограничимся рассмотрением двигателей рис. 4.

Рассмотрим последовательность рабочих ходов в первой схеме (рис. 4, а) (т.е. N=2, n=1). Предполагается, что отсчет угла идет от вмт цилиндра 1 При последовательности 1-3-4-2 между рабочими ходами цилиндров 1 и 3 существует угловой сдвиг $\alpha_{всп}=\pi$ (34), то есть при рассмотрении соотношений (26) - (33) для цилиндра 3 следует подставлять значение угла $\varphi_3=\varphi-\pi$. Для цилиндра 4 угловой сдвиг между ним и цилиндром 3 будет таким же, т.е. π, а между цилиндрами 1 и 4 - 2π. Между цилиндром 2 и 4 угловой сдвиг также равен π, а между 2 и 1 – 3π. При последовательности 1-2-4-3 роль цилиндра 3 играет цилиндр 2, а цилиндр 3 становится на место цилиндра 2; рассуждения об угловых сдвигах сохраняются.

Аналогично можно рассуждать и при двухрядной схеме (рис. 4, б) (N=3, n=2). По (35) угловой сдвиг $\alpha_{всп}=\pi/3$; все рассуждения такие же, как и ранее.

Теперь можно записать общее выражение кинетической энергии:

$$T_r = T_r^{KB} + T_r^1 + T_r^2 + T_r^3 + T_r^4 + \ldots, \qquad (37)$$

где верхний индекс показывает номер цилиндра.

Для 4-х цилиндрового однорядного двигателя с последовательностью рабочих ходов 1-3-4-2 имеем:

$$T_r = \frac{J_{KB}}{2}\dot{\varphi}^2 + 4J_{ш}^{C'}\frac{\dot{\varphi}^2}{2}\left\{\frac{\cos\varphi\left(\cos\varphi-\sqrt{\lambda^2-\sin^2\varphi}\right)^2}{\sqrt{\lambda^2-\sin^2\varphi}\left[\lambda^2-1+2\cos\varphi\left(\cos\varphi-\sqrt{\lambda^2-\sin^2\varphi}\right)\right]}\right\}^2 +$$

$$+\frac{m_ш+m_{пор}}{2}\left\{\dot{s}^2+\left[\dot{s}(\varphi-\pi)\right]^2+\left[\dot{s}(\varphi-2\pi)\right]^2+\left[\dot{s}(\varphi-3\pi)\right]^2\right\} \qquad (38)$$

Заменим скорости в цилиндрах их выражениями из (34):

$$\begin{aligned}\dot{s}_1 &= \dot{s}_4 = \dot{\varphi}R\sin\varphi\left(\frac{\cos\varphi}{\sqrt{\lambda^2-\sin^2\varphi}}-1\right);\\ \dot{s}_2 &= \dot{s}_3 = \dot{\varphi}R\sin\varphi\left(\frac{\cos\varphi}{\sqrt{\lambda^2-\sin^2\varphi}}+1\right)\end{aligned} \qquad (39)$$

Аналитическими преобразованиями установлено, что скорость первого и четвертого цилиндров а также третьего и второго равны между собой; тогда (38) можно упростить:

$$T_r = \dot{\varphi}^2 \left[\begin{array}{l} \dfrac{J_{KB}}{2} + 2J_{ш}^{C'} \left\{ \dfrac{\cos\varphi\left(\cos\varphi - \sqrt{\lambda^2 - \sin^2\varphi}\right)^2}{\sqrt{\lambda^2 - \sin^2\varphi}\left[\lambda^2 - 1 + 2\cos\varphi\left(\cos\varphi - \sqrt{\lambda^2 - \sin^2\varphi}\right)\right]} \right\}^2 + \\ + 2\left(m_{ш} + m_{пор}\right)R^2 \sin^2\varphi\left(\dfrac{\cos^2\varphi}{\lambda^2 - \sin^2\varphi} + 1\right) \end{array} \right]. \quad (40)$$

Элементарную работу внешних сил определим, исходя из сложения работ в каждом цилиндре:

$$\delta' A = \sum_{k=1}^{4} \delta' A_k , \quad (41)$$

где k – номер цилиндра.

Для определения $\delta' A_k$ используем (34) с учетом углового сдвига вспышек в каждом цилиндре; ход поршня в аргументе функции $p(x)$ есть разность между $S_{вмт}$ и координатойs, принятой выше. Последовательность рабочих ходов определена (рис. 4).

Для расчётов удобнее использовать развёрнутую индикаторную диаграмму, т.е. зависимость давления в цилиндре от угла поворота коленчатого вала.

$$p(\varphi) = -p_{0w}\left[\frac{1+\lambda(\sqrt{1-\lambda\sin(\varphi)^2}+\lambda\cos(\varphi))}{2\lambda}\right]^{a_w} \quad (42)$$

Формула (42) справедлива для такта «рабочий ход», где $0 < \varphi < \pi$. Знак «−» перед функцией давления p_{0w} необходим для согласования, т.к. давление действует вниз и поршень двигается вниз.

$$p(\varphi) = 0. \quad (43)$$

Формула (43) соответствует тактам «продувка» и «всасывание», где $\pi < \varphi < 3\pi$.

$$p(\varphi) = p_{0c}\left[\frac{1+\lambda(\sqrt{1-\lambda\sin(\varphi)^2}+\lambda\cos(\varphi))}{2\lambda}\right]^{a_c} \quad (44)$$

Данная формула справедлива для такта «сжатие», где $3\pi < \varphi < 4\pi$. Отсутствие знака «−» перед давлением необходимо для согласования движения поршня вверх и направления давления вниз.

Определяем приведенный момент инерции

$$J_{\text{пр}}(\varphi) = \left[J_{\text{КВ}} + \frac{4J_{\text{ш}}\lambda^2\cos(\varphi)^2}{1-\lambda^2\sin(\varphi)^2} + 4R^2\sin\varphi^2\,(m_{\text{ш}} + m_{\text{п}})\frac{\lambda^2\cos(2\varphi)+1}{1-\sin(\varphi)^2\lambda^2}\right] \quad (45)$$

и его производную по углу поворота коленчатого вала φ

$$J_{red\varphi}(\varphi) = \frac{4\sin(2\varphi)}{\lambda^2\sin(\varphi)^2 - 1}[J_{\text{ш}}\lambda^2 + R^2(m_{\text{ш}} + m_{\text{п}})[2\,\lambda^2(3\sin(\varphi)^2 - 1] - 1] +$$

$$+ \frac{8\lambda^2\cos\varphi\sin\varphi}{(\lambda^2\sin(\varphi)^2-1)^2}[R^2(m_{\text{ш}} + m_{\text{п}})(\cos(2\varphi)\,\lambda^2 + 1) + J_{\text{ш}}\lambda^2\cos(\varphi)^2] \quad (46)$$

Приведём уравнение второго порядка

$$J_{\text{пр}}\frac{d^2}{dt^2}\varphi + \frac{1}{2}\left(\frac{d}{d\varphi}J_{\text{пр}}\right)\left(\frac{d}{dt}\varphi\right)^2 = Q(t) \quad (47)$$

к двум уравнениям первого порядка: вектор состояния $y = (\varphi\ \omega)^T$

$$y_0 = y_1 \tag{48}$$

$$y_1 = \frac{Q(t)}{J_{\text{пр}}} - \frac{1}{2}\frac{J_{\text{пр}}\varphi}{J_{\text{пр}}}(y_1)^2 \tag{49}$$

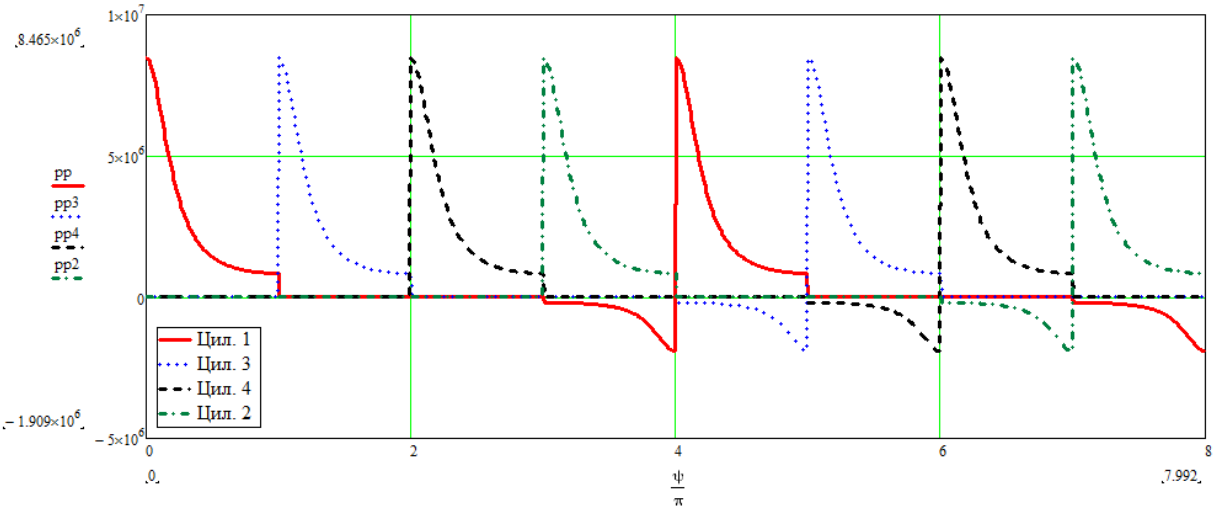


Рис. 5. Диаграмма зависимости давления в каждом цилиндре от угла поворота коленчатого вала

Процедуру интегрирования ОДУ проводим методом Рунге-Кутты 4 порядка (рис. 6).

$$\begin{aligned}
&Rk4(y_0, t_0, t_k, h, D) := \\
&\quad t \leftarrow t_0 \\
&\quad y \leftarrow y_0 \\
&\quad Res \leftarrow \text{augment}\left[(t), y^T\right] \\
&\quad \text{while } t \le t_k \\
&\qquad k_1 \leftarrow D(t, y) \\
&\qquad k_2 \leftarrow D\left(t + \frac{h}{2}, y + \frac{h}{2}\cdot k_1\right) \\
&\qquad k_3 \leftarrow D\left(t + \frac{h}{2}, y + \frac{h}{2}\cdot k_2\right) \\
&\qquad k_4 \leftarrow D(t + h, y + h\cdot k_3) \\
&\qquad t \leftarrow t + h \\
&\qquad y \leftarrow y + \frac{h}{6}\cdot(k_1 + 2\cdot k_2 + 2\cdot k_3 + k_4) \\
&\qquad Res \leftarrow \text{stack}\left[Res, \text{augment}\left[(t), y^T\right]\right] \\
&\quad \text{return } Res
\end{aligned}$$

Рис. 6. Процедура интегрирования ОДУ

На рис. 6 y_0 –вектор начальных условий; t_0, t_k – пределы интервала интегрирования; h–фиксированный шаг интегрирования; D(t,y) –функция двух переменных, вычисляющая производные.

Результатом решения будет являться матрица, в которой первый столбец – аргумент, второй и последующие – искомые функции.

По полученной в результате интегрирования ОДУ (49) матрице, строим график зависимости угловой скорости коленчатого вала от времени (рис. 7).

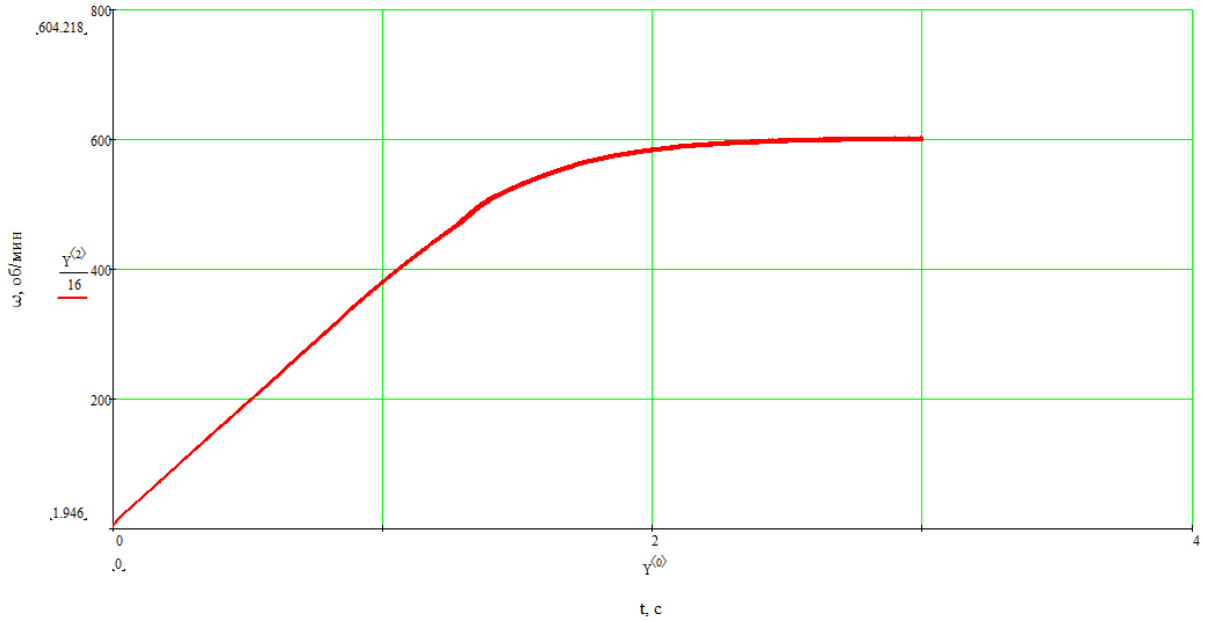


Рис. 7. График зависимости угловой скорости коленчатого вала от времени

Из графика видно, что время выхода двигателя на установившийся режим с угловой скоростью коленчатого вала 600 об/мин, при условии запуска его со стартера, составляет порядка 2 секунд.

Список литературы

1. Лурье А.И. Аналитическая механика. М. Гос. изд. физико-математической литературы, 1961. 824 с.

2. Калиткин Н.Н. Численные методы. М., Наука, 1978. 512 с.

3. Лоусон Ч., Хенсон Р. Численное решение задач метода наименьших квадратов. М., Наука, 1986. 232 с.

4. Стуканов В.А. Основы теории автомобильных двигателей и автомобиля. М. ФОРУМ – ИНФРА-М, 2005. 367 с.

Андреев Сергей Сергеевич, магистр, aiax@tsu.tula.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Мягков Юрий Вячеславович, канд. техн. наук, доц., aiax@tsu.tula.ru, Россия, Тульский государственный университет,

Курицин Валерий Владимирович, инженер, aiax@tsu.tula.ru. Россия, Тула, Тульский государственный университет

MATHEMATICAL MODEL OF THE MOTOR VIBRATIONS

S.S. Andreev, Y.V. Myagkov, V.V. Kuritsin

In this paper we first constructed a universal mathematical 3D model of the internal combustion engine vibrations, applicable for both in-line and for the V-engine models.

Key words: internal combustion engine, vibrations, mathematical model.

Andreev Sergej Sergeevich, master, aiax@tsu.tula.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Myagkov Jurij Vjacheslavovich, candidate of technical sciences, docent, aiax@tsu.tula.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Kuritsin Valeriy Vladimirovich, engineer, aiax@tsu.tula.ru. Russia, Tula, Tula State University

УДК 658.5.012.1

ОПТИМИЗАЦИЯ КОЛИЧЕСТВЕННОГО СОСТАВА РЕМОНТНЫХ БРИГАД ПРИ УПРАВЛЕНИИ КАЧЕСТВОМ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

М.А. Носов, А.Л. Сабинина, Н.В. Анцева

Представлена методика управления качеством технического обслуживания и ремонта оборудования промышленного предприятия по критерию оптимального количественного состава ремонтных бригад предприятия. Выявлены способы его оптимизации, приведены способы нахождения показателей качества функционирования ремонтной службы.

Ключевые слова: управление качеством, производственный процесс, техническое обслуживание, ремонт, ремонтные бригады, численность персонала

В настоящее время все более актуальной становится задача рациональной организации на промышленных предприятиях работ по техническому обслуживанию и ремонту основного технологического оборудования с целью увеличения его работоспособности и долговечности, уменьшения длительности простоев и увеличения на этой основе

производительности труда. Актуальность данной задачи обусловлена рядом причин: техническое обслуживание и ремонт должны выполняться быстро и эффективно, чтобы не было простоя оборудования, и качественно, чтобы не приходилось ремонтировать оборудование постоянно, а его качественные характеристики (работоспособность, надежность, долговечность) были на высоком уровне.

С целью сохранения при эксплуатации значений параметров основного технологического оборудования в установленных пределах на промышленных предприятиях применяют различные методы и системы технического обслуживания и ремонта, предупреждающие неожиданный для производства выход его из строя, которые должны иметь такую структуру ремонтного цикла и содержание отдельных видов ремонта и технического обслуживания (ТО), чтобы при наименьших затратах времени и средств обеспечить поддержание технологического оборудования в работоспособном состоянии [1 – 6].

Техническое обслуживание и ремонт являются видами работ (видами воздействия на изделие) в типовом жизненном цикле любого изделия, в том числе и технологического оборудования. Необходимым условием для выполнения ТО и ремонта является наличие на предприятии системы ТО и ремонта технологического оборудования (СТОИР ТО), включающей [7]:

– технологическое оборудование – объекты ТО и ремонта;

– средства ТО и ремонта;

– исполнителей ТО и ремонта (организации, специалисты);

– документацию (конструкторскую, в том числе эксплуатационную и ремонтную, нормативную, организационную, технологическую и др.), устанавливающую требования к составляющим СТОИР ТО и связям между ними.

Высокие технико-экономические показатели СТОИР ТО, могут быть достигнуты лишь в результате систематической работы, проводимой одновременно в следующих направлениях [8]:

– повышения долговечности и ремонтоспособности выпускаемого и находящегося в эксплуатации оборудования;

– улучшения содержания действующего оборудования;

– четкого выдерживания графиков технического обслуживания и ремонта оборудования;

– повышения производительности труда ремонтных рабочих;

– улучшение качества ремонтных работ.

Для практической реализации СТОИР ТО на промышленных предприятиях организуются ремонтные службы. Они должны обеспечить эффективность СТОИР ТО, определяющую ее способность поддерживать и восстанавливать заданные свойства технологического оборудования и обеспечивать заданный уровень его технической готовности при оптимальных затратах времени, труда и средств [7]. Эффективность СТОИР ТО

может быть оценена соответствующими показателями. В соответствии с [9] показатели системы технического обслуживания и ремонта позволяют оценить затраты времени, труда и средств на техническое обслуживание и ремонты и содержат затраты, обусловленные конструкцией и техническим состоянием изделия (оперативные затраты), и затраты, обусловленные организацией, технологией выполнении технического обслуживания и ремонтов, материально-техническим обеспечением, квалификацией персонала, условиями окружающей среды и т. д.

Данная статья посвящена одной из составляющих СТОИР ТО – исполнителям ТО и ремонта, и управления системой за счёт повышения производительности труда ремонтных бригад и оптимизации их количественного состава. Определить оптимальное число ремонтных рабочих достаточно сложно, так как помимо планового ремонта на промышленных предприятиях возникает необходимость ремонта по потребности, и, как следствие, приходится постоянно решать вопросы по распределению персонала по видам отказа и определять количественный состав ремонтных бригад. Для этого требуется определить оптимальное количество ремонтного персонала, что удобно осуществить с помощью применения методов теории массового обслуживания.

Для решения этой задачи недостаточно знать лишь средний период между отказами и среднее время выполнения ремонта. Необходимо рассчитать все другие показатели качества функционирования исследуемой системы массового обслуживания, как при существующем варианте ее организации, так и при всех других возможных вариантах, определить экономические показатели хозяйственной деятельности при каждом из вариантов, выбрать на этом основании наилучший вариант.

Методика определения оптимального количества ремонтного персонала для промышленного предприятия состоит из нескольких этапов.

Сначала определяются вероятности различных состояний системы (т. е. вероятности того, что в системе будет находиться точно $k = 0, 1, 2, 3,\ldots$ требований на обслуживание) при существующей численности ремонтников (например, $r_0 = 4$, а также при другой возможной численности, например при $r = 2, 3, 5, 6$ и 7.

Используемые в формулах показатели потока отказов и длительности обслуживания и ремонта рассчитываются по соответствующим формулам: параметр потока отказов λ определяется через среднюю наработку на отказ $\overline{T}$ по зависимости $\lambda = 1/\overline{T}$, а время обслуживания определяется для каждого предприятия индивидуально.

Вероятность того, что занято k ремонтников, при условии, что число отказавшего оборудования, находящихся в системе, не превосходит числа ремонтников [10]:

$$P_k = \frac{s!}{k!\cdot(s-k)!}\cdot\left(\frac{\lambda}{\nu}\right)^k \cdot P_0,\ (1 \le k \le r), \qquad (1)$$

где s – наибольшее возможное число отказавшего оборудования, находящихся в ремонте одновременно; r – число ремонтников; P_0 – вероятность нулевого состояния системы.

Вероятность того, что в системе находится k требований, для случая, когда их число больше числа ремонтников:

$$P_k = \frac{s!}{r^{k-r}\cdot(s-k)!\cdot r!}\cdot\left(\frac{\lambda}{\nu}\right)^k \cdot P_0,\ (r < k \le s). \qquad (2)$$

После завершения расчетов для проверки подсчитывают суммы по столбцам, которые должны быть равными 1, как вероятности полной системы событий.

Вероятности всех возможных состояний являются основой для расчетов остальных характеристик качества функционирования обслуживающей системы $(M, M_1, M_2, u, d, h, 1-u)$, а также для определения ожидаемых значений экономических показателей хозяйственной деятельности исследуемых производственных подразделений.

Среднее число оборудования M, находящегося в ремонте (в обслуживании и в ожидании обслуживания), получается умножением вероятности определенного состояния системы P_k на соответствующее ему k и сложением полученных произведений по каждому из вариантов организации обслуживающей системы:

$$M = \sum_{k=1}^{s} k \cdot P_k = \left[\sum_{k=0}^{r} \frac{s!}{(k-1)!\cdot(s-k)!}\cdot\left(\frac{\lambda}{\nu}\right)^k + \sum_{k=r+1}^{s} \frac{s!\cdot k}{r^{k-r}\cdot(s-k)!\cdot r!}\cdot\left(\frac{\lambda}{\nu}\right)^k\right]\cdot P_0. \qquad (3)$$

Искомые значения M для каждого из вариантов организации системы показаны в табл. 1. При проведении расчетов условно приняты следующие значения параметров: параметр потока отказов $\lambda = 0{,}0011897$, параметр времени обслуживания $\nu = 0{,}1343$.

Как показывают расчеты, при наличии всего лишь двух ремонтников ожидаемые простои будут довольно велики – в среднем, в ремонте и в ожидании будет простаивать полтора станка $(M = 1{,}52196)$. При увеличении числа ремонтников среднее количество простаивающих станков уменьшается, асимптотически приближаясь к какому-то предельному постоянному уровню, равному примерно 1,115.

Аналогично этому изменяется и показатель средней очереди отказавшего оборудования, ожидающего подхода ремонтника M_1, представленный также в табл. 1:

$$M_1 = \sum_{k=r+1}^{s}(k\text{-}r)\cdot P_k = \sum_{k=r+1}^{s}\frac{s!\cdot(k-r)}{r^{k-r}\cdot(s-k)!\cdot r!}\cdot\left(\frac{\lambda}{\nu}\right)^k\cdot P_0. \quad (4)$$

Таблица 1

Значения среднего количества оборудования, находящегося в ремонте при различном количестве ремонтного персонала

k	$r=2$	$r=3$	$r=4$	$r=5$	$r=6$	$r=7$
M	1,52196	1,18123	1,12563	1,11675	1,11546	1,11525
M_1	0,41848	0,07020	0,01059	0,00159	0,00024	0,00004

При наличии на предприятии двух ремонтников средняя очередь составила отказавшего оборудования бы 0,41848. При увеличении их численности она уменьшается, полностью исчезая после $r=7$.

Графики изменения среднего количества простаивающего оборудования M и средней длины очереди M_1 показаны на рис. 1.

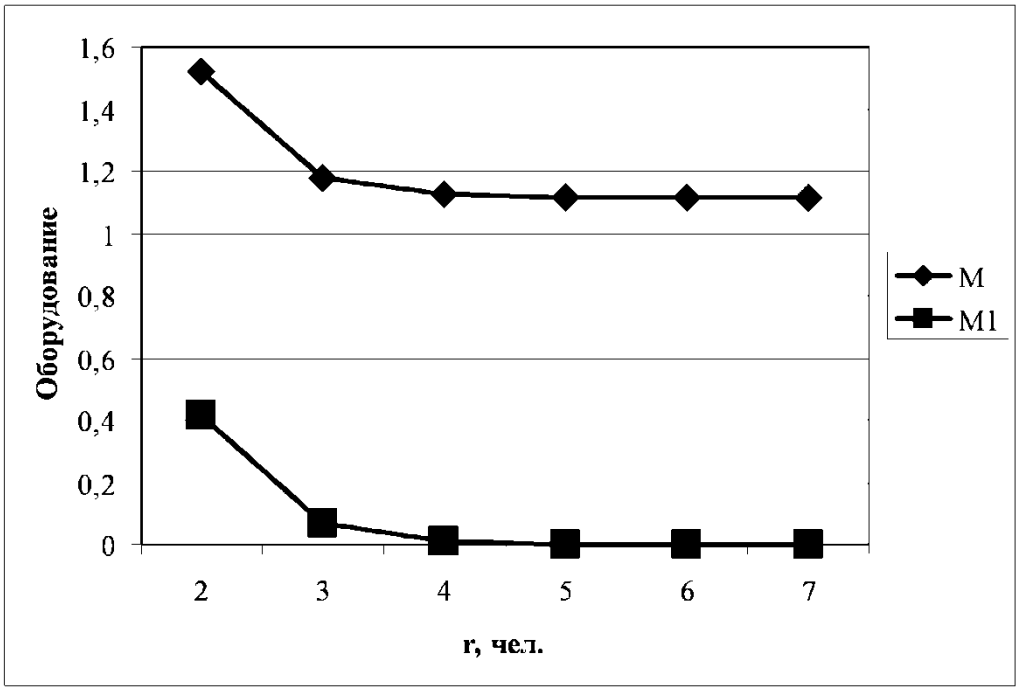


Рис. 1. Изменение среднего числа оборудования, находящегося в ремонте M и оборудования, ожидающего обслуживания M_1 в зависимости от принятой численности ремонтного персонала

Среднее количество незанятых ремонтников M_2:

$$M_2 = \sum_{k=0}^{r-1}(r-k)\cdot P_k = \sum_{k=0}^{r-1}\frac{s!\cdot(r-k)!}{k!\cdot(s-k)!}\cdot\left(\frac{\lambda}{\nu}\right)^k\cdot P_0. \quad (5)$$

С ростом их общей численности увеличивается M_2, как видно из расчетов в табл. 2, каждый раз примерно на столько же, на сколько повышается и их общая численность.

Таблица 2

Расчет среднего количества незанятых ремонтников при различной их численности

k	$r=2$	$r=3$	$r=4$	$r=5$	$r=6$	$r=7$
M_2	0,91620	1,88541	2,88488	3,88484	4,88478	5,88479

График изменения среднего количества незанятого ремонтного персонала показан на рис. 2.

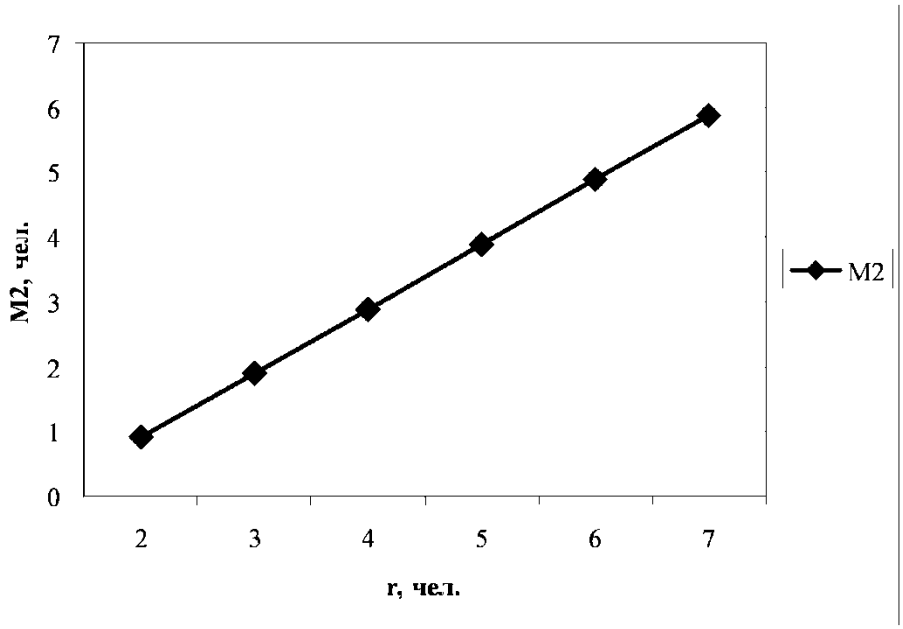


Рис. 2. Изменение среднего количества незанятых слесарей M_2 в зависимости от их общей численности

По рассчитанным показателям определяются коэффициенты:

1) коэффициент простоя оборудования в обслуживании и в ожидании его u – отношение среднего числа оборудования M, находящегося в ремонте, к общему количеству оборудования s:

$$u = \frac{M}{s} = \frac{1}{s} \cdot \sum_{k=1}^{s} k \cdot P_k =$$

$$= \frac{P_0}{s} \cdot \left[\sum_{k=0}^{r} \frac{s!}{(k-1)! \cdot (s-k)!} \cdot \left(\frac{\lambda}{\nu}\right)^k + \sum_{k=r+1}^{s} \frac{s! \cdot k}{r^{k-r} \cdot (s-k)! \cdot r!} \cdot \left(\frac{\lambda}{\nu}\right)^k \right]; \qquad (6)$$

2) коэффициент нахождения оборудования вне системы обслуживания – разность между 1 и u

$$u' = 1 - u = 1 - M / s; \quad (7)$$

3) коэффициент простоя оборудования в ожидании начала обслуживания d – отношение среднего размера очереди M_1 к общему количеству оборудования s:

$$d = \frac{M_1}{s} = \frac{1}{s} \cdot \sum_{k=r+1}^{s} (k-r) \cdot P_k = \frac{P_0}{s} \cdot \sum_{k=r+1}^{s} \frac{s! \cdot (k-r)}{r^{k-r} \cdot (s-k)! \cdot r!} \cdot \left(\frac{\lambda}{\nu}\right)^k; \quad (8)$$

4) коэффициент простоя ремонтников h – отношение среднего количества незанятых ремонтников M_2 к их общей численности:

$$h = \frac{M_2}{r} = \frac{1}{r} \cdot \sum_{k=0}^{r} (r-k) \cdot P_k = \sum_{k=0}^{r-1} P_k - \frac{1}{r} \cdot \sum_{k=0}^{r-1} k \cdot P_k. \quad (9)$$

Все приведенные выше показатели должны стремиться к определенным значениям (первый и третий – к 0, второй и четвертый – к 1), отражающим оптимальное число ремонтников. Однако, после достижения определённого количества человек в составе ремонтной бригады, значения коэффициентов перестают изменяться. Это говорит о том, что переизбыток ремонтников не приведет к повышению эффективности работы ремонтной бригады.

Поэтому после определения показателей качества функционирования системы, необходимо подобрать критерий оптимальности для расчета потребного количества персонала ремонтной службы. Таким критерием может быть универсальный показатель экономической деятельности предприятия – минимальные затраты на 1 рубль товарной продукции (ТП), считая его функцией от варианта организации системы, при постоянстве влияния прочих факторов [11].

Таким образом, предложено решение актуальной научной задачи, имеющей важное хозяйственное значение и заключающейся в повышении качества технического обслуживания и ремонта основного технологического оборудования промышленного предприятия за счет управления количественным составом ремонтных бригад.

Список литературы

1. Аникеева О.В., Ивахненко А.Г. Организация функциональной диагностики металлорежущих станков // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии, 2011. № 2-3 (286). С. 133-138.

2. Аникеева О.В., Ивахненко А.Г. Проблемы внедрения системы TPM на машиностроительных предприятиях и пути их решения // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2012. № 1. С. 22-27.

3. Аникеева О.В., Ивахненко А.Г., Куц В.В. Управление качеством этапа планирования процесса ремонта металлорежущих станков // Известия Юго-Западного государственного университета, 2012. № 4-2 (43). С. 120а-126.

4. Анцев В.Ю., Ковалёва А.Е. Структурно-функциональная модель процесса технического обслуживания и ремонта грузоподъемного оборудования // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2015. Вып. 7. Ч. 2. С. 72-78.

5. Анцев В.Ю., Толоконников А.С., Ковалева А.Е. Управление эксплуатацией грузоподъемных машин на основе процессного подхода // Подъемно-транспортное дело, 2012. № 1. С. 5-7.

6. Анцев В.Ю., Федоров А.В., Федоров А.В. Стандартизация взаимодействий подразделений ремонтной службы машиностроительного предприятия // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2008. № 5. С. 42-48.

7. ГОСТ 15.601-98. Система разработки и постановки продукции на производство. Техническое обслуживание и ремонт техники. Основные положения. Введ. 1999-07-01. Минск: Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации; М.: Изд-во стандартов, 1999. 5 с.

8. Справочник механика машиностроительного завода. В 2 т. Т. 1. Организация и конструкторская подготовка ремонтных работ / Р.А. Носкин [и др.]. 2-е изд. М.: Машиностроение, 1970. 263 с.

9. ГОСТ 18322-78. Система технического обслуживания и ремонта техники. Термины и определения. Взамен ГОСТ 18322-73; введ. 1980-01-01. М.: Изд-во стандартов, 1986. 13 с.

10. Алдохин И.П. Теория массового обслуживания в промышленности. М., «Экономика», 1970. 207 с.

2. Лабскер Л.Г., Бабешко Л.О. Теория массового обслуживания в экономической сфере: учеб. пособие для вузов. М.: Банки и биржи, ЮНИТИ, 1998. 319 с.

Носов Михаил Александрович, генеральный директор, tpz@tulammo.ru, Россия, Тула, Тульский патронный завод,

Сабинина Анна Львовна, д-р экон. наук, проф., зав. кафедрой, fim@tsu.tula.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Анцева Наталья Витальевна, канд. техн. наук, доц., n.anzeva@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет.

OPTIMIZATION OF THE MAINTENANCE CREWS' QUANTITATIVE COMPOSITION IN THE QUALITY MANAGEMENT OF INDUSTRIAL ENTERPRISES' EQUIPMENT MAINTENANCE

M.A. Nosov, A.L. Sabinina, N.V. Antseva

The quality management method of repair and maintenance of an industrial enterprises' equipment based on optimal quantitative composition of enterprise's maintenance crew is presented in the article. The technique of its optimization is defined and the ways to discover the quality factors of repair service's work are shown.

Key words: quality management, production process, technical maintenance, repair, maintenance crews, number of persons employed.

Nosov Mikhail Aleksandrovich, CEO, tpz@tulammo.ru, Russia, Tula, The Tula Cartridge Works,

Sabinina Anna L'vovna, doctor of economic sciences, professor, head of department, fim@tsu.tula.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Antseva Natal'ya Vital'evna, candidate of technical science, docent, n.anzeva@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 621.91.02

МОДЕРНИЗАЦИЯ ФИНИШНЫХ ОПЕРАЦИЙ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ШТАМПОВОЧНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ В УСЛОВИЯХ ТУЛЬСКОГО ПАТРОННОГО ЗАВОДА

С.Г. Волжин

В статье рассмотрена технология изготовления штамповочного инструмента для Тульского патронного завода. Проведен подробный анализ этапа зачистки профиля и показано, что эффективность данного этапа можно повысить за счет применения борфрез типа «овал с закруглением». Исследованы особенности конструкции и условия эксплуатации таких борфрез и предложено применение цельных борфрез. Для подбора параметров изготовления и эксплуатации цельных борфрез предлагается использовать принципы робастного проектирования Г. Тагути.

Ключевые слова: режущий инструмент, операция зачистки, борфреза типа «овал с закруглением», цельная борфреза, робастное проектирование.

При производстве основной продукции Тульского патронного завода широко применяется операция штамповки для выдавливания оболочек пуль с использованием матриц, пример типовых профилей которых представлен на рис. 1. От точности изготовления матрицы в большой степени зависит качество полученной продукции.

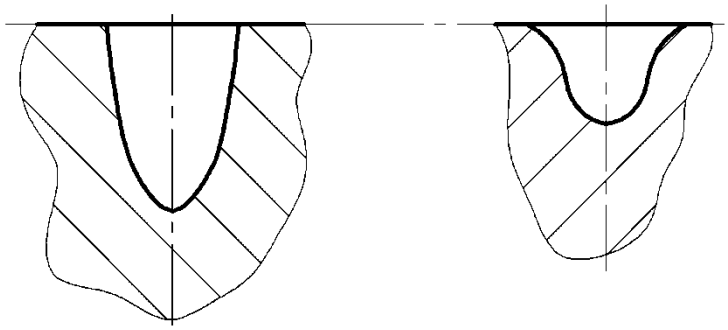


Рис. 1. Типовые профили матриц Тульского патронного завода

Точность формирования профиля матрицы определяется точностью исходной заготовки, точностью последующих операций обработки профиля и термообработки, а также точностью финишной зачистки профиля, которые в свою очередь зависят от совершенства применяемого инструмента. Степень влияния используемых операций на совершенство и дефектность изготавливаемого инструмента представлена в виде схемы на рис. 2. В данной работе анализируется последний этап технологии изготовления матрицы.

На Тульском патронном заводе для операции обработки профиля матрицы применяются перовые фрезы, что приводит к следующим проблемам:

1. Инструмент не является самоцентрирующимся, так как имеет всего две режущие кромки.

2. Точность получаемого профиля обеспечивается фасонной поверхностью режущего инструмента и в последствии дорабатывается с помощью операции зачистки. При этом с помощью операции зачистки погрешности формы исправить невозможно, а параметры шероховатости поверхности исправляются незначительно.

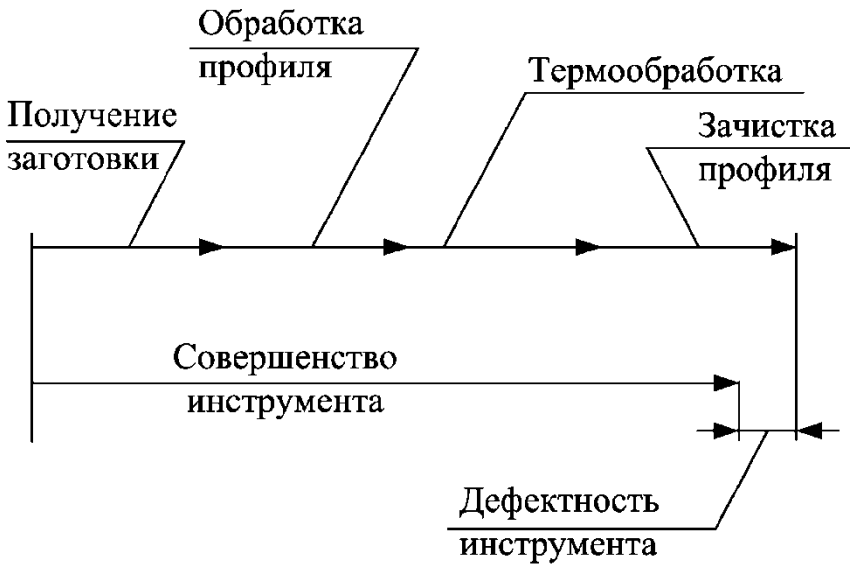


Рис. 2. Схема формирования точности профиля матрицы

Указанные проблемы можно преодолеть с помощью использования более совершенного инструмента, например, борфрезы типа «овал с закруглением» (рис. 3) [1]. Однако работа этих борфрез проходит в очень тяжелых условиях:

1. Очень большой крутящий момент на инструменте, так как работают одновременно все режущие кромки борфрезы.

2. Затруднено удаление стружки из зоны резания.

3. Из-за большой частоты вращения борферзы приходится работать с очень маленькой подачей на зуб S_Z. Например, при частоте вращения инструмента $n_и = 16000$ мин$^{-1}$, числе зубьев $Z = 30$ и минутной подачи $S_{мин} = 200$ мм/мин, подача на зуб составит

$$S_Z = \frac{S_{мин}}{Z \cdot n_и} = \frac{200}{30 \cdot 16000} = 0{,}00042 \text{ мм/зуб.}$$

Для обеспечения работы борфрез в таких условиях необходимо обеспечить высокое качество технологического процесса их изготовления.

Технологический процесс изготовления борфрез разделяется на четыре основных этапа:

– изготовление заготовки твердосплавной режущей части;

– изготовление стального хвостовика;

– припаивание режущей части к хвостовику;

– формирование на режущей части зубьев алмазными шлифовальными кругами с использованием технологий глубинного шлифования («по целому»).

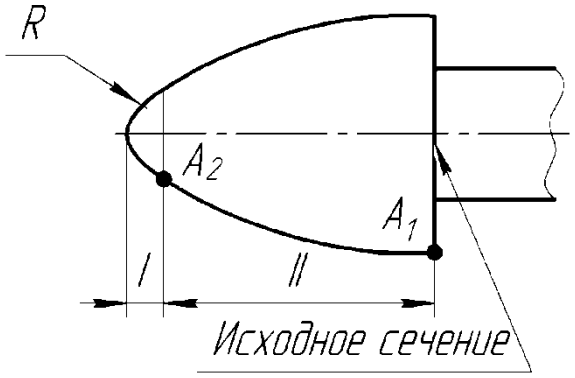


Рис. 3. Твердосплавная борфреза типа «овал с закруглением»

Важность каждого этапа технологического процесса изготовления борфрез была оценена экспертным методом. Использовалась десятибалльная оценка важности, причём оценки, приведённые в таблице, являются средними для мнений семи экспертов. Экспертная группа предварительно оценивалась по степени согласованности мнений с помощью коэффициента конкордации [2, 3], величина которого составила $W = 0{,}83$. Весовые коэффициенты g_i определялись по формуле

$$g_i = \frac{\sum_{1}^{7} Q_i}{\sum_{1}^{4}\sum_{1}^{7} Q_i},$$

где $\sum_{1}^{7} Q_i$ – сумма баллов по строке; $\sum_{1}^{4}\sum_{1}^{7} Q_i$ – общая сумма баллов.

В соответствии с таблицей ранжированный ряд важности этапов технологического процесса изготовления борфрез выглядит следующим образом:

$$g_{III} > g_{IV} > g_I > g_{II}.$$

По мнению экспертов, наиболее важным этапом технологического процесса в настоящее время является операция припаивания, поэтому данную операцию целесообразно исследовать подробнее.

Пайка в работе фрезы играет двоякую роль. Стык, обеспечиваемый пайкой, передаёт крутящий момент $M_{\text{кр}}$, он же является своеобразным предохранителем, так как при избыточных температурах происходит распайка стыка либо его поломка. В обоих случаях это обеспечивает относительную безопасность рабочего. От качества процесса пайки зависит качество изготовления борфрезы в целом [4].

Определение весовых коэффициентов различных этапов технологии изготовления бор фрез

Этапы технологического процесса	Балльные оценки экспертов Q_i							Сумма баллов $\sum_{1}^{7} Q_i$	Весовой коэффициент g_i
	1	2	3	4	5	6	7		
I	9	8	10	7	6	10	8	58	0,258
II	5	7	8	5	4	7	8	44	0,196
III	10	9	10	8	10	9	8	64	0,284
IV	9	8	9	8	7	9	9	59	0,262
$\sum_{1}^{4}\sum_{1}^{7} Q_i$								225	$\sum_{1}^{7} g_i = 1.0$

Альтернативой повышению качества процесса пайки борфрез является проектирование новой конструкции борфрезы (рис. 4), имеющей следующие особенности:

1. Меньшее число зубьев для уменьшения крутящего момента и увеличения каналов для отвода стружки из зоны резания. При этом число зубьев должно быть кратно трем, что согласно опыту ООО НПП «РИТ-Инжиниринг» обеспечивает минимальные погрешности получаемой формы.

2. Отказ от пайки в пользу цельного инструмента.

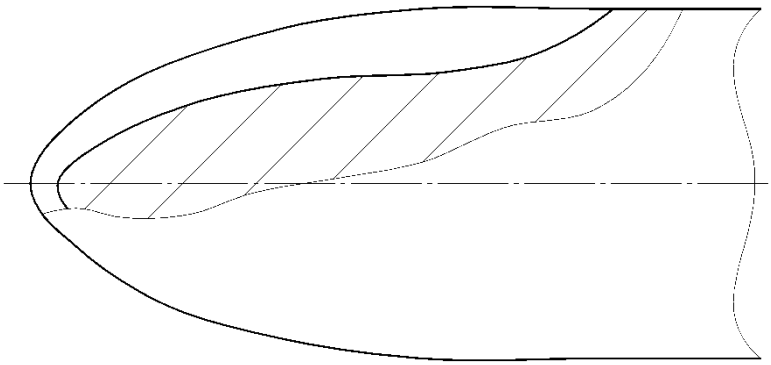


Рис. 4. Цельная борфреза с сечением вдоль винтовых линий зубьев

Для формирования рабочей части таких борфрез применяются многокоординатные шлифовально-заточные станки и технологии «глубинного» шлифования. Одной из самых передовых методик для подготовки управляющей программы к станкам с ЧПУ является методика, применяемая ООО НПП «РИТ-Инжиниринг» [5–7]. Она заключается в использовании специального программно-методического комплекса, позволяющего в диалоговом режиме ввести параметры инструмента, посмотреть его сечения и получить его 3D-модель с применением виртуального аналога шлифовально-заточного станка с ЧПУ для последующей генерации управляющей программы. Для подбора параметров изготовления и эксплуатации такого инструмента, обеспечивающих его максимальную эффективность, нужно использовать принципы робастного проектирования Г. Тагути [8, 9]. Применение цельных борфрез спроектированных с помощью данного метода позволит повысить качество формируемого профиля матрицы и снизить себестоимость их изготовления.

Список литературы

1. Борфрезы твердосплавные. Каталог // Научно-производственное предприятие РИТ-Инжиниринг. [Электронный ресурс]. URL: http://rit-i.ru/catalog/borfrezy-tverdosplavnye (дата обращения 25.11.2016).

2. Басовский Л.Е., Протасьев В.Б. Управление качеством: учебник. М.: Инфра-М, 2016. 231 с.

3. Трушин Н.Н. Организационно-технологическая структура производственного процесса на машиностроительном предприятии. Тула: Изд-во ТулГУ, 2003. 230 с.

4. Волжин С.Г. Анализ технологического процесса изготовления многолезвийного инструмента с припаиваемым хвостовиком // Проблемы и перспективы развития машиностроения: сб. науч. трудов междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 60-летию Липецкого государственного технического университета. Ч. 1. 17-18 ноября 2016 г. Липецк: Изд-во Липецкого государственного технического университета, 2016. С. 79-83.

5. Протасьев В.Б., Истоцкий В.В. Проектирование фасонных инструментов, изготавливаемых с использованием шлифовально-заточных станков с ЧПУ. М.: Инфра-М, 2011. 128 с.

6. Протасьев В.Б., Истоцкий В.В. состояние производства современного металлорежущего инструмента в России // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2013. Вып. 8. С. 223-231.

7. Протасьев В.Б., Истоцкий В.В. Подготовка управляющих программ к шлифовально-заточным станкам с ЧПУ при изготовлении сложнопрофильных режущих инструментов // Справочник. Инженерный журнал с приложением. 2012. № 7. С. 8-12.

8. Управление качеством. Робастное проектирование. Метод Тагути. Пер. с англ. М.: «Сейфи», 2002г. 384 с.

9. Анцев В.Ю., Иноземцев А.Н. Всеобщее управление качеством: учеб.пособие для вузов. Тула: Изд-во ТулГУ, 2005. 244 с.

Волжин Сергей Геннадьевич, технический директор, tpz@tulammo.ru, Россия, Тула, ОАО «Тульский патронный завод»

MODERNIZATION OF FINAL POLISHING IN THE STAMPING TOOL'S MANUFACTURING IN CONDITIONS OF THE TULA CARTRIDGE WORKS

S.G. Volzhin

In the article the technology of manufacturing of stamping tool for the Tula Cartridge Works is considered. The detailed analysis of the stage of profile finishing is carried out and it is shown that the efficiency of this stage can be increased by using burr, type "oval with rounded". The design features and working conditions of the burrs are examined and it is suggested to use solid burrs. For selection of parameters of manufacturing and operation it is suggested the using of the G. Taguchi's principles of robust design.

Key words: cutting tools, operation of profile finishing, burr type "oval with rounded", solid burr, robust design.

Volzhin Alexander Vitalyievich, candidate of technical science, docent, a.antsev@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 539.3:534.26

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАКОНОВ НЕОДНОРОДНОСТИ ПОКРЫТИЯ ТЕРМОУПРУГОЙ ПЛАСТИНЫ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ НАИМЕНЬШЕЕ ЗВУКООТРАЖЕНИЕ

Н.В. Ларин

Решены прямая и обратная задачи дифракции плоской звуковой волны на однородной термоупругой пластине с непрерывно-неоднородным покрытием.

Ключевые слова: отражение и прохождение звуковых волн, однородная термоупругая пластина, неоднородный термоупругий плоский слой, обратная задача дифракции, законы неоднородности.

Звукоотражающие свойства тел можно понизить с помощью пассивных покрытий различной структуры. Исследованы прямая и обратная задачи дифракции плоской волны на круговом цилиндре, оснащенном перфорированным покрытием [1]. Последнее представляет собой полый цилиндр, разделенный жесткими перегородками на цилиндрические секторы, заполненные средой. Показано, что в прямой задаче поле дифракции на цилиндре с покрытием более интенсивно, чем поле на гладком цилиндре. В обратной задаче выбраны параметры среды резонаторов перфорированного покрытия, обеспечивающие заданный уровень гашения поля дифракции на цилиндре.

На основе созданной импедансной теории поглощения и рассеяния звука линейно упругими телами [2, 3] предложена общая схема поглощающих и нерассеивающих покрытий нового типа с повышенной эффективностью [4]. Такое покрытие, названное покрытием с протяженной реакцией, представляет собой совокупность дискретных элементов, каждый из которых определенным образом связан с соседними элементами. Оно может быть реализовано в виде устройств из пористых материалов или резонансных структур. Приведены теория таких покрытий и метод определения наилучших значений его параметров. Проанализированы плоское и цилиндрическое покрытия с протяженной реакцией [4−6]. Результаты компьютерного моделирования показали, что предложенные покрытия значительно превосходят по эффективности лучшие из известных покрытий.

В данной статье применительно к термоупругому плоскому телу рассмотрен иной подход к созданию пассивных покрытий тел для снижения рассеянного звукового поля [7], предложенный ранее для чисто упругого плоского тела. Он состоит из двух основных этапов. На первом этапе решается прямая задача дифракции звука на теле с непрерывно-неоднородным покрытием (см., например, [8−18]). Такое покрытие имеет вид упругого слоя, материальные параметры которого являются непрерывными функциями его толщины. На втором этапе (при решении обратной

задачи) неизвестные коэффициенты этих функций определяются из решения задачи минимизации функционала, выражающего интенсивность звукоотражения. Для линейных и параболических законов неоднородности упругого слоя предложены алгоритмы минимизации данного функционала [7, 19, 20]. Заметим, что непрерывно-слоистое покрытие может быть реализовано с помощью системы тонких однородных упругих слоев с различными значениями материальных констант [21].

Во всех указанных выше работах тепловые процессы в телах не учитывались. Решена прямая задача дифракции звука на круговом цилиндре с непрерывно-слоистым термоупругим покрытием [22]. Однако в ней цилиндр полагался абсолютно жестким. Также актуальности настоящей статьи способствуют исследования, проведенные ранее [23−26], которые показали, что характеристики звукоотражения термоупругих тел существенно отличаются от соответствующих характеристик чисто упругих тел.

1. Постановка и решение прямой задачи. Рассмотрим однородную изотропную термоупругую плоскую пластину толщиной H с покрытием в виде неоднородного по толщине изотропного термоупругого слоя толщиной h (рис. 1). Пластина с покрытием граничит с жидкими полупространствами. Система прямоугольных координат x, y, z выбрана таким образом, что ось x лежит на границе раздела пластины и жидкости, а ось z направлена вниз по нормали к поверхности пластины. Материал пластины характеризуется плотностью ρ^0, упругими постоянными Ламе λ^0 и μ^0, температурным коэффициентом линейного расширения α_T^0, коэффициентом теплопроводности λ_T^0, объемной теплоемкостью c_ε^0. Плотность материала покрытия $\rho = \rho(z)$ и его объемная теплоемкость $c_\varepsilon = c_\varepsilon(z)$ описываются непрерывными функциями координаты z, а его модули упругости $\lambda = \lambda(z)$ и $\mu = \mu(z)$, температурный коэффициент линейного расширения $\alpha_T = \alpha_T(z)$ и коэффициент теплопроводности $\lambda_T = \lambda_T(z)$ − дифференцируемыми функциями координаты z. Источники тепла в пластине с покрытием отсутствуют.

Нижнее $(r=1)$ и верхнее $(r=2)$ полупространства заполнены невязкими теплопроводными однородными сжимаемыми жидкостями. Жидкости имеют плотности ρ_r, скорости звука c_r, отношения удельных теплоемкостей при постоянных давлении и объеме γ_r, коэффициенты температуропроводности χ_r^T, температурного расширения α_r^T, теплопроводности λ_r^T. Считаем, что в невозмущенном состоянии твердая и жидкие среды имеют одинаковую постоянную температуру T_0.

Пусть из верхнего полупространства на пластину с покрытием наклонно падает плоская звуковая волна, потенциал скоростей которой

$$\Psi_0 = A_0 \exp\left\{i\left[k_{21}^x x + k_{21}^z (z + H + h) - \omega t\right]\right\},$$

$$k_{21}^x = k_{21}\sin\theta,\ k_{21}^z = k_{21}\cos\theta,$$

где A_0 – амплитуда падающей волны; k_{21}^x и k_{21}^z – проекции волнового вектора $\mathbf{k}_{21}$ на оси координат x и z соответственно; k_{21} – волновое число звуковых волн в верхнем полупространстве; ω – круговая частота; θ – угол падения волны. Временной множитель $\exp(-i\omega t)$ в дальнейшем опускаем.

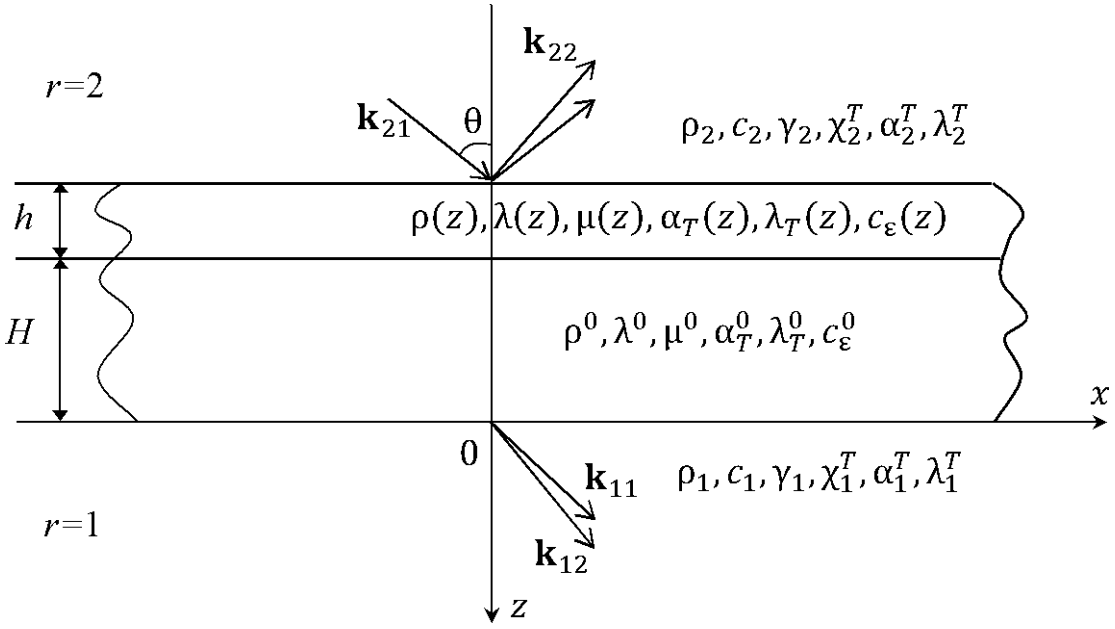


Рис. 1. Геометрия задачи

При падении звуковой волны на термоупругое плоское тело, граничащее с невязкими теплопроводными жидкостями, возникают отраженные от тела и прошедшие через него звуковые и тепловые волны. Кроме того, происходит малая деформация тела, которая сопровождается изменением его температурного поля.

Определим отраженное от пластины с покрытием акустическое поле.

Без ограничения общности полагаем, что волновой вектор падающей волны лежит в плоскости xz. Следовательно, возбуждающее поле не зависит от координаты y. Тогда, поскольку материал пластины является однородным, а неоднородность материала покрытия проявляется лишь по оси z, то от координаты y не должны зависеть ни отраженные, ни прошедшие в нижнее полупространство, ни возбужденные в термоупругом плоском теле волны. Кроме того, в теле будет отсутствовать смещение частиц термоупругой среды по координате y.

Скорость частиц жидкости в нижнем $(r=1)$ и верхнем $(r=2)$ полупространствах представим в виде

$$\mathbf{v}_r = \operatorname{grad}\left(\Psi_{r1} + \Psi_{r2}\right),\ r=1,2,$$

где grad − известный оператор теории поля.

В случае установившихся колебаний потенциалы скоростей звуковых Ψ_{r1} и тепловых Ψ_{r2} волн – решения уравнений Гельмгольца

$$\Delta\Psi_{rs} + k_{rs}^2\Psi_{rs} = 0,\ \Psi_{21} = \Psi_0 + \Psi_{21}^{'};\ r,s=1,2,$$

где $\Psi_{21}^{'}$ – потенциал скоростей отраженной звуковой волны; k_{r1} и k_{r2} – волновые числа звуковых и тепловых волн в r-й среде соответственно. При этом в предположении малости коэффициентов температуропроводности жидкостей $\left(\omega\chi_r^T / c_r^2 << 1\right)$

$$k_{r1} = \frac{\omega}{c_r},\ k_{r2} = \eta_r^T(1+i),\ \eta_r^T = \sqrt{\frac{\omega\gamma_r}{2\chi_r^T}}.$$

Потенциалы скоростей отраженных от термоупругого тела и прошедших через него звуковых и тепловых волн будем искать в виде

$$\Psi_{21}^{'} = V_1\exp\left\{i\left[k_{21}^x x - k_{21}^z\left(z+H+h\right)\right]\right\},\ \Psi_{22} = V_2\exp\left\{i\left[k_{22}^x x - k_{22}^z\left(z+H+h\right)\right]\right\},$$

$$\Psi_{1s} = W_s\exp\left\{i\left[k_{1s}^x x + k_{1s}^z z\right]\right\},\ \left(k_{rs}^x\right)^2 + \left(k_{rs}^z\right)^2 = k_{rs}^2;\ r,s=1,2, \qquad (1)$$

где V_s и W_s − коэффициенты отражения и прохождения соответственно; k_{rs}^x и k_{rs}^z – проекции волнового вектора $\mathbf{k}_{rs}$ на оси x и z соответственно. Согласно закону Снеллиуса [27] $k_{11}^x = k_{12}^x = k_{22}^x = k_{21}^x$.

Определять волновые поля в пластине будем на основе линейной связанной динамической задачи термоупругости однородного изотропного тела [28]. Заметим, что только в «связанном» случае удается обнаружить новые особенности в процессе прохождения [29], а, следовательно, и отражения звука при дифракции плоской звуковой волны на однородной термоупругой пластине.

Представим вектор смещения частиц в термоупругой пластине в виде

$$\mathbf{u}^{(0)} = \operatorname{grad}\left(\Phi_1 + \Phi_2\right) + \operatorname{rot}\boldsymbol{\Phi}_3, \qquad (2)$$

где rot − известный оператор теории поля.

Потенциалы смещения Φ_1, Φ_2, $\boldsymbol{\Phi}_3$ – решения уравнений Гельмгольца [28]

$$\Delta\Phi_s + \kappa_s^2\Phi_s = 0,\ \Delta\boldsymbol{\Phi}_3 + \kappa_3^2\boldsymbol{\Phi}_3 = 0;\ s=1,2, \qquad (3)$$

где κ_1 и κ_2 – волновые числа продольных термоупругих волн; κ_3 – волновое число поперечных упругих волн. При этом [28]

$$\kappa_s^2 = \frac{k_l^2}{2}\left\{1+\delta(1+\varepsilon)-(-1)^s\sqrt{1-2\delta(1-\varepsilon)+\delta^2(1+\varepsilon)^2}\right\},\ s=1,2,\ \ \kappa_3=\frac{\omega}{c_\tau}.$$

Здесь

$$\delta=\frac{k_T^2}{k_l^2},\ k_l=\frac{\omega}{c_l},\ k_T=\eta_T(1+i),\ \eta_T=\sqrt{\frac{\omega}{2\chi_T^0}},$$

$$c_l=\sqrt{\frac{\lambda^0+2\mu^0}{\rho^0}},\ c_\tau=\sqrt{\frac{\mu^0}{\rho^0}},\ \chi_T^0=\frac{\lambda_T^0}{c_\varepsilon^0},\ \varepsilon=\frac{\left(3\lambda^0+2\mu^0\right)^2\alpha_T^{0\,2}T_0}{\left(\lambda^0+2\mu^0\right)c_\varepsilon^0},$$

где k_l и k_T – волновые числа продольных упругих и тепловых волн соответственно; c_l и c_τ – скорости продольных и поперечных упругих волн соответственно; χ_T^0 – коэффициент температуропроводности материала пластины; ε – параметр связанности.

Так как рассматриваемая дифракционная задача является двумерной, то справедливо представление

$$\mathbf{\Phi}_3=\Phi_3(x,z)\mathbf{e}_y, \tag{4}$$

где $\mathbf{e}_y$ – орт оси y.

В силу представления (4) векторное уравнение (3) сводится к одному скалярному уравнению Гельмгольца

$$\Delta\Phi_3+\kappa_3^2\Phi_3=0.$$

Скалярные функции Φ_1, Φ_2, Φ_3 будем искать в виде

$$\begin{aligned}
\Phi_1&=B_1\exp\left\{i\left[\kappa_1^x x+\kappa_1^z z\right]\right\}+B_2\exp\left\{i\left[\kappa_1^x x-\kappa_1^z z\right]\right\},\\
\Phi_2&=C_1\exp\left\{i\left[\kappa_2^x x+\kappa_2^z z\right]\right\}+C_2\exp\left\{i\left[\kappa_2^x x-\kappa_2^z z\right]\right\},\\
\Phi_3&=D_1\exp\left\{i\left[\kappa_3^x x+\kappa_3^z z\right]\right\}+D_2\exp\left\{i\left[\kappa_3^x x-\kappa_3^z z\right]\right\},
\end{aligned} \tag{5}$$

$$\kappa_m^{x\,2}+\kappa_m^{z\,2}=\kappa_m^2,\ m=1,2,3,$$

где κ_m^x и κ_m^z – проекции волнового вектора $\boldsymbol{\kappa}_m$ на оси x и z соответственно. Согласно закону Снеллиуса $\kappa_1^x=\kappa_2^x=\kappa_3^x=k_{21}^x$.

Распространение термоупругих волн в покрытии описывается уравнениями линейной связанной динамической задачи термоупругости неоднородного изотропного тела [30], которая состоит из уравнений движения сплошной среды

$$\frac{\partial\sigma_{xx}}{\partial x}+\frac{\partial\sigma_{xz}}{\partial z}=-\rho\omega^2u_x,\ \frac{\partial\sigma_{zx}}{\partial x}+\frac{\partial\sigma_{zz}}{\partial z}=-\rho\omega^2u_z \tag{6}$$

и уравнения притока тепла

$$\lambda_T \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda_T \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \lambda_T' \frac{\partial T}{\partial z} + i\omega T_0 (3\lambda + 2\mu)\alpha_T \operatorname{div}\mathbf{u} = -i\omega c_\varepsilon T, \qquad (7)$$

записанных для установившегося режима движения. Компоненты тензора напряжений σ_{xx}, σ_{xz}, σ_{zz} связаны с компонентами тензора деформаций ε_{xx}, ε_{xz}, ε_{zz} и изменением температуры T возмущенного покрытия соотношениями Дюгамеля – Неймана [30]

$$\sigma_{xx} = 2\mu\varepsilon_{xx} + \lambda \operatorname{div}\mathbf{u} - (3\lambda + 2\mu)\alpha_T T, \; \sigma_{xz} = 2\mu\varepsilon_{xz},$$
$$\sigma_{zz} = 2\mu\varepsilon_{zz} + \lambda \operatorname{div}\mathbf{u} - (3\lambda + 2\mu)\alpha_T T, \qquad (8)$$
$$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial u_x}{\partial x}, \; \varepsilon_{xz} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x} \right), \; \varepsilon_{zz} = \frac{\partial u_z}{\partial z}.$$

Здесь u_x, u_z – проекции вектора смещения $\mathbf{u}$ на оси x и z соответственно; div – известный оператор теории поля. Штрихом обозначена производная по координате z.

Согласно закону Снеллиуса зависимость составляющих вектора смещения и приращения температуры от координаты x будет иметь вид $\exp\left(ik_{21}^x x\right)$. Поэтому функции u_x, u_z и T будем искать в виде

$$u_x(x,z) = U_1(z)\exp\left(ik_{21}^x x\right), \; u_z(x,z) = U_3(z)\exp\left(ik_{21}^x x\right),$$
$$T(x,z) = \Theta(z)\exp\left(ik_{21}^x x\right). \qquad (9)$$

Подставляя выражения (8) и (9) в уравнения (6), (7), получим систему линейных обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка относительно неизвестных функций $U_1(z)$, $U_3(z)$, $\Theta(z)$

$$A\mathbf{F}'' + B\mathbf{F}' + C\mathbf{F} = 0, \qquad (10)$$

где

$$\mathbf{F} = (U_1, U_3, \Theta)^T,$$
$$A = \operatorname{diag}\{a_{11}, a_{22}, a_{33}\}, \; B = \|b_{mn}\|, \; C = \|c_{mn}\|; \quad m,n = 1,2,3.$$

Здесь

$$a_{11} = \mu, \; a_{22} = \lambda + 2\mu, \; a_{33} = \lambda_T,$$

$$b_{11} = \mu', \; b_{12} = b_{21} = ik_{21}^x(\lambda + \mu), \; b_{13} = b_{31} = c_{32} = 0,$$

$$b_{22} = \lambda' + 2\mu', \; b_{23} = -(3\lambda + 2\mu)\alpha_T, \; b_{32} = i\omega T_0(3\lambda + 2\mu)\alpha_T, \; b_{33} = \lambda_T',$$

$$c_{11} = \rho\omega^2 - {k_{21}^x}^2(\lambda + 2\mu), \; c_{12} = ik_{21}^x\mu', \; c_{13} = -ik_{21}^x(3\lambda + 2\mu)\alpha_T,$$

$$c_{21} = ik_{21}^x\lambda', \; c_{22} = \rho\omega^2 - {k_{21}^x}^2\mu, \; c_{23} = -(3\lambda + 2\mu)'\alpha_T - (3\lambda + 2\mu)\alpha_T',$$

$$c_{31} = -k_{21}^x\omega T_0(3\lambda + 2\mu)\alpha_T, \; c_{33} = i\omega c_\varepsilon - {k_{21}^x}^2\lambda_T.$$

Неизвестные коэффициенты V_s, W_s, B_s, C_s, D_s $(s=1,2)$ в выражениях (1) и (5) определяется из граничных условий.

На соприкасающихся с жидкостями поверхностях термоупургого тела, граничные условия заключаются в равенстве нормальных скоростей частиц термоупругой среды и жидкости, отсутствии на этих поверхностях касательных напряжений, равенстве на них нормального напряжения и акустического давления, в непрерывности акустической температуры и теплового потока на этих поверхностях:

$$z=0:\ -i\omega u_z^{(0)}=v_{1N},\ \sigma_{xz}^{(0)}=0,\ \sigma_{zz}^{(0)}=-p_1,$$

$$T^{(0)}=T_1,\ \lambda_T^0\frac{\partial T^{(0)}}{\partial z}=\lambda_1^T\frac{\partial T_1}{\partial z},$$

$$z=-(H+h):\ -i\omega u_z=v_{2N},\ \sigma_{xz}=0,\ \sigma_{zz}=-p_2,$$

$$T=T_2,\ \lambda_T\frac{\partial T}{\partial z}=\lambda_2^T\frac{\partial T_2}{\partial z}.$$

На поверхности, разделяющей пластину и покрытие, должны быть непрерывны составляющие вектора смещения частиц термоупругих сред, тангенциальные и нормальные напряжения, температура и тепловой поток:

$$z=-H:\ u_x^{(0)}=u_x,\ u_z^{(0)}=u_z,\ \sigma_{xz}^{(0)}=\sigma_{xz},\ \sigma_{zz}^{(0)}=\sigma_{zz},$$

$$T^{(0)}=T,\ \lambda_T^0\frac{\partial T^{(0)}}{\partial z}=\lambda_T\frac{\partial T}{\partial z}.$$

Нормальные компоненты скоростей частиц жидкости v_{rN} акустические давления p_r и акустические температуры T_r определяются выражениями

$$v_{rN}=\frac{\partial(\Psi_{r1}+\Psi_{r2})}{\partial z},\ p_r=i\omega\rho_r(\Psi_{r1}+\Psi_{r2}),$$

$$T_r=\frac{i}{\alpha_r^T}\left[\frac{\omega\gamma_r}{c_r^2}(\Psi_{r1}+\Psi_{r2})+\frac{1}{\omega}\Delta(\Psi_{r1}+\Psi_{r2})\right];\ r=1,2,$$

где Δ − оператор Лапласа. Соотношения для компонентов тензора напряжений $\sigma_{\tau k}^{(0)}$ имеют вид (8), где непрерывные функции для физико-механических характеристик материала покрытия следует заменить константами, описывающими материальные параметры пластины. При этом

$$T^{(0)}=\frac{\lambda^{(0)}+2\mu^{(0)}}{\left(3\lambda^{(0)}+2\mu^{(0)}\right)\alpha_T^{(0)}}\left[k_l^2(\Phi_1+\Phi_2)+\Delta(\Phi_1+\Phi_2)\right].$$

На основании представлений (2) и (4) компоненты $u_x^{(0)}$ и $u_z^{(0)}$ принимают вид

$$u_x^{(0)} = \frac{\partial(\Phi_1 + \Phi_2)}{\partial x} - \frac{\partial \Phi_3}{\partial z},\ u_z^{(0)} = \frac{\partial(\Phi_1 + \Phi_2)}{\partial z} + \frac{\partial \Phi_3}{\partial x}.$$

С помощью всех граничных условий получаем краевые условия, которым должно удовлетворять решение системы дифференциальных уравнений (10):

$$z = -(H+h):\ A\mathbf{F}' + \left\{D^{(3)} - E^{(3)}\left(A^{(3)^{-1}}B^{(3)}\right)\right\}\mathbf{F} =$$

$$= E^{(3)}A^{(3)^{-1}}\mathbf{f}^{(3)} + \mathbf{g}^{(3)}, \qquad (11)$$

$$z = -H:\ \left\{C^{(1)} - D^{(1)}\left(A^{(1)^{-1}}B^{(1)}\right)\right\}\left(A^{(2)^{-1}}B^{(2)}\right)\mathbf{F}' +$$

$$+\left\{C^{(1)} - D^{(1)}\left(A^{(1)^{-1}}B^{(1)}\right)\right\}\left(A^{(2)^{-1}}C^{(2)}\right)\mathbf{F} = 0 \qquad (12)$$

и выражения для коэффициентов V_s, W_s, B_s, C_s, D_s ($s = 1,2$):

$$z = -H:\ \mathbf{K} = A^{(2)^{-1}}B^{(2)}\mathbf{F}' + A^{(2)^{-1}}C^{(2)}\mathbf{F},$$

$$\mathbf{W} = A^{(1)^{-1}}B^{(1)}\mathbf{K},$$

$$z = -(H+h):\ \mathbf{V} = A^{(3)^{-1}}B^{(3)}\mathbf{F} + A^{(3)^{-1}}\mathbf{f}^{(3)}, \qquad (13)$$

где

$$\mathbf{f}^{(3)} = \left(k_{21}^z A_0, \xi_{21}A_0\right)^T,\ \mathbf{g}^{(3)} = \left(0, -i\omega\rho_2 A_0, i\lambda_2^T\xi_{21}k_{21}^z A_0\right)^T,$$

$$\mathbf{K} = \left(B_1, B_2, C_1, C_2, D_1, D_2\right)^T,\ \mathbf{W} = \left(W_1, W_2\right)^T,\ \mathbf{V} = \left(V_1, V_2\right)^T,$$

$$A^{(1)} = \left\|a_{js}^{(1)}\right\|,\ j,s = 1,2;\ B^{(1)} = \left\|b_{jk}^{(1)}\right\|,\ k = 1,2,...,6;\ C^{(1)} = \left\|c_{mk}^{(1)}\right\|,\ m = 1,2,3;$$

$$D^{(1)} = \left\|d_{ms}^{(1)}\right\|;\ A^{(2)} = \left\|a_{\tau k}^{(2)}\right\|,\ \tau = 1,2,...,6;\ B^{(2)} = \left\|b_{\tau m}^{(2)}\right\|;\ C^{(2)} = \left\|c_{\tau m}^{(2)}\right\|;$$

$$A^{(3)} = \left\|a_{js}^{(3)}\right\|;\ B^{(3)} = \left\|b_{jm}^{(3)}\right\|;\ D^{(3)} = \left\|d_{mn}^{(3)}\right\|,\ n = 1,2,3;\ E^{(3)} = \left\|e_{ms}^{(3)}\right\|.$$

Здесь

$$a_{11}^{(1)} = ik_{11}^z,\ a_{12}^{(1)} = ik_{22}^z,\ a_{21}^{(1)} = \xi_{11},\ a_{22}^{(1)} = \xi_{12},$$

$$b_{11}^{(1)} = \omega\kappa_1^z,\ b_{12}^{(1)} = -\omega\kappa_1^z,\ b_{13}^{(1)} = \omega\kappa_2^z,\ b_{14}^{(1)} = -\omega\kappa_2^z,\ b_{15}^{(1)} = b_{16}^{(1)} = \omega k_{21}^x,$$

$$b_{21}^{(1)} = b_{22}^{(1)} = \beta\left(k_l^2 - \kappa_1^2\right),\ b_{23}^{(1)} = b_{24}^{(1)} = \beta\left(k_l^2 - \kappa_2^2\right),\ b_{25}^{(1)} = b_{26}^{(1)} = 0,$$

$$c_{11}^{(1)} = -2\mu^0 k_{21}^x\kappa_1^z,\ c_{12}^{(1)} = 2\mu^0 k_{21}^x\kappa_1^z,\ c_{13}^{(1)} = -2\mu^0 k_{21}^x\kappa_2^z,$$

$$c_{14}^{(1)} = 2\mu^0 k_{21}^x\kappa_2^z,\ c_{15}^{(1)} = c_{16}^{(1)} = \mu^0\left(\kappa_3^{z\,2} - k_{21}^{x\,2}\right),$$

$$c_{21}^{(1)} = c_{22}^{(1)} = \alpha_1 - 2\mu^0 \kappa_1^{z\,2},\ c_{23}^{(1)} = c_{24}^{(1)} = \alpha_2 - 2\mu^0 \kappa_2^{z\,2},$$

$$c_{25}^{(1)} = -2\mu^0 k_{21}^x \kappa_3^z,\ c_{26}^{(1)} = 2\mu^0 k_{21}^x \kappa_3^z,$$

$$c_{31}^{(1)} = \lambda_T^0 \beta\left(k_l^2 - \kappa_1^2\right)\kappa_1^z,\ c_{32}^{(1)} = -\lambda_T^0 \beta\left(k_l^2 - \kappa_1^2\right)\kappa_1^z,$$

$$c_{33}^{(1)} = \lambda_T^0 \beta\left(k_l^2 - \kappa_2^2\right)\kappa_2^z,\ c_{34}^{(1)} = -\lambda_T^0 \beta\left(k_l^2 - \kappa_2^2\right)\kappa_2^z,\ c_{35}^{(1)} = c_{36}^{(1)} = 0,$$

$$d_{11}^{(1)} = d_{12}^{(1)} = 0,\ d_{21}^{(1)} = d_{22}^{(1)} = -i\omega\rho_1,\ d_{31}^{(1)} = \lambda_1^T \xi_{11} k_{11}^z,\ d_{32}^{(1)} = \lambda_1^T \xi_{12} k_{12}^z,$$

$$a_{11}^{(2)} = ik_{21}^x e^{-i\kappa_1^z H},\ a_{12}^{(2)} = ik_{21}^x e^{i\kappa_1^z H},\ a_{13}^{(2)} = ik_{21}^x e^{-i\kappa_2^z H},\ a_{14}^{(2)} = ik_{21}^x e^{i\kappa_2^z H},$$

$$a_{15}^{(2)} = -i\kappa_3^z e^{-i\kappa_3^z H},\ a_{16}^{(2)} = i\kappa_3^z e^{i\kappa_3^z H},$$

$$a_{21}^{(2)} = i\kappa_1^z e^{-i\kappa_1^z H},\ a_{22}^{(2)} = -i\kappa_1^z e^{i\kappa_1^z H},\ a_{23}^{(2)} = i\kappa_2^z e^{-i\kappa_2^z H},\ a_{24}^{(2)} = -i\kappa_2^z e^{i\kappa_2^z H},$$

$$a_{25}^{(2)} = ik_{21}^x e^{-i\kappa_3^z H},\ a_{26}^{(2)} = ik_{21}^x e^{i\kappa_3^z H},$$

$$a_{31}^{(2)} = -2\mu^0 k_{21}^x \kappa_1^z e^{-i\kappa_1^z H},\ a_{32}^{(2)} = 2\mu^0 k_{21}^x \kappa_1^z e^{i\kappa_1^z H},\ a_{33}^{(2)} = -2\mu^0 k_{21}^x \kappa_2^z e^{-i\kappa_2^z H},$$

$$a_{34}^{(2)} = 2\mu^0 k_{21}^x \kappa_2^z e^{i\kappa_2^z H},$$

$$a_{35}^{(2)} = \mu^0\left(\kappa_3^{z\,2} - k_{21}^{x\,2}\right)e^{-i\kappa_3^z H},\ a_{36}^{(2)} = \mu^0\left(\kappa_3^{z\,2} - k_{21}^{x\,2}\right)e^{i\kappa_3^z H},$$

$$a_{41}^{(2)} = \left(\alpha_1 - 2\mu^0 \kappa_1^{z\,2}\right)e^{-i\kappa_1^z H},\ a_{42}^{(2)} = \left(\alpha_1 - 2\mu^0 \kappa_1^{z\,2}\right)e^{i\kappa_1^z H},$$

$$a_{43}^{(2)} = \left(\alpha_2 - 2\mu^0 \kappa_2^{z\,2}\right)e^{-i\kappa_2^z H},\ a_{44}^{(2)} = \left(\alpha_2 - 2\mu^0 \kappa_2^{z\,2}\right)e^{i\kappa_2^z H},$$

$$a_{45}^{(2)} = -2\mu^0 k_{21}^x \kappa_3^z e^{-i\kappa_3^z H},\ a_{46}^{(2)} = 2\mu^0 k_{21}^x \kappa_3^z e^{i\kappa_3^z H},$$

$$b_{11}^{(2)} = b_{12}^{(2)} = b_{13}^{(2)} = b_{21}^{(2)} = b_{22}^{(2)} = b_{23}^{(2)} = b_{32}^{(2)} = b_{33}^{(2)} =$$

$$= b_{41}^{(2)} = b_{43}^{(2)} = b_{51}^{(2)} = b_{52}^{(2)} = b_{53}^{(2)} = b_{61}^{(2)} = b_{62}^{(2)} = 0,$$

$$b_{31}^{(2)} = \mu,\ b_{42}^{(2)} = \lambda + 2\mu,\ b_{63}^{(2)} = \lambda_T,$$

$$c_{11}^{(2)} = c_{22}^{(2)} = c_{53}^{(2)} = 1,\ c_{12}^{(2)} = c_{13}^{(2)} = c_{21}^{(2)} = c_{23}^{(2)} = c_{31}^{(2)} = c_{33}^{(2)} =$$

$$= c_{42}^{(2)} = c_{51}^{(2)} = c_{52}^{(2)} = c_{61}^{(2)} = c_{62}^{(2)} = c_{63}^{(2)} = 0,$$

$$c_{32}^{(2)} = ik_{21}^x \mu,\ c_{41}^{(2)} = ik_{21}^x \lambda,\ c_{43}^{(2)} = -(3\lambda + 2\mu)\alpha_T,$$

$$a_{11}^{(3)} = k_{21}^z,\ a_{12}^{(3)} = k_{22}^z,\ a_{21}^{(3)} = \xi_{21},\ a_{22}^{(3)} = \xi_{22},$$

$$b_{11}^{(3)} = b_{13}^{(3)} = b_{21}^{(3)} = b_{22}^{(3)} = 0,\ b_{12}^{(3)} = \omega,\ b_{23}^{(3)} = 1,$$

$$d_{11}^{(3)} = d_{13}^{(3)} = d_{22}^{(3)} = d_{31}^{(3)} = d_{32}^{(3)} = d_{33}^{(3)} = 0,$$

$$d_{12}^{(3)} = ik_{21}^{x}\mu,\ d_{21}^{(3)} = ik_{21}^{x}\lambda,\ d_{23}^{(3)} = -(3\lambda + 2\mu)\alpha_T,$$

$$e_{11}^{(3)} = e_{12}^{(3)} = 0,\ e_{21}^{(3)} = e_{22}^{(3)} = -i\omega\rho_2,$$

$$e_{31}^{(3)} = -i\lambda_2^T\xi_{21}k_{21}^{z},\ e_{32}^{(3)} = -i\lambda_2^T\xi_{22}k_{22}^{z},$$

$$\beta = \frac{\lambda^0 + 2\mu^0}{(3\lambda^0 + 2\mu^0)\alpha_T^0},$$

$$\xi_{rs} = \frac{i}{\alpha_r^T}\left(\frac{\omega\gamma_r}{c_r^2} - \frac{k_{rs}^2}{\omega}\right),\ \alpha_s = 2\mu^0\kappa_s^2 - (\lambda^0 + 2\mu^0)k_l^2;\ r,s = 1,2,$$

Решив краевую задачу (10) − (12) каким либо методом (см., например, [24]) и, вычислив по формуле (13) значение коэффициента V_1, получим возможность исследовать отраженное пластиной с покрытием акустическое поле.

2. Постановка и решение обратной задачи. На основе решения прямой задачи, определим такие законы неоднородности материала покрытия, для которых будем иметь наименьшее усредненное значение интенсивности звукоотражения в заданном диапазоне частот $\omega \in [\omega_1, \omega_2]$ при фиксированном угле падения волны θ, равном θ_*, а также в заданном секторе углов падения $\theta \in [\theta_1, \theta_2]$ при фиксированной частоте ω_*.

Будем считать, что функции $\rho(z)$, $\lambda(z)$, $\mu(z)$, $\alpha_T(z)$, $\lambda_T(z)$, $c_\varepsilon(z)$ аппроксимированы многочленами второй степени относительно переменной z, то есть будем рассматривать следующие параболические законы неоднородности термоупругого материала покрытия:

$$\rho(z) = \rho^1\rho^*(z),\ \lambda(z) = \lambda^1\lambda^*(z),\ \mu(z) = \mu^1\mu^*(z),$$
$$\alpha_T(z) = \alpha_T^1\alpha_T^*(z),\ \lambda_T(z) = \lambda_T^1\lambda_T^*(z),\ c_\varepsilon(z) = c_\varepsilon^1 c_\varepsilon^*(z), \qquad (14)$$

где

$$\rho^*(z) = \rho^{(0)} + \rho^{(1)}z + \rho^{(2)}z^2,\ \lambda^*(z) = \lambda^{(0)} + \lambda^{(1)}z + \lambda^{(2)}z^2,$$
$$\mu^*(z) = \mu^{(0)} + \mu^{(1)}z + \mu^{(2)}z^2,\ \alpha_T^*(z) = \alpha_T^{(0)} + \alpha_T^{(1)}z + \alpha_T^{(2)}z^2, \qquad (15)$$
$$\lambda_T^*(z) = \lambda_T^{(0)} + \lambda_T^{(1)}z + \lambda_T^{(2)}z^2,\ c_\varepsilon^*(z) = c_\varepsilon^{(0)} + c_\varepsilon^{(1)}z + c_\varepsilon^{(2)}z^2,$$

ρ^1, λ^1, μ^1, α_T^1, λ_T^1, c_ε^1 − характерные величины физико-механических свойств материала покрытия.

Построим функционалы F_1 и F_2 вида

$$F_1[\rho,\lambda,\mu,\alpha_T,\lambda_T,c_\varepsilon] = \frac{1}{\omega_2 - \omega_1}\int_{\omega_1}^{\omega_2}\left|\frac{V_1(\omega,\theta_*)}{A_0}\right|^2 d\omega, \qquad (16)$$

$$F_2[\rho,\lambda,\mu,\alpha_T,\lambda_T,c_\varepsilon]=\frac{1}{\theta_2-\theta_1}\int_{\theta_1}^{\theta_2}\left|\frac{V_1(\omega_*,\theta)}{A_0}\right|^2 d\theta, \qquad (17)$$

определенные на классе параболических функций $\rho(z)$, $\lambda(z)$, $\mu(z)$, $\alpha_T(z)$, $\lambda_T(z)$, $c_\varepsilon(z)$ и выражающие усредненные интенсивности отражения звука в заданных диапазоне частот и секторе углов падения соответственно.

Для каждого функционала найдем такие значения коэффициентов $\rho^{(k)}$, $\lambda^{(k)}$, $\mu^{(k)}$, $\alpha_T^{(k)}$, $\lambda_T^{(k)}$, $c_\varepsilon^{(k)}$ $(k=0,1,2)$ функций (14), при которых он достигает минимального значения.

Для функций (15), определенных на отрезке $[-(H+h),-H]$, введем ограничения

$$\zeta_1^0\le\rho^*(z)\le\zeta_1^1,\ \zeta_2^0\le\lambda^*(z)\le\zeta_2^1,\ \zeta_3^0\le\mu^*(z)\le\zeta_3^1,$$
$$\zeta_4^0\le\alpha_T^*(z)\le\zeta_4^1,\ \zeta_5^0\le\lambda_T^*(z)\le\zeta_5^1,\ \zeta_6^0\le c_\varepsilon^*(z)\le\zeta_6^1, \qquad (18)$$

где ζ_r^j $(j=0,1;r=1,2,...,6)$ − некоторые положительные константы.

Геометрически каждое из неравенств (18) вида $b^0\le f(z)\le b^1$, где

$$f(z)=a^{(0)}+a^{(1)}z+a^{(2)}z^2, \qquad (19)$$

задает в прямоугольной системе координат с осью абсцисс z и осью ординат f бесконечное множество кривых, лежащих в прямоугольной области

$$\Omega\left(a^{(0)},a^{(1)},a^{(2)}\right)=\left\{(z,f):-(H+h)\le z\le -H, b^0\le f\le b^1\right\},$$

показанной на рис. 2. Здесь под тройкой коэффициентов $\left(a^{(0)},a^{(1)},a^{(2)}\right)$ подразумеваем каждую из троек $\left(\rho^{(0)},\rho^{(1)},\rho^{(2)}\right)$, $\left(\lambda^{(0)},\lambda^{(1)},\lambda^{(2)}\right)$, $\left(\mu^{(0)},\mu^{(1)},\mu^{(2)}\right)$, $\left(\alpha_T^{(0)},\alpha_T^{(1)},\alpha_T^{(2)}\right)$, $\left(\lambda_T^{(0)},\lambda_T^{(1)},\lambda_T^{(2)}\right)$, $\left(c_\varepsilon^{(0)},c_\varepsilon^{(1)},c_\varepsilon^{(2)}\right)$, а под b^0 и b^1 − соответствующие границы.

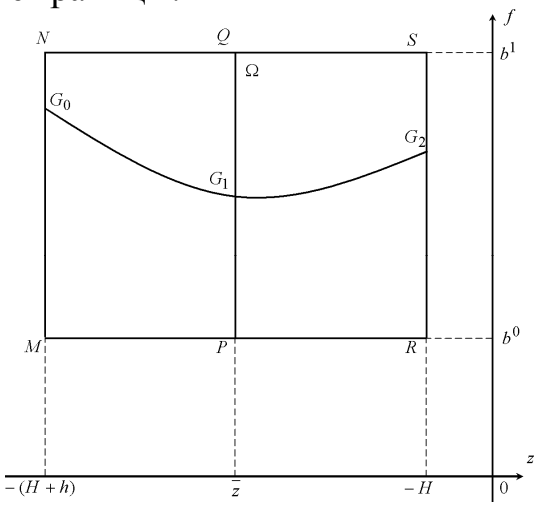


Рис. 2. Область Ω

В области Ω каждая парабола $f(z)$ единственным образом определяется тремя точками $G_0(-H-h, f_0)$, $G_1(\bar{z}, f_1)$, $G_2(-H, f_2)$, где $\bar{z} = -(H + h/2)$, $f_q \in \lfloor b^0, b^1 \rfloor$ $(q = 0,1,2)$.

Подставляя координаты точек G_0, G_1, G_2 в выражение (19), приходим к системе трех линейных уравнений. Решая полученную систему относительно коэффициентов $a^{(0)}, a^{(1)}, a^{(2)}$, находим

$$\mathbf{a} = R^{-1}\mathbf{f}, \tag{20}$$

где

$$\mathbf{a} = \left(a^{(0)}, a^{(1)}, a^{(2)}\right)^T, \ \mathbf{f} = (f_0, f_1, f_2)^T, \ R = \begin{pmatrix} 1 & -(H+h) & (H+h)^2 \\ 1 & \bar{z} & \bar{z}^2 \\ 1 & -H & H^2 \end{pmatrix}.$$

Выбирая из отрезка $\lfloor b^0, b^1 \rfloor$ значения для ординат f_0, f_1, f_2 и вычисляя с помощью соотношений (20) значения коэффициентов $a^{(0)}, a^{(1)}, a^{(2)}$, получаем параболические (линейные при $a^{(2)} = 0$) законы неоднородности материала покрытия. При этом не все параболические законы подлежат рассмотрению. Если выполняется условие

$$-(H+h) \le -\frac{a^{(1)}}{2a^{(2)}} \le -H, \tag{21}$$

то это означает, что абсцисса вершины параболы принадлежит отрезку $[-(H+h), -H]$. В этом случае параболу следует рассматривать только тогда, когда ордината ее вершины принадлежит отрезку $\lfloor b^0, b^1 \rfloor$, то есть когда выполняется условие

$$b^0 \le a^{(0)} - \frac{a^{(1)2}}{4a^{(2)}} \le b^1. \tag{22}$$

Нахождение значений неизвестных параметров $\rho^{(k)}$, $\lambda^{(k)}$, $\mu^{(k)}$, $\alpha_T^{(k)}$, $\lambda_T^{(k)}$, $c_\varepsilon^{(k)}$ $(k = 0,1,2)$ функций (15), удовлетворяющих условиям (18) и минимизирующих функцию восемнадцати переменных

$$F_m\left(\rho^{(0)}, \rho^{(1)}, \rho^{(2)}, \lambda^{(0)}, \lambda^{(1)}, \lambda^{(2)}, \mu^{(0)}, \mu^{(1)}, \mu^{(2)}, \right.$$
$$\left. \alpha_T^{(0)}, \alpha_T^{(1)}, \alpha_T^{(2)}, \lambda_T^{(0)}, \lambda_T^{(1)}, \lambda_T^{(2)}, c_\varepsilon^{(0)}, c_\varepsilon^{(1)}, c_\varepsilon^{(2)}\right) \to \min \ (m = 1,2) \tag{23}$$

осуществим с помощью следующего алгоритма.

Разобьем отрезки MN, PQ и RS в области Ω соответственно на n_0, n_1 и n_2 равных частей, то есть на отрезке $\left\lfloor b^0, b^1 \right\rfloor$ построим три равномерные сетки с узлами

$$f_q^{(l_q)} = b^0 + l_q h_q \ \ (q = 0,1,2). \tag{24}$$

Здесь $l_q = 0,1,...,n_q$ − номер узла, $h_q = \left(b^1 - b^0\right) \Big/ n_q$ − шаг q - ой сетки.

Используя выраения (20) и условия (21), (22), рассчитаем тройки коэффициентов $a^{(0)}, a^{(1)}, a^{(2)}$, которые определяют зависимости (19) для законов неоднородности материала покрытия.

Введем сетки (24) для каждой из шести областей

$$\Omega\left(\rho^{(0)}, \rho^{(1)}, \rho^{(2)}\right),\ \Omega\left(\lambda^{(0)}, \lambda^{(1)}, \lambda^{(2)}\right),\ \Omega\left(\mu^{(0)}, \mu^{(1)}, \mu^{(2)}\right),\ \Omega\left(\alpha_T^{(0)}, \alpha_T^{(1)}, \alpha_T^{(2)}\right),$$
$$\Omega\left(\lambda_T^{(0)}, \lambda_T^{(1)}, \lambda_T^{(2)}\right),\ \Omega\left(c_\varepsilon^{(0)}, c_\varepsilon^{(1)}, c_\varepsilon^{(2)}\right).$$

На этих сетках получаем наборы значений коэффициентов

$$\left(\rho^{(0)}, \rho^{(1)}, \rho^{(2)}\right),\ \left(\lambda^{(0)}, \lambda^{(1)}, \lambda^{(2)}\right),\ \left(\mu^{(0)}, \mu^{(1)}, \mu^{(2)}\right),\ \left(\alpha_T^{(0)}, \alpha_T^{(1)}, \alpha_T^{(2)}\right),$$
$$\left(\lambda_T^{(0)}, \lambda_T^{(1)}, \lambda_T^{(2)}\right),\ \left(c_\varepsilon^{(0)}, c_\varepsilon^{(1)}, c_\varepsilon^{(2)}\right).$$

Нахождение оптимального набора параметров $\rho^{(k)}$, $\lambda^{(k)}$, $\mu^{(k)}$, $\alpha_T^{(k)}$, $\lambda_T^{(k)}$, $c_\varepsilon^{(k)}$ $(k = 0,1,2)$, доставляющих минимум функции многих переменных (23) осуществляется методом перебора. При этом переберались не сами параметры $\rho^{(k)}$, $\lambda^{(k)}$, $\mu^{(k)}$, $\alpha_T^{(k)}$, $\lambda_T^{(k)}$, $c_\varepsilon^{(k)}$, а соответствующие им упорядоченные наборы величин f_0, f_1, f_2, присутствующих в выражениях (20). Каждый такой набор представляет собой совокупность восемнадцати значений

$$\mathbf{f}^0 = \left(f_{0\rho}, f_{1\rho}, f_{2\rho}, f_{0\lambda}, f_{1\lambda}, f_{2\lambda}, f_{0\mu}, f_{1\mu}, f_{2\mu},\right.$$
$$\left. f_{0\alpha_T}, f_{1\alpha_T}, f_{2\alpha_T}, f_{0\lambda_T}, f_{1\lambda_T}, f_{2\lambda_T}, f_{0c_\varepsilon}, f_{1c_\varepsilon}, f_{2c_\varepsilon}\right)$$

из множества допустимых дискретных сочетаний на введенной сетке. Здесь дополнительный индекс указывает на принадлежность величин f_0, f_1, f_2 к соответствующему параметру. Интегралы (16) и (17) вычисляются численно. По окончании процедуры перебора получаем значение минимума функции F_m и соответствующий набор $\mathbf{f}^0$, по которому с помощью формул (20) вычисляются искомые материальные параметры $\rho^{(k)}$, $\lambda^{(k)}$, $\mu^{(k)}$, $\alpha_T^{(k)}$, $\lambda_T^{(k)}$, $c_\varepsilon^{(k)}$. Заметим, что поскольку в

общем случае функция F_m не является унимодальной, то наборов материальных параметров соответствующих ее минимальному значению может быть найдено несколько. Кроме того, получаемое таким образом оптимальное решение является приближенным, точность которого зависит от выбора шага сетки h_q.

3. Результаты расчетов. Были проведены расчеты параметров законов неоднородности покрытия термоупругой пластины, обеспечивающих наименьшее звукоотражение в частотном диапазоне, который определялся изменением волнового размера пластины в интервале $5 \le k_{21} H \le 10$. Полагали, что плоская звуковая волна единичной амплитуды падает под углом $\theta_* = 25^\circ$. Пластина с покрытием находится в воде ($\rho_1 = \rho_2 = 1000\,\text{кг/м}^3$, $c_1 = c_2 = 1485\,\text{м/с}$, $\gamma_1 = \gamma_2 = 1.006$, $\chi_1^T = \chi_2^T = 1.43\times10^{-7}\,\text{м}^2/\text{с}$, $\alpha_1^T = \alpha_2^T = 2.1\times10^{-4}\,1/\text{K}$, $\lambda_1^T = \lambda_2^T = 0.59\,\text{Вт/(м}\cdot\text{K)}$, $T_0 = 293\,\text{K}$). Рассматривалась однородная алюминиевая пластина толщиной $H = 0.05\,\text{м}$ с неоднородным покрытием толщиной $h = 0.005\,\text{м}$ из материала с характерными физико-механическими характеристиками полимера (поливинилбутираль). Значения материальных констант пластины и покрытия приведены в табл. 1.

Таблица 1

Материальные константы

Материал	ρ^j, кг/м^3	λ^j, Н/м^2	μ^j, Н/м^2	α_T^j, 1/K	λ_T^j, Вт/(м·K)	c_ε^j, Дж/(м^3·K)
Алюминий $(j=0)$	2700	5.3×10^{10}	2.6×10^{10}	25.5×10^{-6}	236	2.3×10^{6}
Полимер $(j=1)$	1070	3.9×10^{9}	9.8×10^{8}	2.3×10^{-4}	0.2	1.2×10^{6}

При расчетах полагали, что $\zeta_r^0 = 0.5$, $\zeta_r^1 = 1.5$ $(r = 1,2,...,6)$. Такие значения границ неравенств (18) обеспечивают достаточно широкий диапазон изменения функций $\rho(z)$, $\lambda(z)$, $\mu(z)$, $\alpha_T(z)$, $\lambda_T(z)$, $c_\varepsilon(z)$, когда максимально возможные значения функций больше минимально допустимых значений в три раза.

В табл.2 представлены результаты расчетов искомых параметров. При этом в каждой из шести областей

$$\Omega\left(\rho^{(0)},\rho^{(1)},\rho^{(2)}\right),\ \Omega\left(\lambda^{(0)},\lambda^{(1)},\lambda^{(2)}\right),\ \Omega\left(\mu^{(0)},\mu^{(1)},\mu^{(2)}\right),$$

$$\Omega\left(\alpha_T^{(0)},\alpha_T^{(1)},\alpha_T^{(2)}\right),\ \Omega\left(\lambda_T^{(0)},\lambda_T^{(1)},\lambda_T^{(2)}\right),\ \Omega\left(c_\varepsilon^{(0)},c_\varepsilon^{(1)},c_\varepsilon^{(2)}\right)$$

введены сетки (24) с одинаковыми шагами $h_0 = h_1 = h_2 = 0.5$. Рассчитанные на этих сетках тройки коэффициентов определяют в каждой из областей все допустимые функции (15) для законов неоднородности материала покрытия, показанные на рис. 3. Из этих законов выбирались те, которым соответствует минимальное значение F_1. Минимальному значению F_1, равному 0.698, соответствует покрытие со следующими свойствами:

$$\rho(z)=1.5,\ \lambda(z)=-9.5-200z,\ \mu(z)=-219.5-8400z-80000z^2,$$
$$\alpha_T(z)=-219.5-8400z-80000z^2,\ \lambda_T(z)=11.5+200z, \qquad (25)$$
$$c_\varepsilon(z)=116.5+4300z+40000z^2.$$

Таблица 2

Значения оптимальных параметров

$\rho^{(0)}$	$\rho^{(1)}$	$\rho^{(2)}$	$\lambda^{(0)}$	$\lambda^{(1)}$	$\lambda^{(2)}$
1.5	0	0	-9.5	-200	0
$\mu^{(0)}$	$\mu^{(1)}$	$\mu^{(2)}$	$\alpha_T^{(0)}$	$\alpha_T^{(1)}$	$\alpha_T^{(2)}$
-219.5	-8400	-80000	-219.5	-8400	-80000
$\lambda_T^{(0)}$	$\lambda_T^{(1)}$	$\lambda_T^{(2)}$	$c_\varepsilon^{(0)}$	$c_\varepsilon^{(1)}$	$c_\varepsilon^{(2)}$
11.5	200	0	116.5	4300	40000

Для сравнения было рассчитано значение величины F_1 для термоупругой пластины без покрытия, которое оказалось равным 0.854. В заданном диапазоне частот неоднородное термоупругое покрытие с оптимальными свойствами (25) уменьшает среднее значение интенсивности звукоотражения на 18%.

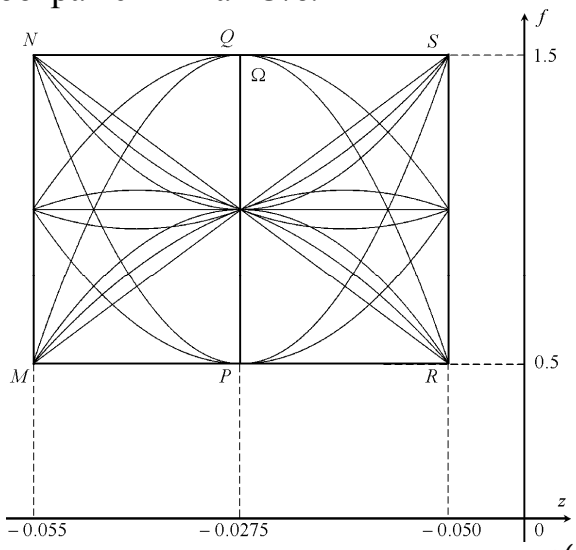


Рис. 3. Допустимые зависимости $f(z)$

Для оценки влияния на отражающую способность термоупругой пластины ее неоднородного покрытия в каждой точке рассматриваемого частотного диапазона, на рис. 4 представлены результаты компьютерных расчетов величины $|V_1/A_0|^2$ в зависимости от волнового числа при $5 \le k_{21}H \le 10$. Сплошная линия соответствует термоупругой пластине без покрытия, штриховая – термоупругой пластине, оснащенной покрытием со свойствами (25). Для сравнения штрихпунктирной и пунктирной линиями, соответственно для пластины с оптимальным покрытием и для непокрытой пластины, нанесены кривые, рассчитанные при изотермическом процессе [7].

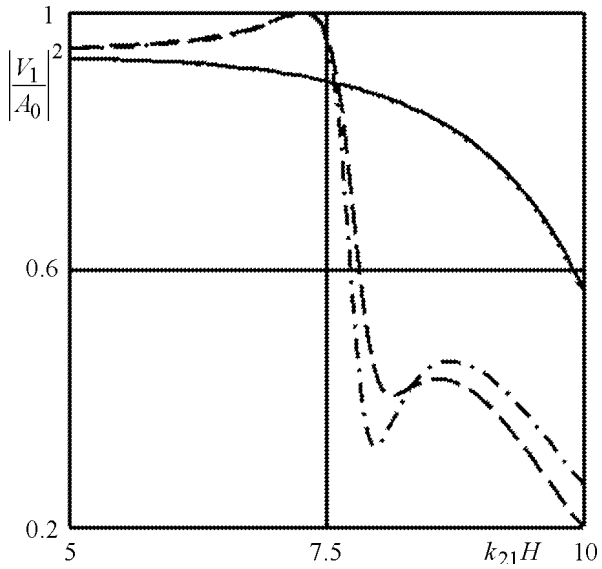


Рис. 4. Частотные зависимости

Видно, что во всей первой половине исследуемого интервала изменения безразмерной частоты наличие покрытия у пластины приводит к увеличению звукоотражения. Во второй половине этого интервала, за исключением его небольшого начального участка, с помощью покрытия удается существенно снизить интенсивность звукоотражения пластины. Сравнение графиков для непокрытых пластин показывает слабое проявление термоупругости в металле. Учет термоупругости в металлической пластине с тонким полимерным покрытием приводит к уже заметному отличию звукоотражающей частотной характеристики от соответствующей характеристики, рассчитанной при изотермическом процессе.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Правительства Тульской области (код проекта 16-41-710083) и Министерства образования и науки РФ (государственное задание № 1.1333.2014К).

Список литературы

1. Иванов В.П. Анализ поля дифракции на цилиндре с перфорированным покрытием // Акустический журнал. 2006. Т. 52. № 6. С. 791–798.

2. Бобровницкий Ю.И. Импедансная теория рассеяния звука: общие соотношения // Акустический журнал. 2006. Т. 52. № 5. С. 601–606.

3. Бобровницкий Ю.И. Импедансная теория поглощения звука: наилучший поглотитель и черное тело // Акустический журнал. 2006. Т. 52. № 6. С. 742–752.

4. Бобровницкий Ю.И. Теория новых поглощающих и нерассеивающих покрытий повышенной эффективности // Акустический журнал. 2007. Т. 53. № 5. С. 613–624.

5. Бобровницкий Ю.И. Нерассеивающее покрытие для цилиндра // Акустический журнал. 2008. Т. 54. № 6. С. 879–889.

6. Бобровницкий Ю.И., Морозов К.Д., Томилина Т.М. Периодическая поверхностная структура с экстремальными акустическими свойствами // Акустический журнал. 2010. Т. 56. № 2. С. 147–151.

7. Ларин Н.В., Скобельцын С.А., Толоконников Л.А. Моделирование неоднородного покрытия упругой пластины с оптимальными звукоотражающими свойствами // Прикладная математика и механика. 2016. Т. 80. Вып. 4. С. 480–488.

8. Романов А.Г., Толоконников Л.А. Рассеяние звуковых волн цилиндром с неоднородным упругим покрытием // Прикладная математика и механика. 2011. Т. 75. Вып. 5. С. 850–857.

9. Толоконников Л.А. Рассеяние наклонно падающей плоской звуковой волны упругим цилиндром с неоднородным покрытием // Известия Тульского государственного университета. Естественные науки. 2013. Вып. 2. Часть 2. С. 265–274.

10. Толоконников Л.А. Дифракция цилиндрических звуковых волн на цилиндре с неоднородным упругим покрытием // Известия Тульского государственного университета. Естественные науки. 2013. Вып. 3. С. 202–208.

11. Иванов В.И., Скобельцын С.А. Влияние неоднородного покрытия на прохождение звука через упругую оболочку // Известия Тульского государственного университета. Естественные науки. 2013. Вып. 3. С. 179–192.

12. Ларин Н.В. Рассеяние звука упругой цилиндрической оболочкой с неоднородным покрытием и неконцентрической эллиптической полостью // Известия Тульского государственного университета. Естественные науки. 2014. Вып. 2. С. 146–163.

13. Толоконников Л.А. Дифракция плоской звуковой волны на упругом шаре с неоднородным покрытием и произвольно расположенной сферической полостью // Известия Тульского государственного университета. Естественные науки. 2014. Вып. 2. С. 181−193.

14. Толоконников Л.А. Рассеяние плоской звуковой волны упругим шаром с неоднородным покрытием // Прикладная математика и механика. 2014. Т. 78. Вып. 4. С. 519−526.

15. Толоконников Л.А., Родионова Г.А. Дифракция сферической звуковой волны на упругом шаре с неоднородным покрытием // Известия Тульского государственного университета. Естественные науки. 2014. Вып. 3. С. 131−137.

16. Скобельцын С.А. Рассеяние звуковых волн конечной упругой криволинейной пластиной с неоднородным покрытием и полостью // Известия Тульского государственного университета. Естественные науки. 2014. Вып. 4. С. 93−101.

17. Толоконников Л.А., Юдачев В.В. Отражение и преломление плоской звуковой волны упругим плоским слоем с неоднородным покрытием // Известия Тульского государственного университета. Естественные науки. 2015. Вып. 3. С. 219−226.

18. Толоконников Л.А. Дифракция цилиндрических звуковых волн на упругой сфере с неоднородным покрытием // Прикладная математика и механика. 2015. Т. 79. Вып. 5. С. 663–673.

19. Ларин Н.В., Скобельцын С.А., Толоконников Л.А. Об определении линейных законов неоднородности цилиндрического упругого слоя, имеющего наименьшее отражение в заданном направлении при рассеянии звука // Известия ТулГУ. Естественные науки. 2014. Вып. 4. С. 54−62.

20. Ларин Н.В., Скобельцын С.А., Толоконников Л.А. Определение законов неоднородности плоского упругого слоя с заданными звукоотражающими свойствами // Акустический журнал. 2015. Т. 61. № 5. С. 552−558.

21. Ларин Н.В., Толоконников Л.А. Рассеяние плоской звуковой волны упругим цилиндром с дискретно-слоистым покрытием // Прикладная математика и механика. 2015. Т. 79. Вып. 2. С. 242−250.

22. Ларин Н.В. Рассеяние звука твердым цилиндром с неоднородным термоупругим покрытием // Известия Тульского государственного университета. Естественные науки. 2015. Вып. 3. С. 154−164.

23. Ларин Н.В. Дифракция сферических звуковых волн на неоднородной термоупругой сферической оболочке // Известия ТулГУ. Сер. Математика. Механика. Информатика. 2003. Т.9. Вып. 2. С. 115−128.

24. Ларин Н.В., Толоконников Л.А. Прохождение плоской звуковой волны через неоднородный термоупругий слой // Прикладная математика и механика. 2006. Т.70. № 4. С. 650−659.

25. Ларин Н.В., Толоконников Л.А. Дифракция плоской звуковой волны на неоднородном термоупругом цилиндрическом слое, граничащем с невязкими теплопроводными жидкостями // Прикладная математика и механика. 2009. Т.73. № 3. С. 474–483.

26. Ларин Н.В., Толоконников Л.А. Рассеяние звука неоднородным термоупругим сферическим слоем // Прикладная математика и механика. 2010. Т. 74. Вып. 4. С. 645−654.

27. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. М.: Наука, 1973. 343 с.

28. Коваленко А.Д. Основы термоупругости. Киев.: Наук. думка, 1970. 308 с.

29. Ларин Н.В. Прохождение звука через однородный термоупругий плоский слой // Известия Тульского государственного университета. Естественные науки. 2015. Вып. 3. С. 145–153.

30. Подстригач Я.С., Ломакин В.А., Коляно Ю.М. Термоупругость тел неоднородной структуры. М.: Наука, 1984. 368 с.

Ларин Николай Владимирович, канд. физ.-мат. наук, доц., Larinaelen@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

DETERMINATION OF THE INHOMOGENEITY LAWS FOR COATING OF THE THERMOELASTIC PLATE TO OBTAIN MINIMUM SOUND REFLECTION

N.V. Larin

The direct and inverse problems of plane acoustic wave diffraction by a uniform thermoelastic plate with a continuously inhomogeneous coating are solved.

Key words: reflection and transmission of sound waves, uniform thermoelastic plate, non-uniform thermoelastic plane layer, inverse problem of diffraction, inhomogeneity laws.

Larin Nikolay Vladimirovich, candidate of physical and mathematical sciences, associate professor, Larinaelen@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University

ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

УДК 621.983:539.974

ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПРОЦЕССА ИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ОТБОРТОВКИ В РЕЖИМЕ КРАТКОВРЕМЕННОЙ ПОЛЗУЧЕСТИ

С.Н. Ларин, Г.А. Нуждин, А.А. Пасынков

В работе представлены результаты исследований изотермической отбортовки в режиме кратковременной ползучести заготовок из высокопрочных материалов. Исследования выполнены на базе метода конечных элементов. В работе установлено влияние технологических параметров на напряженно-деформированное состояние процесса. Полученные результаты пригодятся при проектировании технологических процессов изотермической отбортовки в режиме кратковременной ползучести и конструировании инструментальной оснастки.

Ключевые слова: отбортовка, кратковременная ползучесть, сила, напряжения, формоизменение.

В данной работе представлены результаты исследования, основанного на базе метода конечных элементов процесса отбортовки листовых изделий из высокопрочных материалов в изотермических условиях. Схема рассматриваемой операции приведена на рис. 1.

Исследования выполнены в среде программного комплекса Qform 2D/3D для титанового ВТ6С ($\sigma_T = 210 МПа$; $\sigma_в = 340 МПа$; $П = 750 МПа$) сплава. Расчеты выполнены при следующих геометрических характеристиках заготовки: $s = 1, 2, 4$ мм; различных коэффициентах трения $\mu = 0{,}1; 0{,}4; 0{,}8$ и скоростях деформирования $V = 0{,}01...1 мм/с$.

На рис. 2 приведены 3D модели заготовки и инструмента. Предполагалось, что деформирование производится на гидравлическом прессе силой 50 МН при постоянной температуре деформирования 930 °С.

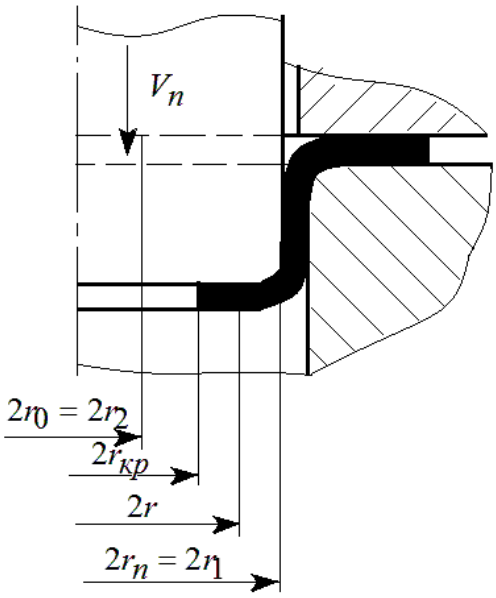


Рис. 1. Схема изотермической отбортовки

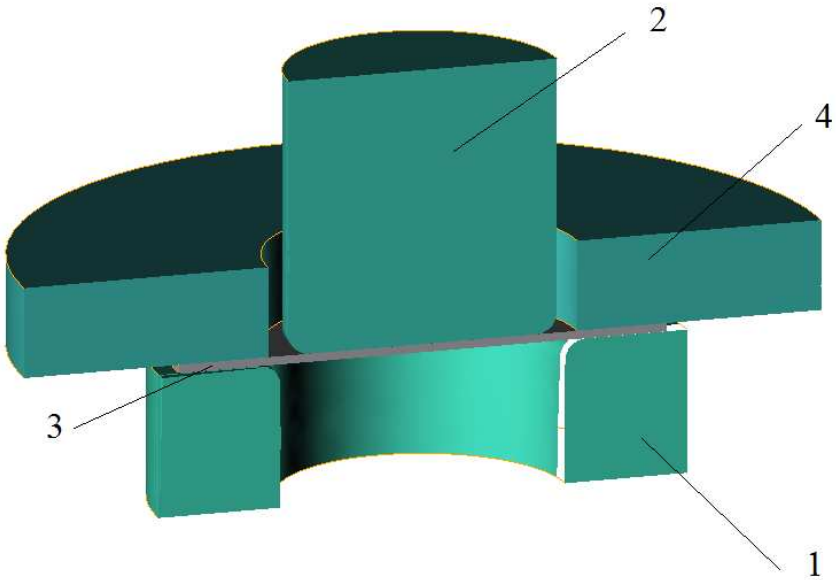
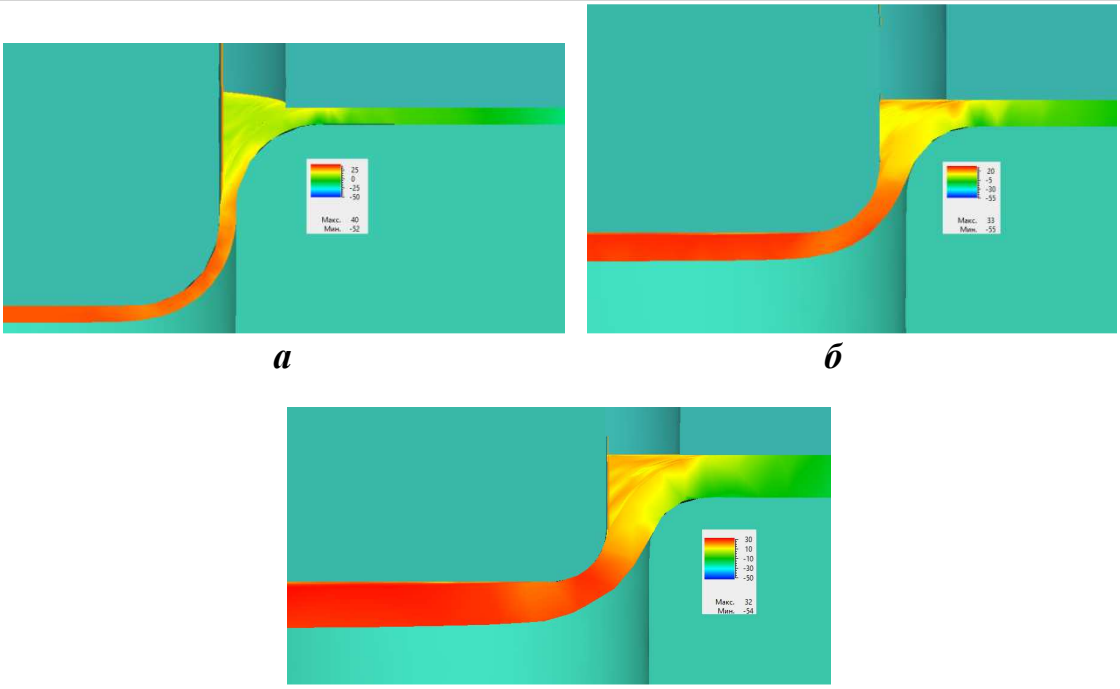


Рис. 2. 3D модели инструмента и заготовки:
1 – матрица; 2 – пуансон; 3 - заготовка

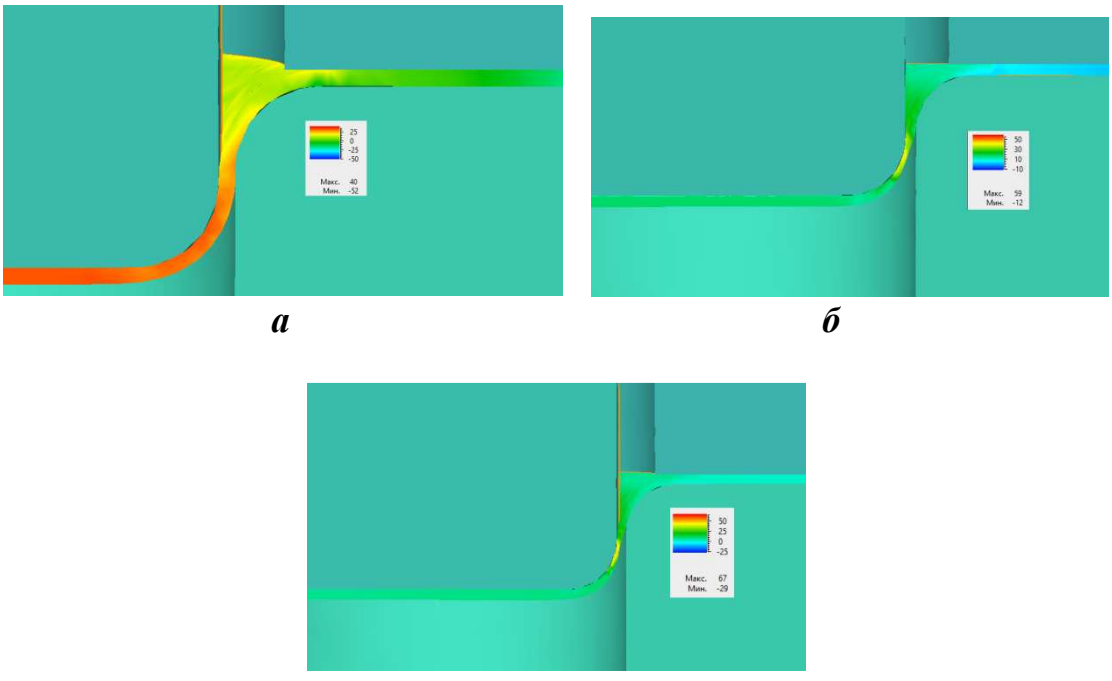
На рис. 3 - 17 представлены схемы распределения интенсивностей напряжений, средних напряжений и напряжений в главных осях для различных значений трения, скорости, толщин заготовки и радиусов закруглений пуансона. Из анализа представленных схем можно установить значения интенсивностей напряжений при различных исследуемых параметрах. Видно, что напряжения достигают своих максимальных величин в месте перехода цилиндрической части в дно и фланец.



а ***б***

в

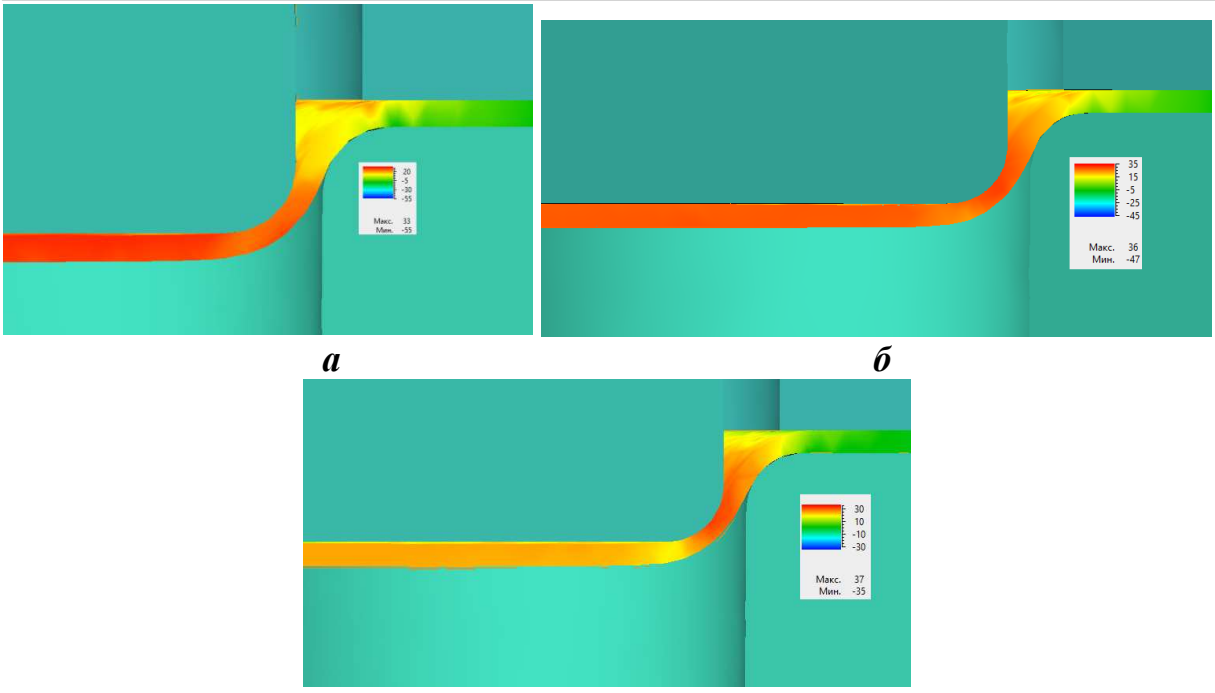
Рис. 3. Схема распределения интенсивностей напряжений при изотермической отбортовке ($\mu = 0{,}1$; $V = 0{,}1 мм/с$; $R = 5$ *мм*)***:*** ***а*** - $s = 1$ *мм*; ***б*** - $s = 2$ *мм*; ***в*** - $s = 4$ *мм*



а ***б***

в

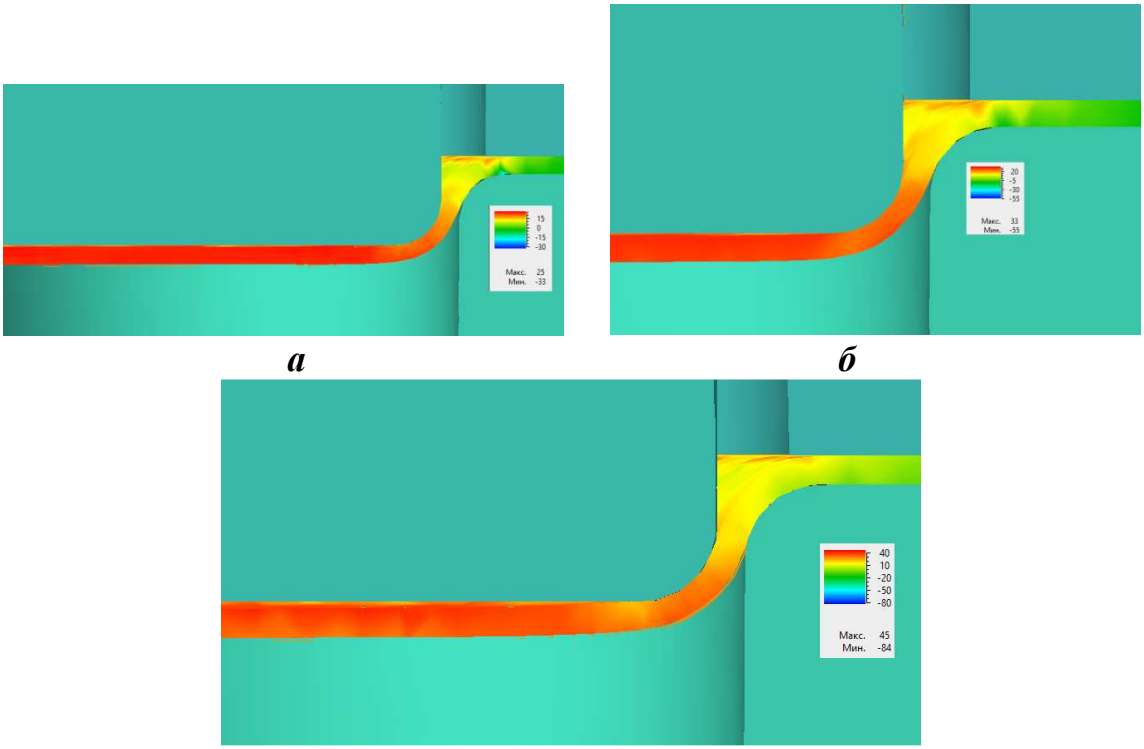
Рис. 4. Схема распределения интенсивностей напряжений при изотермической отбортовке ($s = 1$ мм; $V = 0{,}1 мм/с$; $R = 5$ *мм*)***:*** ***а*** - $\mu = 0{,}15$; ***б*** - $\mu = 0{,}5$ *мм*; ***в*** - $\mu = 0{,}8$ *мм*



а ***б***

в

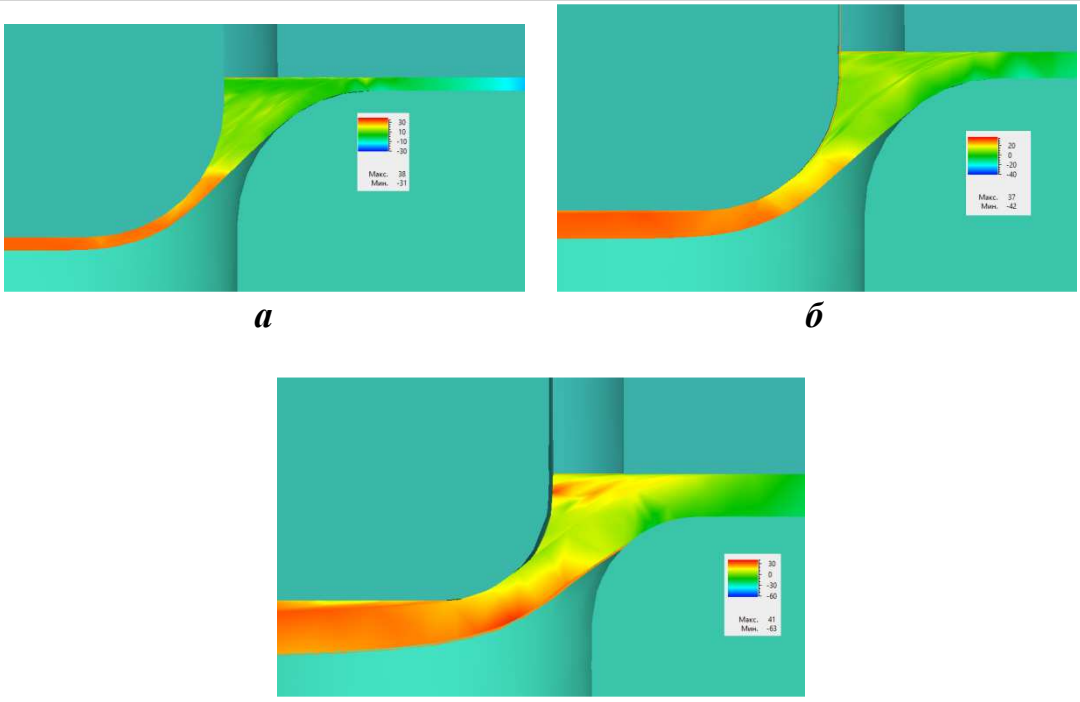
Рис. 5. Схема распределения интенсивностей напряжений при изотермической отбортовке ($s = 2$ мм; $V = 0{,}1 мм/с$; $R = 5$ мм):
а - $\mu = 0{,}15$; ***б*** - $\mu = 0{,}5$ мм; ***в*** - $\mu = 0{,}8$ мм



а ***б***

в

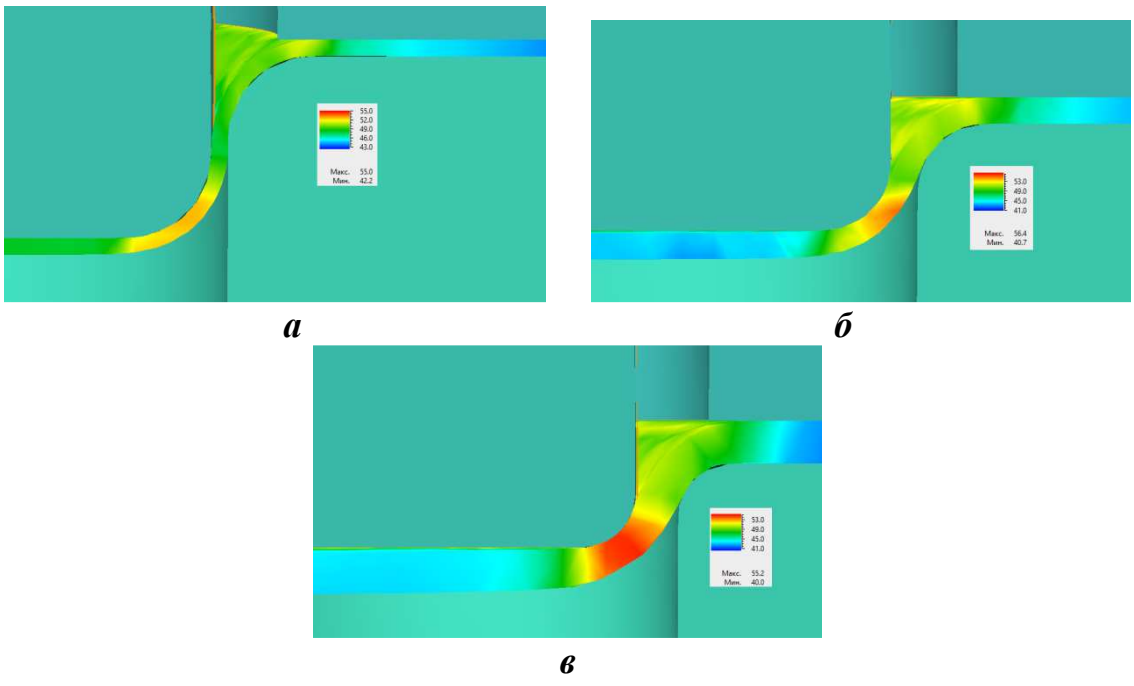
Рис. 6. Схема распределения интенсивностей напряжений при изотермической отбортовке ($s = 2$ мм; $\mu = 0{,}1$; $R = 5$ мм):
а - $V = 0{,}01$ мм/с; ***б*** - $V = 0{,}1$ мм/с; ***в*** - $V = 1$ мм/с



а ***б***

в

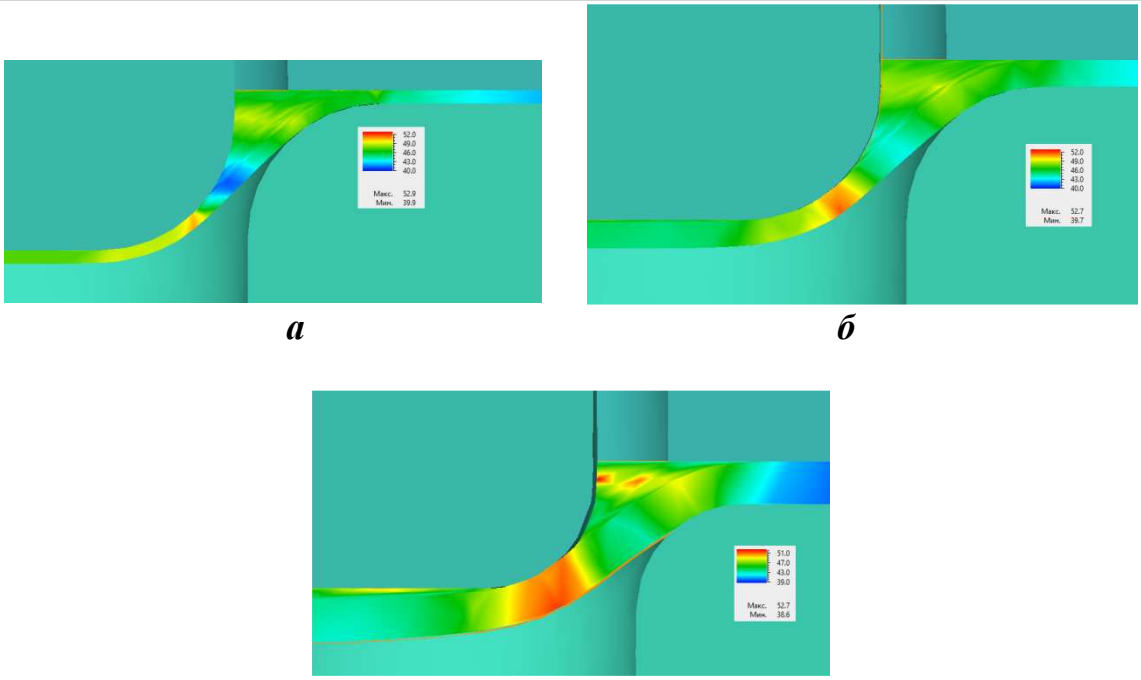
Рис. 7. Схема распределения интенсивностей напряжений при изотермической отбортовке ***(*** $\mu = 0{,}1;\ \ V = 0{,}1 мм/с;\ R = 10\ мм$***):*** ***а*** **-** $s = 1\ мм$***;*** ***б*** **-** $s = 2\ мм$***;*** ***в*** **-** $s = 4\ мм$



а ***б***

в

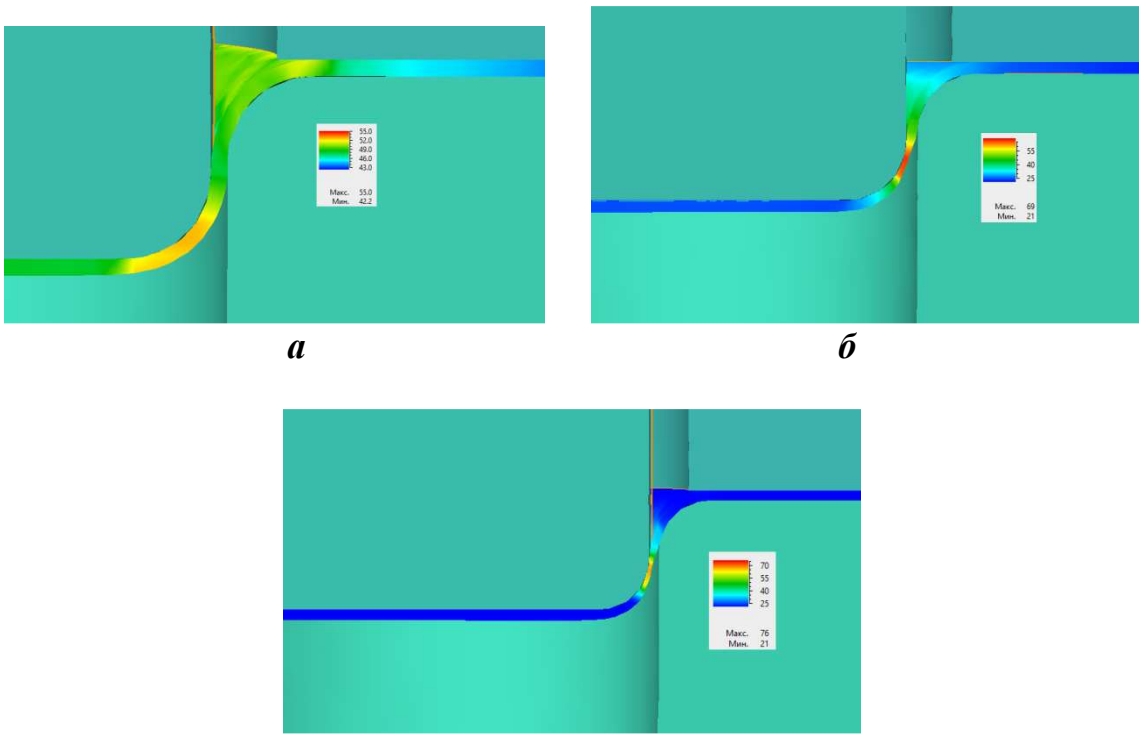
Рис. 8. Схема к оценке среднего напряжения при изотермической отбортовке ***(*** $\mu = 0{,}1;\ \ V = 0{,}1 мм/с;\ R = 5\ мм$***): а*** **-** $s = 1\ мм$***;*** ***б*** **-** $s = 2\ мм$***;*** ***в*** **-** $s = 4\ мм$



а ***б***

в

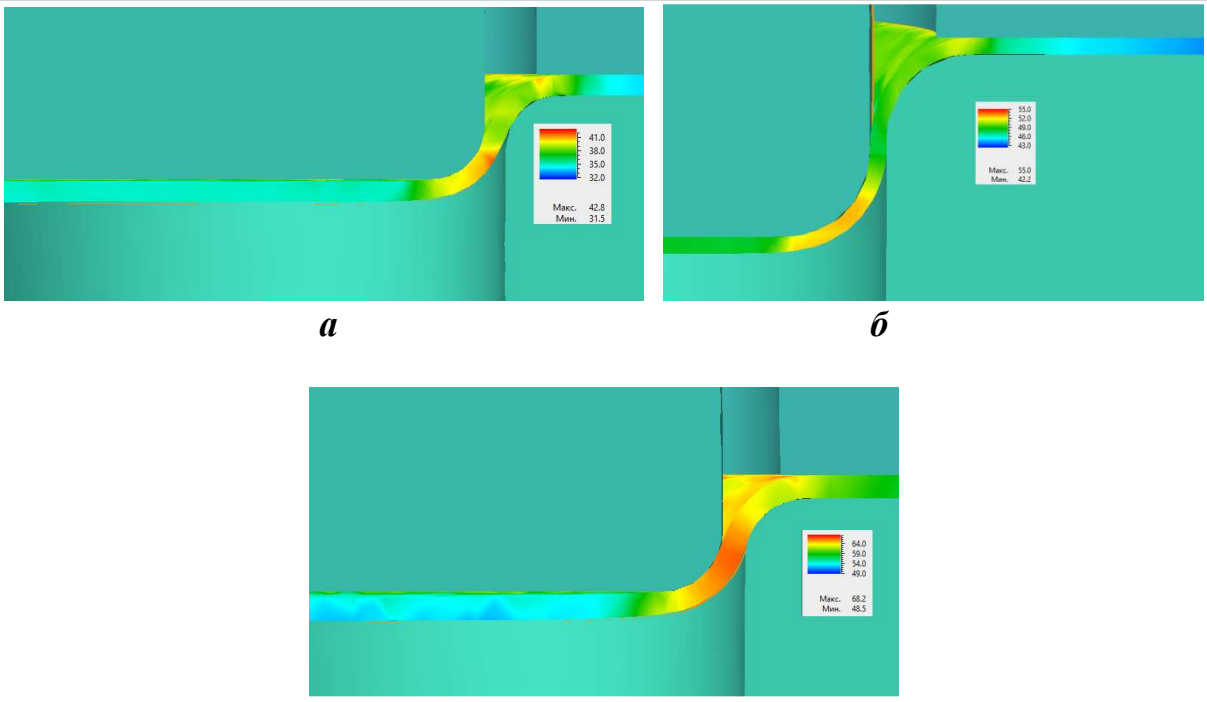
Рис. 9. Схема к оценке среднего напряжения при изотермической отбортовке ($\mu = 0{,}1;\ V = 0{,}1 мм/с;\ R = 10\ мм$***): а -*** $s = 1\ мм$***; б -*** $s = 2\ мм$***; в -*** $s = 4\ мм$



а ***б***

в

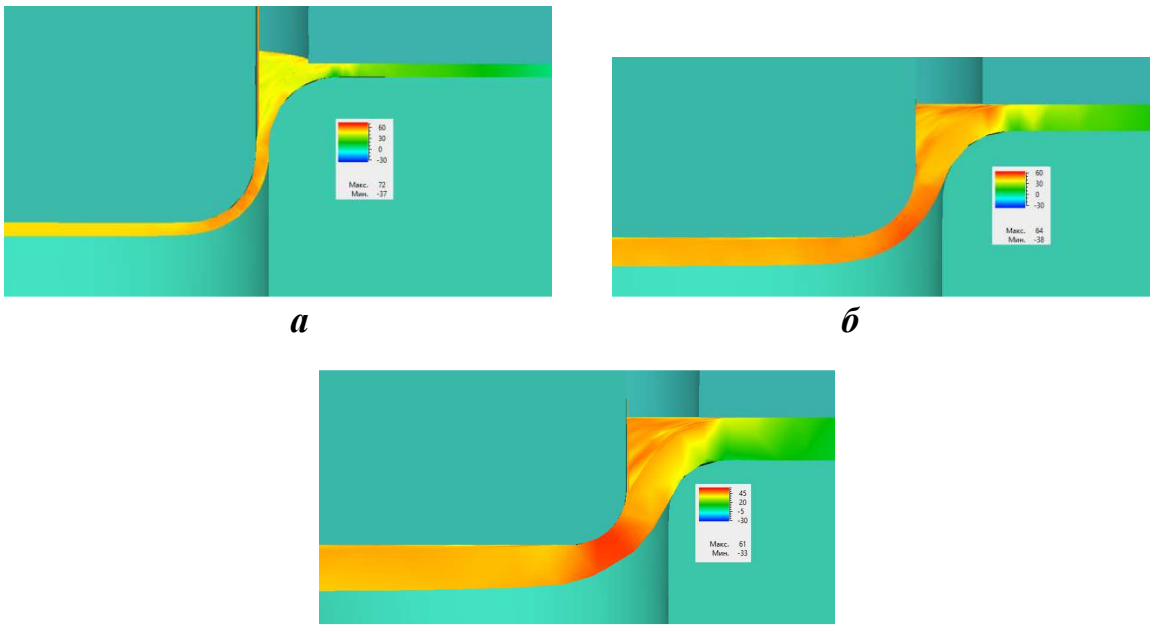
Рис. 10. Схема к оценке среднего напряжения при изотермической отбортовке ($s = 1$ мм; $V = 0{,}1 мм/с;\ R = 5\ мм$***): а -*** $\mu = 0{,}15$***; б -*** $\mu = 0{,}5\ мм$***; в -*** $\mu = 0{,}8\ мм$



а ***б***

в

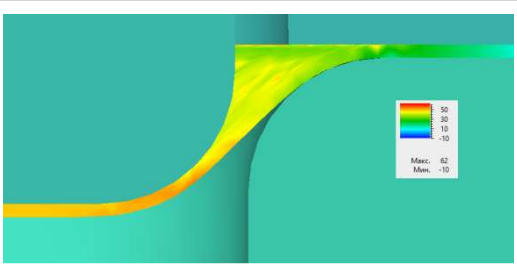
Рис. 11. Схема к оценке среднего напряжения при изотермической отбортовке ($s = 2$ мм; $\mu = 0{,}1$; $R = 5$ *мм*)***: а -*** $V = 0{,}01$ мм/с***;***
б - $V = 0{,}1$ мм/с***; в -*** $V = 1$ мм/с



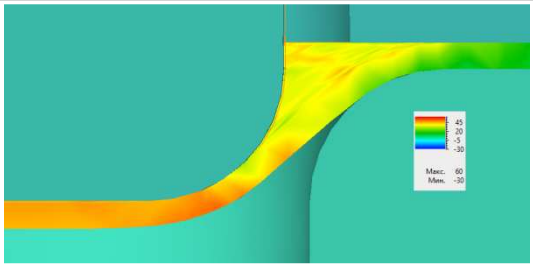
а ***б***

в

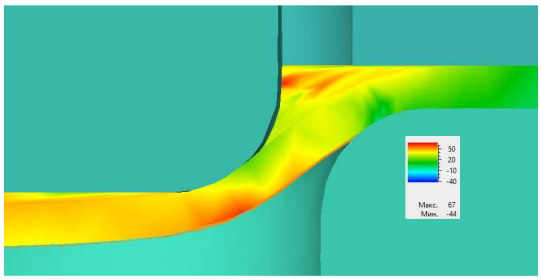
Рис. 12. Схема к оценке главных напряжений (stress 1) при изотермической отбортовке ($\mu = 0{,}1$; $V = 0{,}1$*мм*$/c$; $R = 5$ *мм*)***:***
а - $s = 1$ *мм*; ***б -*** $s = 2$ *мм*; ***в -*** $s = 4$ *мм*



а

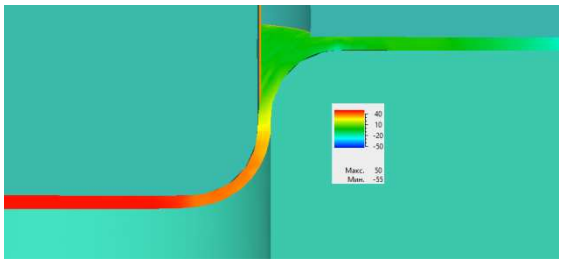


б

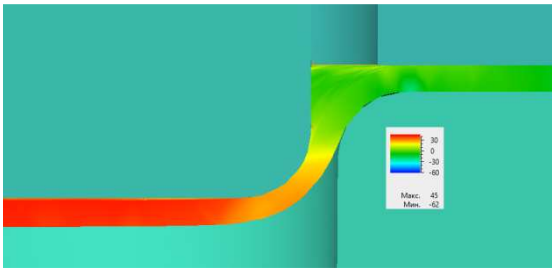


в

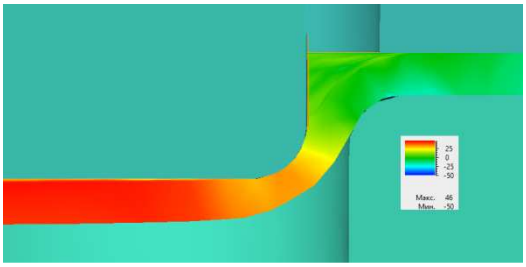
Рис. 13. Схема к оценке главных напряжений (stress 1) при изотермической отбортовке ***(***$\mu = 0{,}1;\ V = 0{,}1 мм/с;\ R = 10\ мм$***):***
а - $s = 1\ мм$***; б -*** $s = 2\ мм$***; в -*** $s = 4\ мм$



а

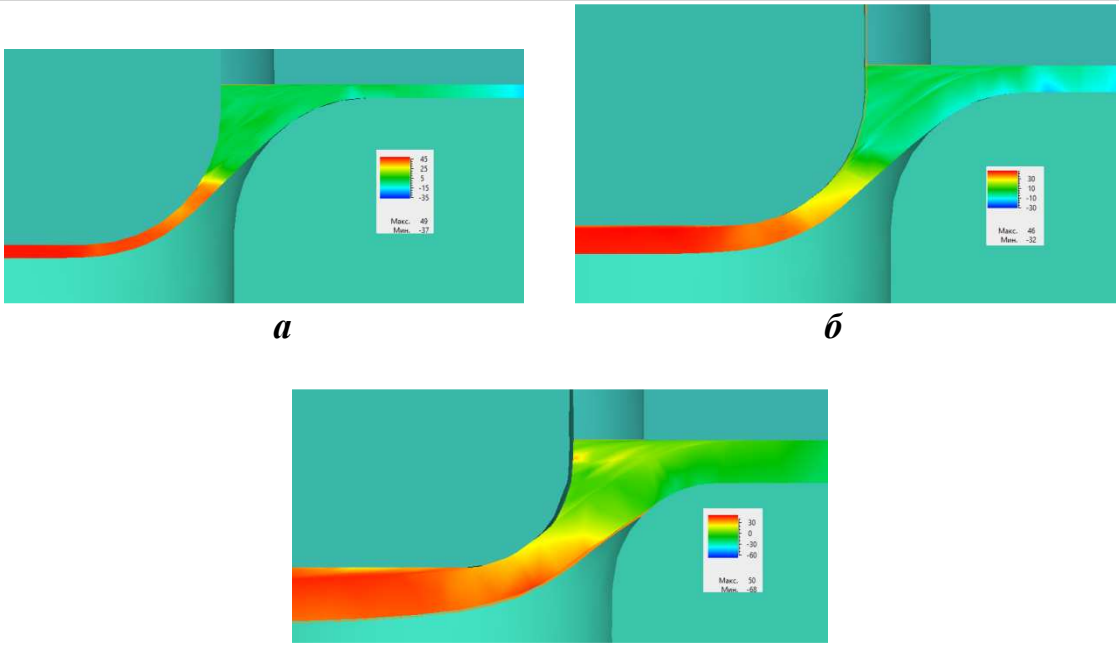


б



в

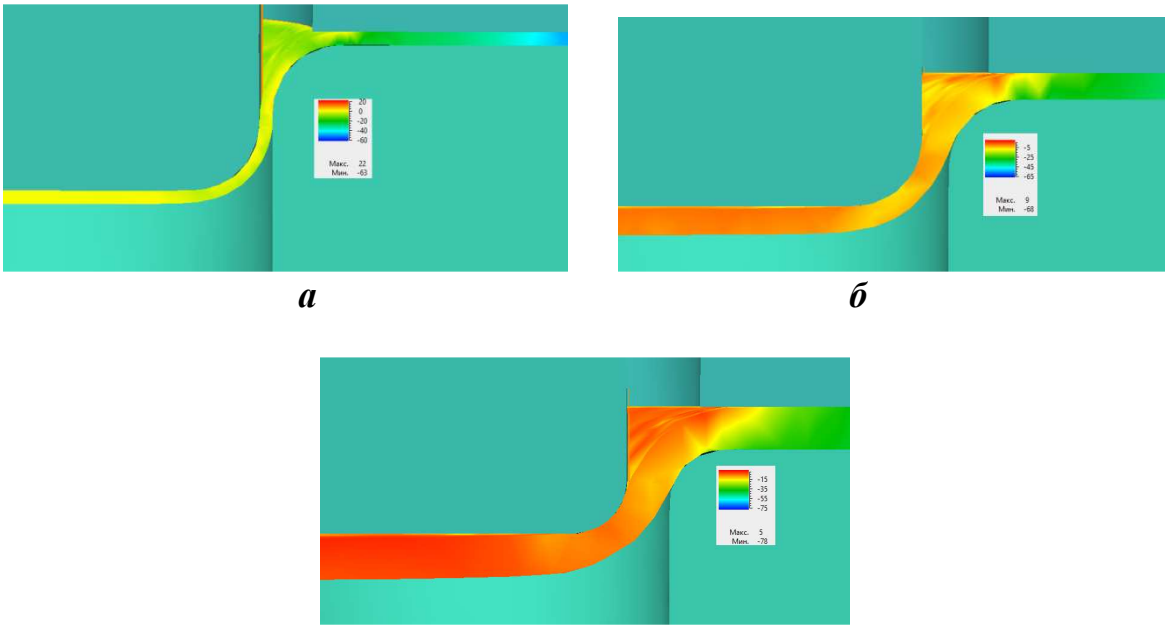
Рис. 14. Схема к оценке главных напряжений (stress 2) при изотермической отбортовке ***(***$\mu = 0{,}1;\ V = 0{,}1 мм/с;\ R = 5\ мм$***):***
а - $s = 1\ мм$***; б -*** $s = 2\ мм$***; в -*** $s = 4\ мм$



а ***б***

в

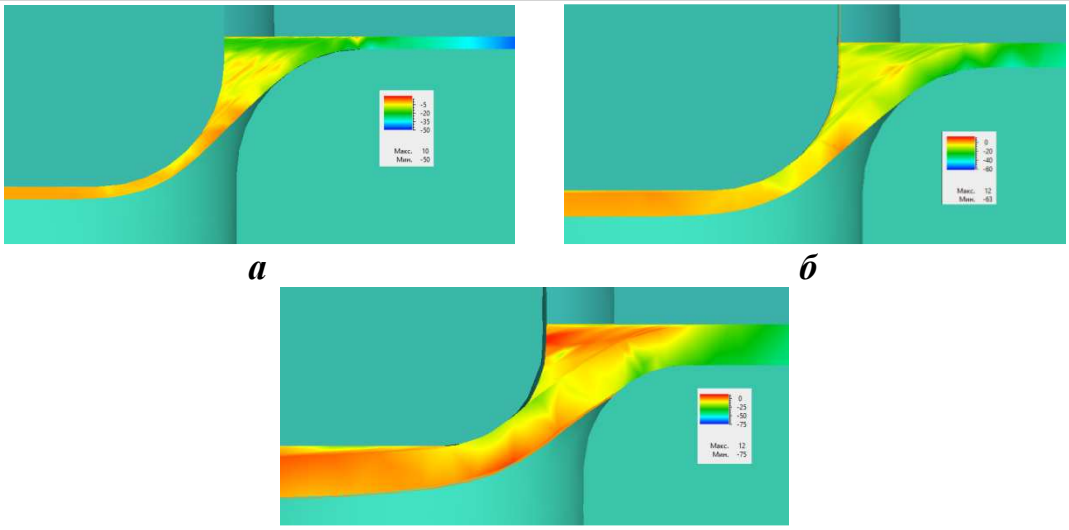
Рис. 15. Схема к оценке главных напряжений (stress 2) при изотермической отбортовке ***(*** $\mu = 0{,}1;\ V = 0{,}1 мм/с;\ R = 10\ мм$***):***
а - $s = 1\ мм$***; б -*** $s = 2\ мм$***; в -*** $s = 4\ мм$



а ***б***

в

Рис. 16. Схема к оценке главных напряжений (stress 3) при изотермической отбортовке ***(*** $\mu = 0{,}1;\ V = 0{,}1 мм/с;\ R = 5\ мм$***):***
а - $s = 1\ мм$***; б -*** $s = 2\ мм$***; в -*** $s = 4\ мм$

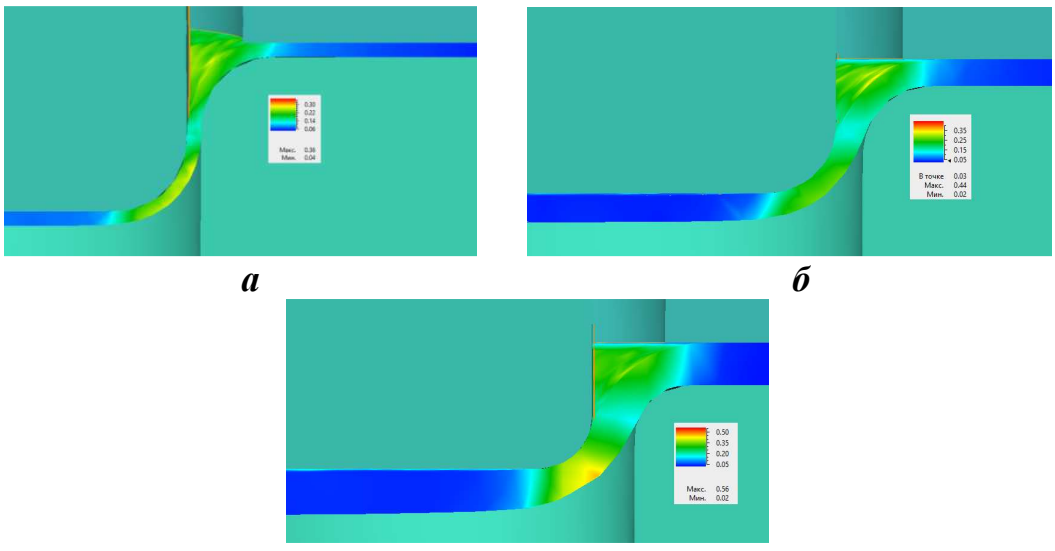


а ***б***

в

Рис. 17. Схема к оценке главных напряжений (stress 3) при изотермической отбортовке ***(***$\mu = 0{,}1;\ V = 0{,}1 мм/с;\ R = 10\ мм$***):***
а - $s = 1\ мм$***; б -*** $s = 2\ мм$***; в -*** $s = 4\ мм$

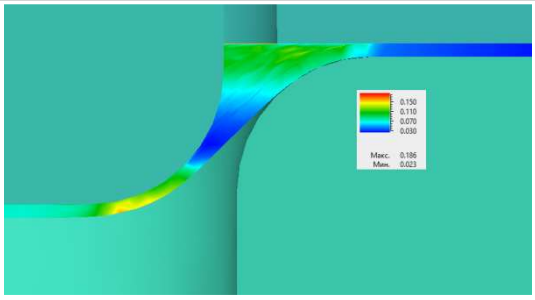
На рис. 18 - 28 представлены схемы распределения деформаций в заготовке, и деформаций в главных осях для различных значений трения, скорости, толщин заготовки и радиусов закруглений пуансона. Из представленных схем можно выявить значения места с наибольшими деформациями в заготовке, а так же установить влияние технологических факторов на степень деформаций при отбортовке. Деформации достигают своих максимальных величин на наружной поверхности заготовке в месте перехода цилиндрической части в дно и фланец.



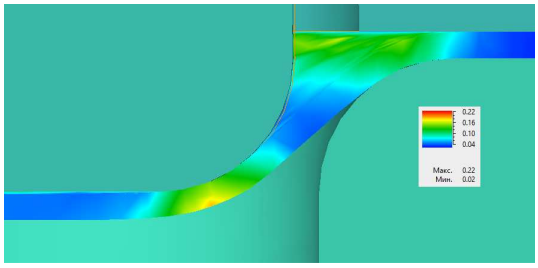
а ***б***

в

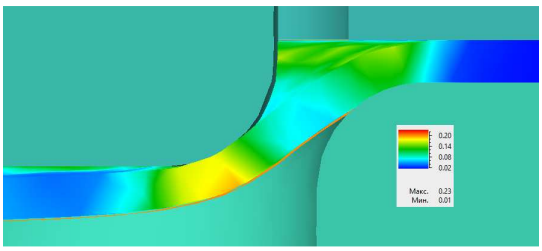
Рис. 18. Схема распределения деформаций при изотермической отбортовке ($\mu = 0{,}1;\ V = 0{,}1 мм/с;\ R = 5\ мм$***):а -*** $s = 1\ мм$***; б -*** $s = 2\ мм$***;***
в - $s = 4\ мм$



а

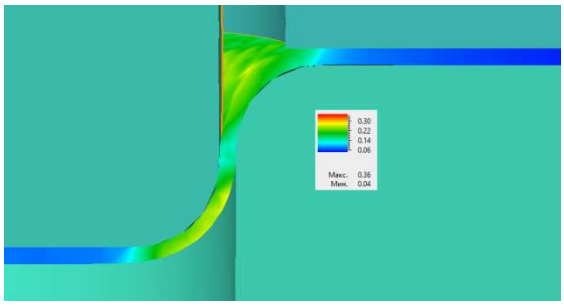


б

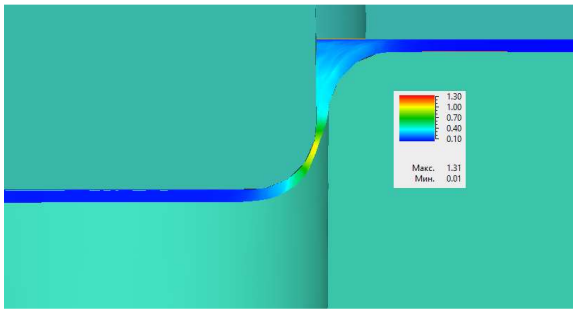


в

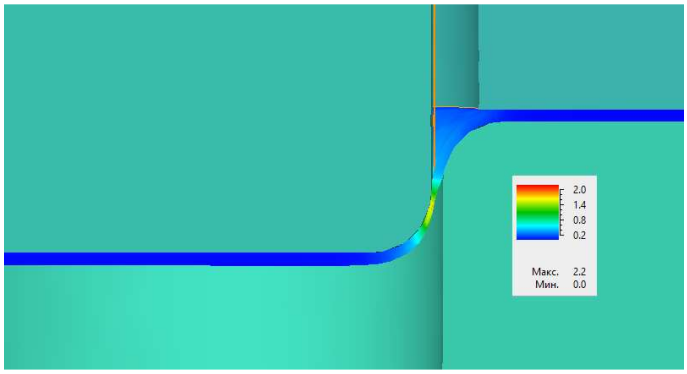
Рис. 19. Схема распределения деформаций при изотермической отбортовке ($\mu = 0{,}1;\ V = 0{,}1 мм/с;\ R = 10 мм$***):а -*** $s = 1\ мм$***; б -*** $s = 2\ мм$***; в -*** $s = 4\ мм$



а

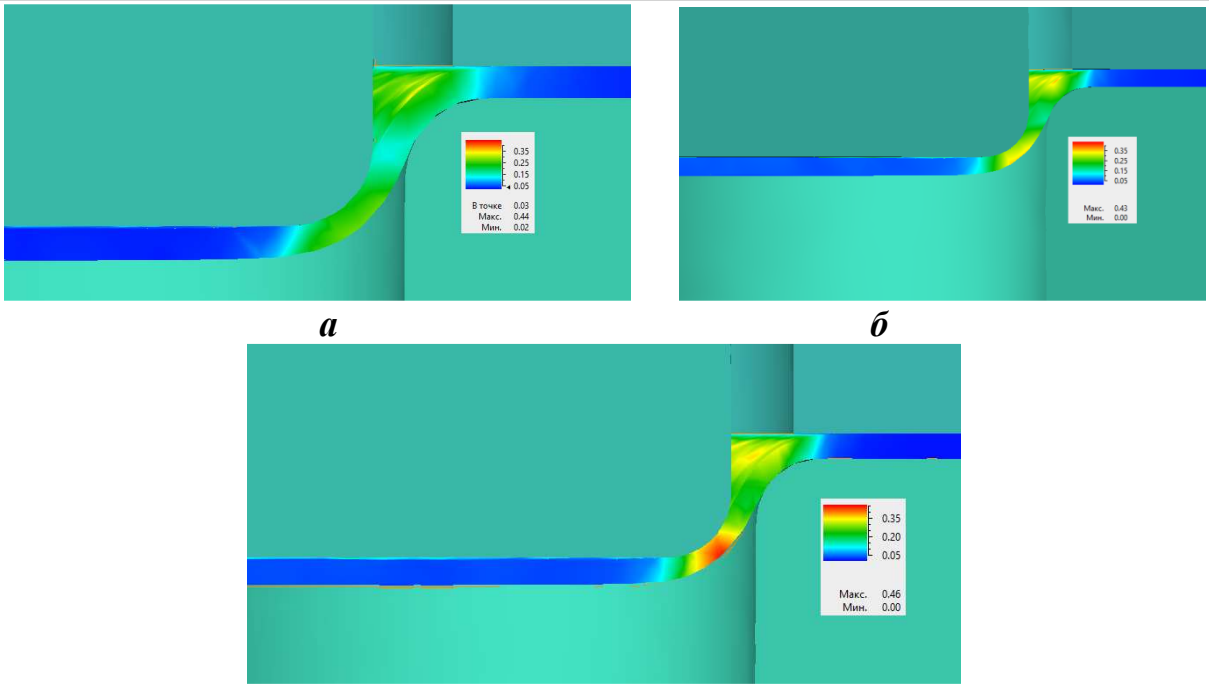


б



в

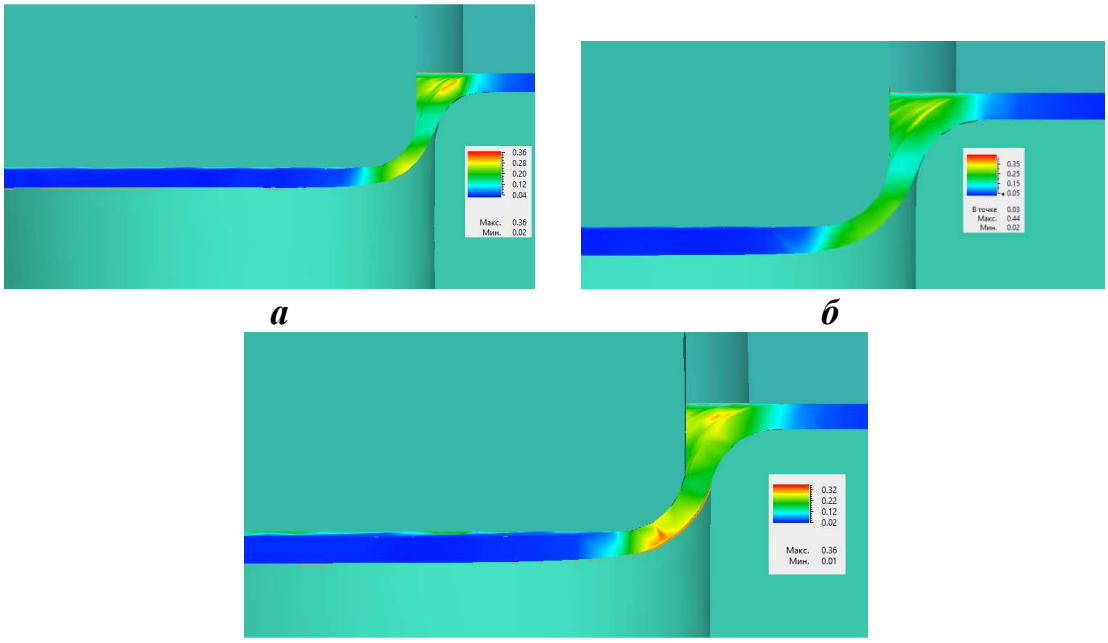
Рис. 20. Схема распределения деформаций при изотермической отбортовке ($s = 1$ мм; $V = 0{,}1 мм/с;\ R = 5\ мм$***): а -*** $\mu = 0{,}15$***; б -*** $\mu = 0{,}5\ мм$***; в -*** $\mu = 0{,}8\ мм$



а ***б***

в

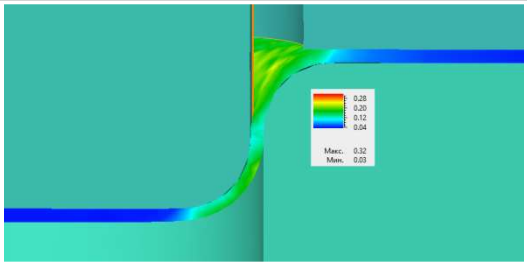
Рис. 21. Схема распределения деформаций при изотермической отбортовке ($s = 2$ мм; $V = 0{,}1 мм/с$; $R = 5$ *мм)****: а -*** $\mu = 0{,}15$***; б -*** $\mu = 0{,}5$ *мм****; в -*** $\mu = 0{,}8$ *мм*



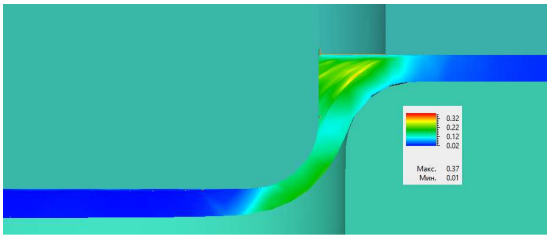
а ***б***

в

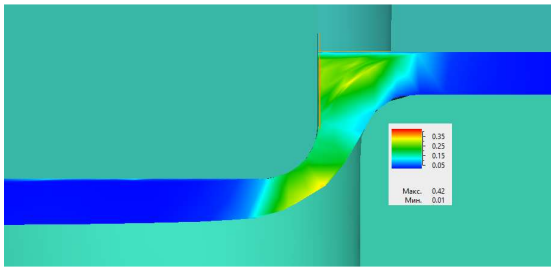
Рис. 22. Схема распределения деформаций при изотермической отбортовке ($s = 2$ мм; $\mu = 0{,}1$; $R = 5$ *мм)****:***
а - $V = 0{,}01$ мм/с***; б -*** $V = 0{,}01$ мм/с***; в -*** $V = 0{,}01$ мм/с



а

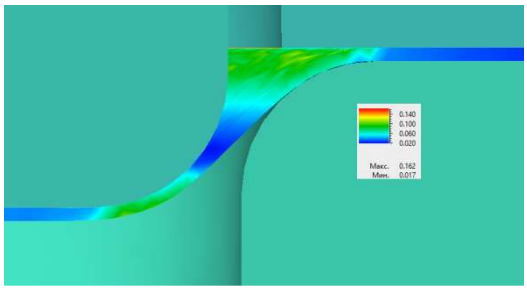


б

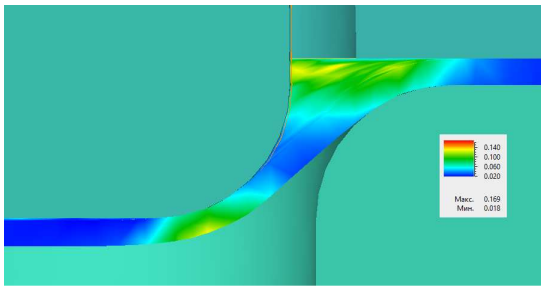


в

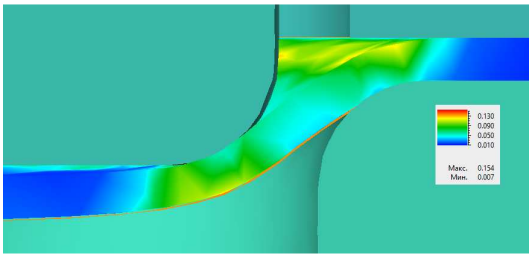
Рис. 23. Схема распределения деформаций в главных осях (strain 1) при изотермической отбортовке ($\mu = 0{,}1;\ V = 0{,}1 мм/с;\ R = 5\ мм$)***:***
а - $s = 1\ мм$***; б*** - $s = 2\ мм$***; в*** - $s = 4\ мм$



а

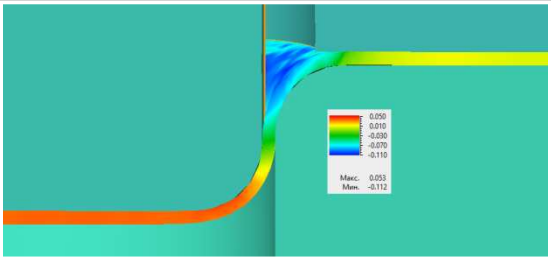


б

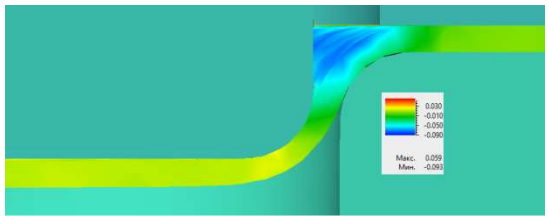


в

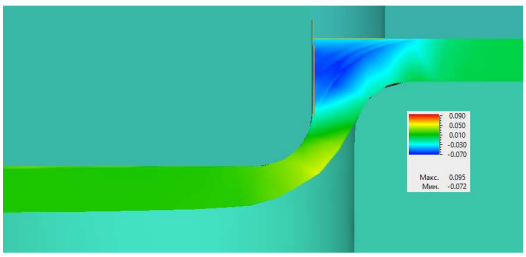
Рис. 24. Схема распределения деформаций в главных осях (strain 1) при изотермической отбортовке ($\mu = 0{,}1;\ V = 0{,}1 мм/с;\ R = 10\ мм$)***:***
а - $s = 1\ мм$***; б*** - $s = 2\ мм$***; в*** - $s = 4\ мм$



а

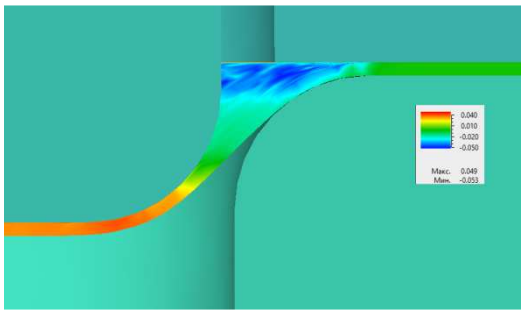


б

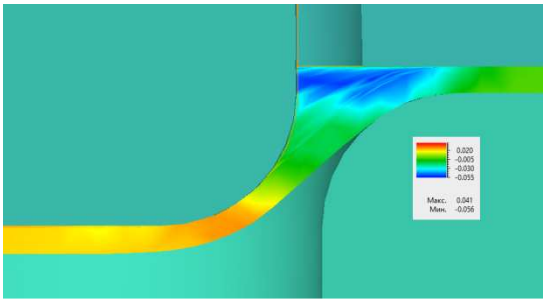


в

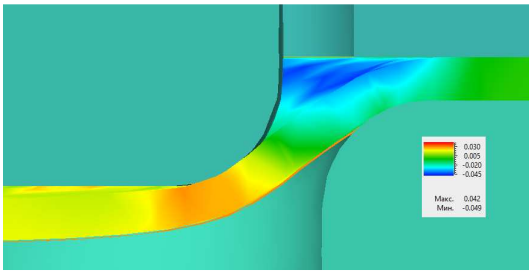
Рис. 25. Схема распределения деформаций в главных осях (strain 2) при изотермической отбортовке ($\mu = 0{,}1;\ V = 0{,}1 мм/с;\ R = 5\ мм$)***:***
а - $s = 1\ мм$***; б*** - $s = 2\ мм$***; в*** - $s = 4\ мм$



а

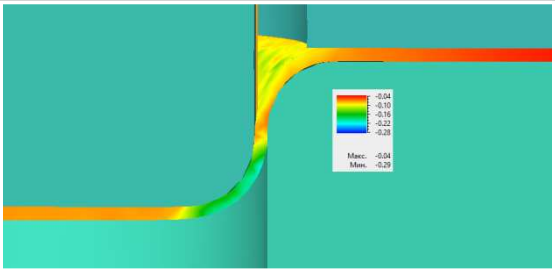


б

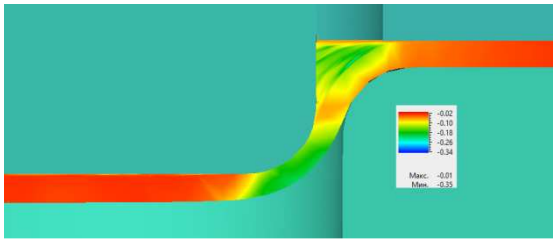


в

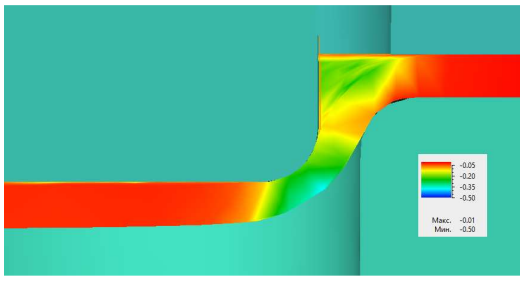
Рис. 26. Схема распределения деформаций в главных осях (strain 2) при изотермической отбортовке ($\mu = 0{,}1;\ V = 0{,}1 мм/с;\ R = 10\ мм$)***:***
а - $s = 1\ мм$***; б*** - $s = 2\ мм$***; в*** - $s = 4\ мм$



а

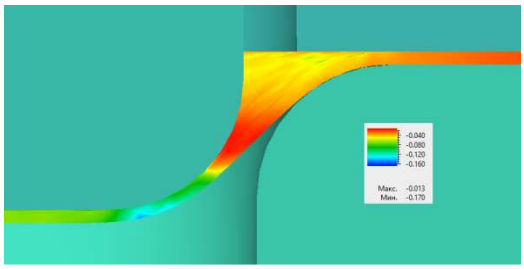


б

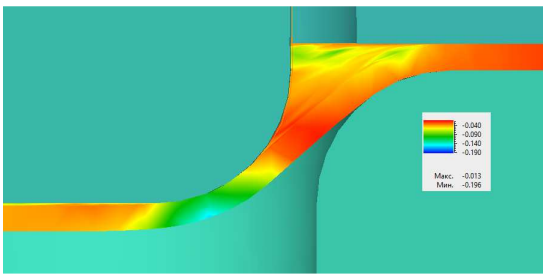


в

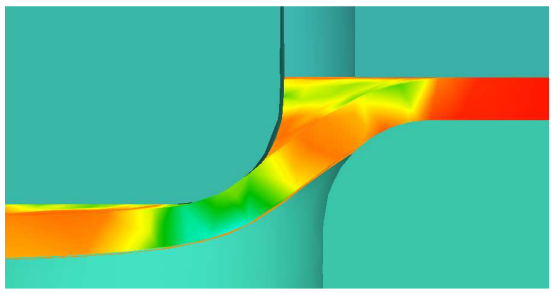
Рис. 27. Схема распределения деформаций в главных осях (strain 3) при изотермической отбортовке ($\mu = 0{,}1;\ V = 0{,}1 мм/с;\ R = 5\ мм$)**:**
а **-** $s = 1\ мм$**;** ***б*** **-** $s = 2\ мм$**;** ***в*** **-** $s = 4\ мм$



а



б



в

Рис. 28. Схема распределения деформаций в главных осях (strain 3) при изотермической отбортовке ($\mu = 0{,}1;\ V = 0{,}1 мм/с;\ R = 10\ мм$)**:**
а **-** $s = 1\ мм$**;** ***б*** **-** $s = 2\ мм$**;** ***в*** **-** $s = 4\ мм$

Полученные в ходе исследования и приведенные выше схемы позволяют оценить распределение напряжений и деформаций в заготовке на стационарной стадии процесса при различных технологических параметрах, что позволит выработать рекомендации по проектированию технологических процессов изотермической отбортовки и конструированию штамповой оснастки. Все это обеспечит значительное повышение эффективности данных технологических процессов и получение изделий высокого качества.

Работа выполнена в рамках гранта № 14-08-00066 а и гранта правительства Тульской области ДС/128.

Список литературы

1. Изотермическое формоизменение анизотропных материалов жестким инструментом в режиме кратковременной ползучести / С.С. Яковлев, С.П. Яковлев, В.Н. Чудин, В.И. Трегубов, А.В. Черняев. М.: Машиностроение, 2009. 412 с.

2. Малинин Н.Н. Ползучесть в обработке металлов. М.: Машиностроение, 1986. 216 с.

3. Романов К.И. Механика горячего формоизменения. М.: Машиностроение. 1993. 240 с.

4. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением. УПИ, 2001. 836 с.

5. Теория обработки металлов давлением / Учебник для вузов / В.А. Голенков, С.П. Яковлев, С.А. Головин, С.С. Яковлев, В.Д. Кухарь / Под ред. В.А. Голенкова, С.П. Яковлева. М.: Машиностроение, 2009. 442 с.

Ларин Сергей Николаевич, д-р техн. наук, проф., mpf-tula@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Нуждин Георгий Анатолиевич, mpf-tula@rambler.ru, Россия, Москва, Орган по сертификации систем качества «Консерсиум»

EVALUATION STRESS-STRAIN STATE DURING ISOTHERMAL FLANGING MODE SHORT-TERM CREEP

S.N. Larin, G.A. Nuzhdin

he paper presents the results of studies of the isothermal flanging mode transient creep blanks of high-strength materials. Research carried out on the basis of the finite element method. The paper established the influence of process parameters on the stress-strain state of the process. The results will be useful in the design of processes isothermal mode flanging short-term creep and designing tooling.

Key words: flange, short-term creep strength, voltage, forming.

Larin Sergey Nikolaevich, doctor of technical sciences, professor, mpf-tula@rambler.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Nuzhdin Georgiy Anatolievich, mpf-tula@rambler.ru, Russia, Moscow, organ by quality system certification "Konsersium"

УДК 621.983

ОБОБЩЕНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ РОТАЦИОННОЙ ВЫТЯЖКИ СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ ОБОЛОЧЕК С ПЕРЕМЕННОЙ ТОЛЩИНОЙ СТЕНКИ

В.И. Трегубов, О.В. Пилипенко, С.Н. Ларин, Е.В. Осипова

Подробно рассказывается о технологии ротационной вытяжки с разделением очага деформации для изготовления сложнопрофильных оболочек с переменной толщиной стенки. В качестве исходной заготовки используется горячекатаная труба из стали 10. В основу данной технологии положены результаты теоретических и экспериментальных исследований. Данная технология позволила снизить трудоемкость изготовления корпусов головных частей, снизить металлоемкость производства, повысить качество и надежность изготавливаемых деталей.

Ключевые слова: ротационная вытяжка, технологический процесс, сложнопрофильные изделия, формоизменение.

Основными задачами, стоящими перед современной промышленностью, являются повышение качества выпускаемой продукции, экономия материала и повышение производительности труда. Важная роль в решении данных задач отводится методам обработки металлов давлением, которые позволяют обеспечивать безотходное формоизменение металла вместо механической обработки резанием.

Однако обеспечение размерной точности, качества наружной и внутренней поверхности встречает определённые трудности. Особенно важен вопрос, касающийся изготовления цилиндрических тонкостенных оболочек длиной более 1 м. Получение деталей этого типа с помощью традиционных методов обработки, например, методом глубокой вытяжки, требует большого количества прессовых, механических и термических операции, дорогостоящего оборудования и оснастки. Производство указанных деталей с применением механической обработки резанием тем сложнее, чем дльньше деталь, выше требования к точности и качеству детали. К тому же, при изготовлении этих изделий резанием возникают высокие потери металла.

В последнее время, при получении тонкостенных цилиндрических деталей, находят всё более широкое применение методы обработки давлением с созданием локального очага деформации. Одним из таких методов является ротационная вытяжка [1, 2].

Значительное место в общем объёме деталей, изготавливаемых ротационной вытяжкой, занимает производство тонкостенных сложнопрофильных деталей.

На АО «НПО «Сплав» имеется большой опыт по использованию ротационной вытяжки для изготовления тонкостенных сложнопрофильных оболочек из различных материалов на специализированном оборудовании. Для изготовления деталей этого типа успешное применяются схемы ротационной вытяжки роликами с открытой и закрытой калибровкой, а также с разделением очага деформации [1-4].

Далее представлен пример использования процесса ротационной вытяжки для получения сложнопрофильных оболочек с переменной толщиной стенки и наличием кольцевых центрирующих утолщений изделий ответственного назначения.

Главнми требованиями, предъявляемыми к сложнопрофильным оболочкам с переменной толщиной стенки и наличием кольцевых центрирующих утолщений изделий ответственного назначения, являются: высокая точность геометрической формы, линейных и диаметральных размеров и толщины стенки; обеспечение высокой конструктивной прочности при минимальных весовых характеристиках; обеспечение качества поверхности, исключающего наличие поверхностных дефектов (пятен, царапин, забоин, трещин и др.). В зависимости от назначения длина таких оболочек может быть различной и достигает до 2000 мм и более.

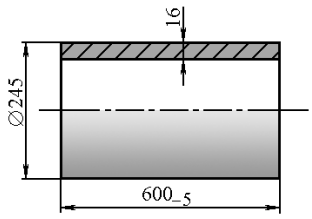
С учетом предъявляемых к корпусам изделий ответственного назначения требований при разработке технологии их изготовления осуществляется выбор наиболее рационального типа исходной заготовки и методов обработки, гарантирующих строгое обеспечение вышеуказанных требований. Действующая до настоящего времени технология изготовления таких оболочек длиной более 2000 мм предусматривала изготовление их из двух составных частей, каждая из которых предварительно изготавливалась из трубных заготовок с последующей их сваркой в единую конструкцию и окончательной механической обработкой. Суммарный цикл изготовления типовой сварной конструкции сложнопрофильной оболочки, включая окончательную механическую обработку, состоит из 22 основных операций.

Таким образом, действовавшая технология изготовления сложнопрофильной оболочки имеет достаточно высокую трудоемкость, требующую использования большого количества различного рода оборудования, производственных площадей и численности работающих. Кроме того, наличие сварных швов в сложнопрофильных оболочках, работающих в усло-

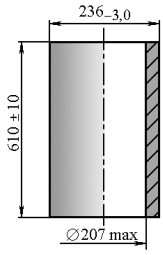
виях высоких динамических нагрузок, в том числе и после их длительного хранения при плюсовых и минусовых температурах, снижает их эксплуатационную надежность.

В связи с изложенным, на АО «НПО «Сплав» были проведены работы по созданию цельнометаллической конструкции сложнопрофильных оболочек и промышленной технологии их производства. В основу этих разработок были положены результаты теоретических и экспериментальных исследований [3, 4].

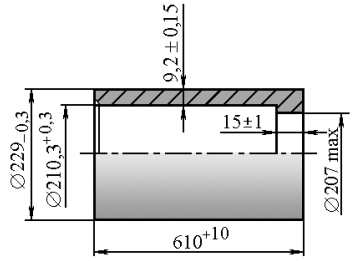
На рис. 1 представлена схема типового технологического процесса изготовления цельнометаллической конструкции сложнопрофильной оболочки с применением метода ротационной вытяжки.



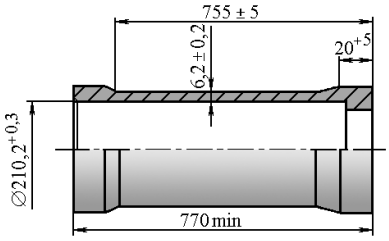
1. Резка трубы на мерные заготовки



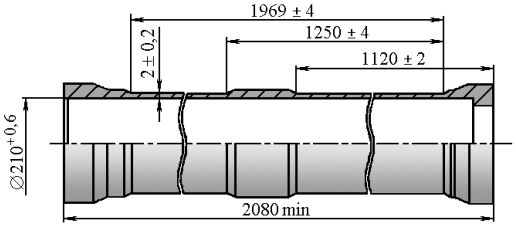
2. Калибровка
3. Термообработка



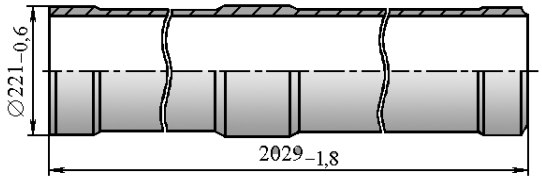
4. Механическая обработка под ротационную вытяжку



5. Ротационная вытяжка первая



6. Ротационная вытяжка вторая
7. Низкотемпературный отжиг



8. Окончательная механическая обработка

Рис. 1. Схема типового технологического процесса изготовления цельнометаллической конструкции сложнопрофильной оболочки

В качестве исходной заготовки используется горячекатаная труба 245х16 ГОСТ 8732 из стали 10, которая после разрезки на мерные заготовки подвергается калибровке по наружному диаметру на гидравлическом прессе.

Операция калибровки предназначена для получения более точных диаметральных размеров, приближенных к размерам заготовки под ротационную вытяжку, что позволяет обеспечить минимально необходимые величины припусков на последующую механическую обработку наружной и внутренней поверхностей заготовок. Операция выполняется на гидравлических прессах модели ПА 7832. Схема калибровки заготовок показана на рис. 2.

Нижняя часть штампа, установленная на столе 1 пресса, состоит из подштамповой плиты 2, на которой установлен съемник 3. Через промежуточное кольцо 4 соосно со съемником размещена матрица 5, запрессованная в бандаже 6. Нижняя часть штампа закрепляется на столе пресса с помощью прижимной плиты 7 и болтов 8.

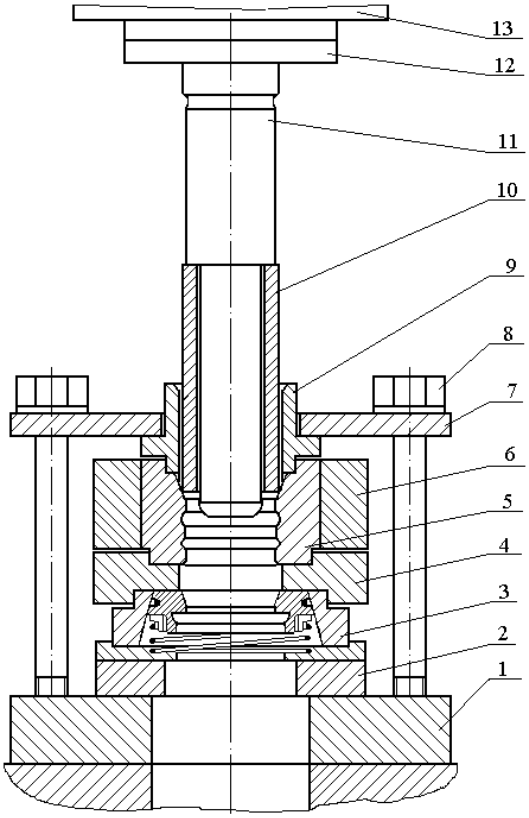


Рис. 2. Схема калибровки трубных заготовок по наружному диаметру

Сила зажима передается через направляющую втулку 9, установленную соосно с матрицей. Направляющая втулка служит для точной установки исходной заготовки 10 в штампе перед калибровкой. Верхняя часть штампа состоит из пуансона 11, который с помощью патрона 12 за-

креплен на ползуне 13 пресса. Рабочий цикл калибровки осуществляется следующим образом. Исходная заготовка 10 с помощью загрузочного устройства устанавливается в направляющей втулке 9. Загрузка осуществляется при исходном, верхнем положении ползуна 13 с пуансоном 11. После этого осуществляется ускоренное перемещение ползуна 13 вниз, при этом направляющая часть пуансона входит в полость заготовки.

При подходе буртика пуансона к верхнему торцу детали ускоренный ход пуансона переключается на рабочий, при этом буртик пуансона, воздействуя на торец заготовки 10, проталкивает ее через матрицу 5, уменьшая диаметр заготовки до размера матрицы. Проталкивание заготовки осуществляется до раздвижных подпружиненных захватов съемника 3, после чего включается обратный ход ползуна, при котором пуансон поднимается в исходное верхнее положение, а заготовка удерживается захватами съемника. После окончательного съема заготовки с пуансона она удаляется из зоны обработки выгрузочным устройством. Затем осуществляется загрузка очередной заготовки, и цикл работы пресса повторяется.

Перед проведением калибровки заготовки подвергают циклу подготовительных химических операций: травлению и фосфатированию, которые производятся на специализированных агрегатах модели АФ-1, работающих в автоматическом режиме. С учетом жестких требований, предъявляемых к детали по качеству поверхности, исключающих наличие дефектов наружной и внутренней поверхностей, исходные заготовки после калибровки подвергают механической обработке (расточке, обточке).

В процессе механической обработки наружной и внутренней поверхностей заготовок достигается необходимая размерная точность, точность взаимного расположения поверхностей, шероховатость поверхностей и др. Операции механической обработки осуществляются на токарных станках модели 16К20, оснащенных соответствующими приспособлениями.

После механической обработки заготовки подвергаются ротационной вытяжке. Ротационная вытяжка является основной формообразующей операцией в технологическом цикле изготовления цельнометаллических корпусов.

В результате проведения ротационной вытяжки обеспечиваются с высокой точностью основные геометрические параметры готовой детали, точность ее геометрической формы, качество поверхности. Кроме того, в процессе ротационной вытяжки происходит значительное упрочнение (в 1,6…2 раз по сравнению с механическими свойствами исходной заготовки) материала детали.

Для крупногабаритных тонкостенных осесимметричных деталей ротационная вытяжка является наиболее экономически целесообразным методом, так как использование других традиционных методов является либо технически невозможным или экономически нецелесообразным спо-

собом. Например, метод глубокой вытяжки неприменим из-за отсутствия прессового оборудования соответствующих габаритов, а изготовление тонкостенных осесимметричных оболочек длиной свыше 2000 мм механической обработкой по наружной и внутренней поверхностям является весьма трудоемким процессом, характеризующимся низким коэффициентом использования металла и высокой себестоимостью продукции. Кроме того, механическая обработка не может упрочнить исходный материал, поэтому потребуется дополнительно замена исходного материала на более высокопрочный, имеющий более высокую стоимость.

Для ротационной вытяжки корпусов был использован трехроликовый давильный раскатной станок В-280М. В качестве рабочего инструмента использовалась оправка и деформирующие ролики, изготовленные из легированной инструментальной стали 9Х1, закаленной с обеспечением твердости HRC 56…62. Обработка полуфабрикатов производилась по способу ротационной вытяжки с разделением деформации. Схема деформирования сложнопрофильных оболочек представлена на рис. 1.

Особенностью ротационной вытяжки по вышеуказанному способу является возможность создания благоприятных условий для деформирования материала, позволяющих наиболее полно использовать пластические свойства материала с одновременным обеспечением высокой точности размеров, геометрической формы, а также высококачественной поверхности изготавливаемых деталей. Разделение суммарной деформации между роликами позволяет вести процесс ротационной вытяжки с высокими степенями деформации при более низких потребных силах по сравнению с традиционными способами ротационной вытяжки.

Суммарная степень деформации составляет 70%. Для формоизменения использовались комплекты роликов диаметром $D_p = 260$ мм, шириной $B = 85$ мм, радиусом закругления при вершине $r = 6$ мм, с углами конуса $\alpha_{p1} = 15^\circ$ и $\alpha_{p\,2,3} = 30^\circ$. Частота вращения шпинделя составляла $n = 200$ 1/мин, осевая подача - $S = 1{,}2$ мм/об.

Деформация распределялась между тремя валками, расположенными под углом 120 градусов по отношению друг к другу, по разработанным рекомендациям [3, 4]. Такая схема проведения процесса формообразования позволяет снизить радиальную силу со стороны металла на деформирующие элементы, облегчить протекание процесса и стабилизировать получение конечного результата. Ротационная вытяжка ведется по циклограмме от загрузки заготовки до съема готовой детали. Заготовка посредством автоматической загрузки одевается на оправку и поджимается с торца к оправке упором. Оправке придается вращение и одновременно клеть перемещается в исходное положение начала раскатки. Далее происходит сведение валков на установленный зазор с учетом упругих деформаций металла заготовки при одновременном продольном перемещении клети с

формообразованием заходного конического участка до определенного стабилизирующего момента, обеспечивающего равномерное стенкообразование на определенной чертежом длине детали. Линейные перемещения клети и разведение, сведение деформирующих элементов обеспечивается электронными датчиками, позволяющими получать деталь с необходимыми геометрическими параметрами.

По завершении рабочего перемещения валки разводятся. Прекращается вращение оправки. Отводятся упор и пиноль, и осуществляется съем детали. Для новой детали цикл повторяется вновь. Далее производится отжиг детали, уменьшающий остаточные напряжения, и окончательная механическая обработка: обточка концевых утолщений и подрезка длины в окончательный размер. На этапе экспериментальной технологии были установлены наиболее рациональные технологические режимы обработки, геометрические параметры деформирующего инструмента.

Результаты проведенных работ показали, что создание цельнометаллической конструкции сложнопрофильной оболочки и прогрессивной технологии ее производства позволил: снизить трудоемкость изготовления корпусов головных частей на 45%; снизить металлоемкость производства до 37%; повысить качество и надежность изготавливаемых деталей за счет исключения сварных швов, точности геометрической формы и взаимного расположения поверхностей.

Работа выполнена в рамках гранта РФФИ № 15-48-03235 и гранта правительства Тульской области ДС/127.

Список литературы

1. Гредитор М.А. Давильные работы и ротационное выдавливание. М.: Машиностроение, 1971. 240 с.

2. Могильный Н.И. Ротационная вытяжка оболочковых деталей на станках. - М.: Машиностроение, 1983. 192 с.

3. Трегубов В.И. Ротационная вытяжка с утонением стенки цилиндрических деталей из труб на специализированном оборудовании. Тула: ТулГУ, Тульский полиграфист, 2002. 148 с.

4. Белов Е.А., Юдин Л.Г. Ротационная вытяжка на специализированном оборудовании // Ковка и штамповка: Справочник. Том 4. Листовая штамповка / Под ред. А.Д. Матвеева; Ред. совет: Е.И. Семенов (пред.) и др. М.: Машиностроение, 1987. С. 234 – 257.

Трегубов Виктор Иванович, д-р техн. наук, проф., mpf-tula@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Ларин Сергей Николаевич, д-р техн. наук, проф., mpf-tula@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

SYNTHESIS AND THEORETICAL RESEARCH EKSPERIMENITALNYH ROTARY DRAWING FIGURINE SHELLS WITH VARIABLE WALL THICKNESS

V.I. Tregubov, S.N. Larin

The article details the rotary drawing technology with time-division strain for the manufacture of complex-shells with variable wall thickness. As the initial preform used hot-rolled steel pipe 10. The basis of this technology on the results of theoretical and experimental investigations of former. This technology has reduced the complexity of manufacturing buildings warheads, reduce metal production, is improve the quality and reliability of manufactured parts.

Key words: rotary extractor, process, difficult-profile products forming.

Tregubov Victor Ivanovich, doctor of technical sciences, professor, mpf-tula@rambler.ru, Russia, Tula, NPO «SPLAV»,

Larin Sergey Nikolaevich, doctor of technical sciences, professor, mpf-tula@rambler.ru, Russia, Moscow, Moskow State University of Means of communications

УДК 621.983:539.374

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ КОНИЧЕСКИХ КУМУЛЯТИВНЫХ ОБЛИЦОВОК

А.Е. Киреева, В.Д. Кухарь, О.Н. Митин

В статье рассмотрены основные технологии получения конических облицовок. Выявлены достоинства и недостатки.

Ключевые слова: кумулятивная облицовка, прутковая заготовка, штамповка, матрица, пуансон, деформация, обработка металлов давлением.

Важнейшем элементом кумулятивного заряда во многом определяющую ее пробивную способность является облицовка кумулятивной выемки [4]. При этом повышение пробивного действия кумулятивного заряда существенно зависит от физико-механических свойств материала облицовки и технологии ее изготовления.

В настоящее время наибольшее распространение получили медные облицовки конической формы (рис.1), которые квалифицируются по геометрическим размерам согласно таблице.

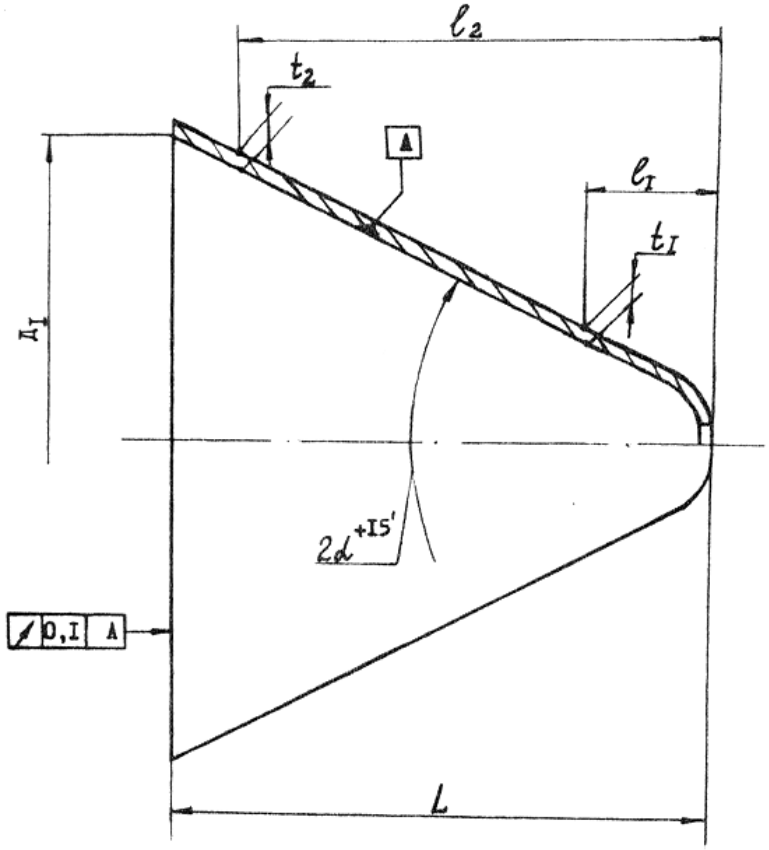


Рис.1. Облицовка конической формы

Облицовки первой группы называют облицовками малого калибра, второй группы среднего калибра, третьей группы большого калибра.

Согласно таблице толщина стенки облицовки может быть как постоянной, так и переменной по длине облицовки [1].

Размеры облицовок

Глубина облицовок	Размеры облицовок, мм				
	D_1	t_1	t_2	R_I	2α
I	от 30 до 55	0.4...2.5	0.8...3.5	5...7	30...90
II	св. 55 до 80	0.4...2.5	0.8...3.5	5...7	30...90
II	св. 80 до 110	0.4...2.5	0.8...3.5	5...7	30...90

Так при t_2 меньше t_1 толщина облицовки уменьшается к ее основанию, в противном случае толщина донной части будет превышать толщину основания. Даже если эти размеры будут изменяться по линейному закону по длине облицовки это приведет к существенным трудностям при их изготовлении.

Кроме того образующая конической облицовки может незначительно отличаться от прямой вогнутостью или выпуклостью в ту или другую сторону.

Все это тоже оказывает существенное влияние на технологию изготовления конкретного вида облицовки.

Традиционными технологическим процессами получения кумулятивных облицовок является штамповка из листовой заготовки, раскатка листовой заготовки на конической оправки, формирование облицовок из медных порошков в матрице соответствующей формы и штамповка облицовок из мерных прутковых заготовок.

Ниже рассмотрим преимущества и недостатки каждого вида технологии получения облицовок малого калибра на примере облицовки рис.2.

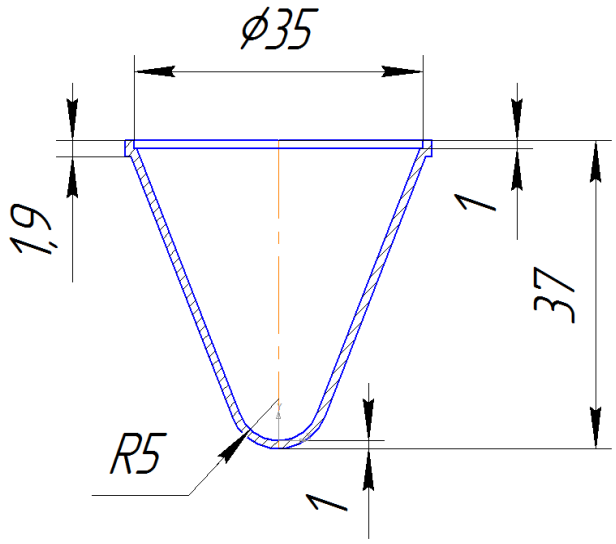


Рис.2. Геометрические размеры конической кумулятивной облицовки

Получение данной облицовки вытяжкой из листовой заготовки толщиной 1 мм и диаметром 25,8 мм требуется шесть технологических переходов с промежуточными операциями отжига. Это значительно увеличивает затраты на технологическую оснаску и приводит к увеличению трудоемкости изготовления изделия [3].

Ротационная вытяжка из плоской заготовки потребует как минимум двух операций раскатки и при этом не осесимметричный характер деформирования материала приведет к возникновении анизотропии механических свойств, которая окажет существенное влияние на эффективность действия кумулятивного зарядов [3].

Технология основана на прессовании порошковых материалов не позволяет обеспечить приводит требуемую плотность материала по всему объему заготовки, что сказывается на эффективности действия кумулятивного заряда [2].

Наибольший интерес представляет технология штамповки облицовок из мерных цилиндрических заготовок. В этом случае осесимметричный характер течения материала позволяет исключить возникновение плоскостной анизотропии механических свойств материала в стенках воронки, которая оказывает существенное влияние на эффективность ее действия. А использование прутковой заготовки позволяет значительно повысить коэффициент использования материала.

Однако, реализация этого процесса связана со значительными сложностями, вызванными конической геометрией получаемого изделия. В отличии от классического обратного выдавливания цилиндрического стакана данный процесс отличается тем, что цилиндрическая заготовка должна быть четко зафиксирована в полости конической матрицы (рис. 3).

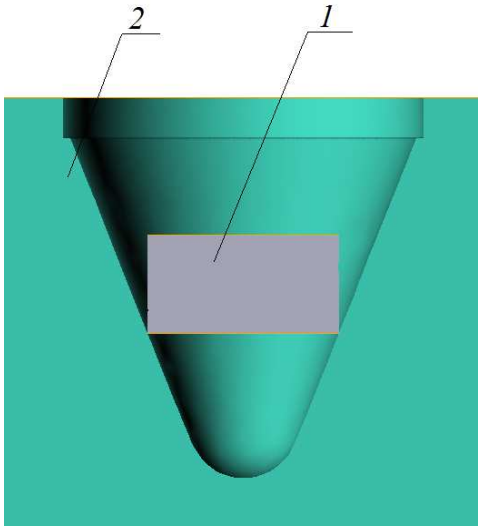


Рис. 3. Схема фиксации заготовки (1) в полости конической матрицы (2)

В идеальном случае при воздействии конического пуансона на заготовку процесс деформирования ее сведется к свертке с последующим комбинированным выдавливанием, когда металл перемещается в прямом и обратном направлении относительно пуансона и матрицы (рис.4).

Однако в большинстве случаев при воздействии на заготовку конического пуансона, она может изменить свое положение в пространстве (как жесткое тело), что приведет к не осесимметричному характеру ее формоизменения, т.е. к браку (рис.5).

Поэтому первоочередной задачей для стабильной реализации данного процесса является выбор геометрии и размеров исходной заготовки, обеспечивающих ее устойчивое положение в полости матрицы в процессе деформирования.

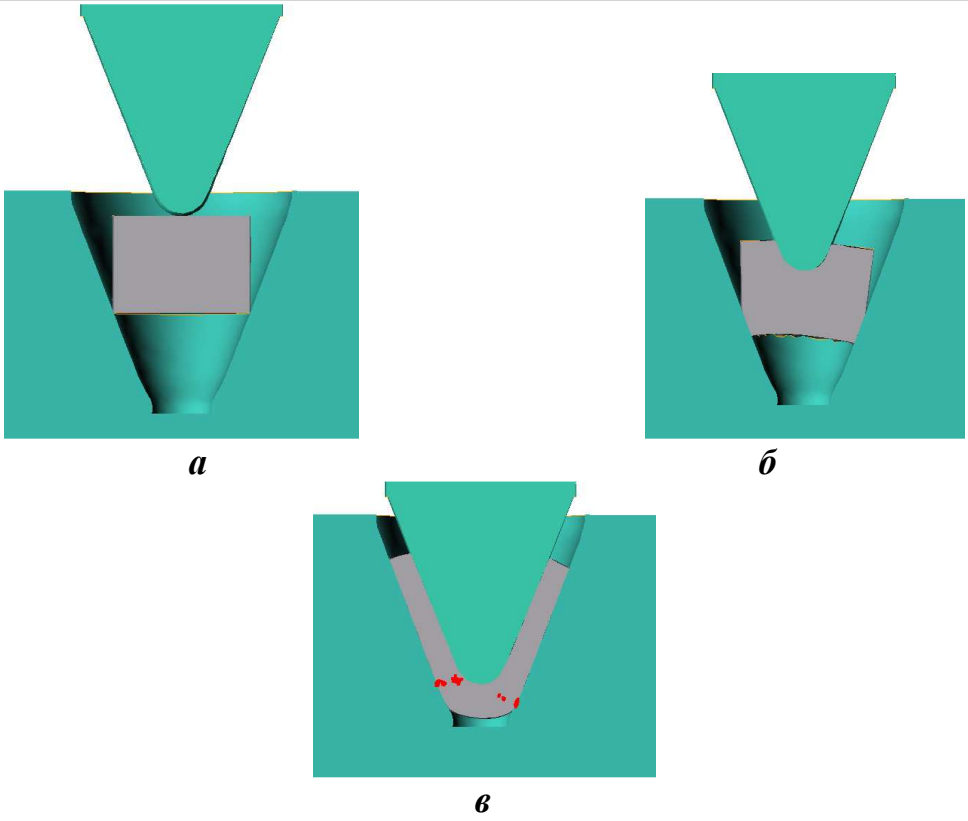


Рис. 4. Этапы осесимметричного деформирования заготовки

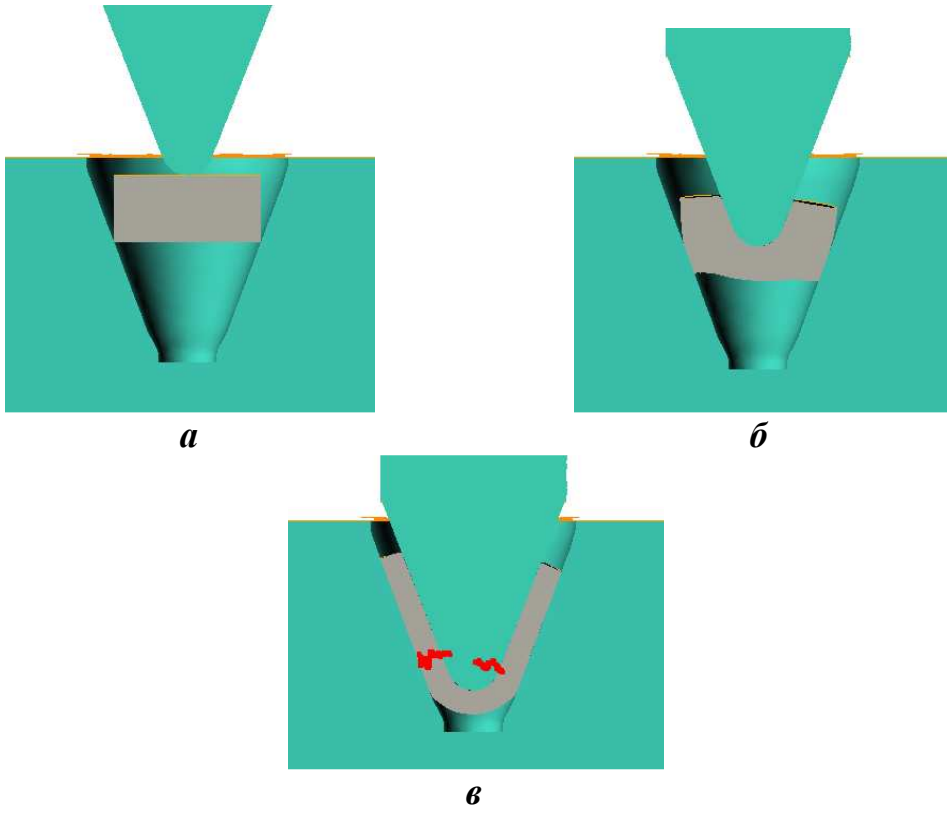


Рис. 5. Этапы не осесимметричного деформирования заготовки

В связи с этим процесс деформирования может быть разбит на ряд этапов, на первом из которых реализуется операция предварительной формовки заготовки, а на последующей операции ее окончательная штамповка до требуемой геометрией.

Кроме того штамповка прутковых заготовок может быть сведена к получению промежуточных поковок, которые должны в последующем подвергаться или механической обработке или раскатки. Возможны варианты, когда операция штамповки позволит получить окончательные размеры соответствующей кумулятивной воронки за один переход.

Эти вопросы требуют дополнительного исследования, которые можно будет провести с использованием адекватных математических моделей.

Работа выполнена в рамках гранта РФФИ 16-48-710824 и гранта правительства Тульской области ДС/47 от 25.05.2016.

Список литературы

1. Вопросы моделирования и конструирования кумулятивных зарядов: Учеб. пособие / М.С. Воротилин, С.В. Дорофеев, Л.Н. Князева, А.Н. Чуков. Тула: ТулГУ, 2003. 168с.

2. Кумулятивные заряды: монография / И.В. Минин, О.В. Минин. Новосибирск: СГГА, 2013. 200 с.

3. Романовский В.П. Справочник по холодной штамповке. Л.: Машиностроение, 1979. 520с.

4. Устойчивость ограниченной кумуляции / В.Г. Смеликов. М.: Студия "Этника" (ИП Трошков А.В.), 2016. 120с.

Киреева Алена Евгеньевна, канд. техн. наук, доц., kirealena@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Кухарь Владимир Денисович, д-р. техн. наук, проф., зав. кафедрой, Vladimir.D.Kuchar@tsu.tula.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Митин Олег Николаевич, канд. техн. наук, докторант, mpf-tula@rambler.ru, Россия, Тула, ОАО «НПО «СПЛАВ»

TECHNOLOGICAL FEATURES OF OBTAINING OF CONICAL SHAPED-CHARGE LINERS

A.E. Kireeva, V.D. Kukhar, O.N. Mitin

The article describes the main technologies of producing conical wall. Identified strengths and weaknesses.

Key words: the cumulative cladding, bar processing, stamping, matrix, punch, deformation, processing of metals by pressure.

Kireeva Alena Evgenevna, candidate of technical science, docent, kirealena@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Kukhar Vladimir Denisovich, doctor of technical science, professor, manager of kathedra, Vladimir.D.Kuchar@tsu.tula.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Mitin Oleg Nikolayevich, candidate of technical sciences, doctoral, mpftula@rambler.ru, Russia, Tula, OPC "SPA "SPLAV"

УДК 621.7.04

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПЕРАЦИИ ИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ОТБОРТОВКИ ОТВЕРСТИЙ В ЗАГОТОВКАХ С НАКЛОННЫМ ФЛАНЦЕМ

А.В. Черняев, А.Т. До

Представлены результаты теоретических исследований операции изотермической отбортовки отверстий в заготовках с наклонным фланцем методом конечных элементов на основе программного комплекса QFORM 2D/3D. Установлены зависимости силы отбортовки от технологических параметров при вязко-пластическом течении материала.

Ключевые слова: моделирование, вязкость, кратковременная ползучесть, отбортовка, метод конечных элементов, силовые режимы.

Патрубки с наклонным фланцем из высокопрочных материалов находят широкое применение в отраслях машиностроения, связанных с производством продукции для авиационной и ракетно-космической техники и могут использоваться в качестве горловин емкостей топлива и соединительных переходников. Традиционные технологии изготовление патрубков с наклонным фланцем связаны с горячей штамповкой толстостенных кованых труб путем многооперационной раздачи, высадки, правки с большими припусками под механическую обработку. Недостатками существующих технологий являются низкие предельные возможности этого процесса, что ограничивает высоту получаемого борта, а также значительное утонение материала на кромке отверстия борта.

Предлагается производство патрубков с наклонным фланцем осуществлять отбортовкой плоских листовых заготовок с предварительно образованным отверстием с последующей операцией обратного выдавливания, повышающей точность толщины стенки и внутреннего диаметра патрубка [1]. Процессы реализуются в регламентированных температурно-скоростных условиях, в режиме вязко-пластического течения материала [2].

Ниже приведены результаты теоретических исследований силовых режимов изотермической отбортовки отверстий в заготовках с наклонным фланцем (рис. 1) методом конечных элементов на основе программного комплекса QFORM 2D/3D v.7. Расчеты операции отбортовки выполнены для заготовок при следующих геометрических размерах и технологических параметрах операции: угол наклонна фланца $\alpha = 0...20^\circ$; диаметр пуансона $D = 70\,мм$; диаметр отверстия $d = 35...58\,мм$; толщина заготовки $s_0 = 4\,мм$; скорость перемещения инструмента $v = 0{,}1...10\,мм/с$; коэффициент трения $\mu = 0{,}1...0{,}4$. Исследования выполнены для алюминиевого сплава АА1050 и титанового сплава ВТ6 при температурах деформирования $T = 450^\circ C$ и $T = 930^\circ C$ соответственно. Материал заготовки принимается вязкопластическим, изотропным, несжимаемым, однородным, изотропно упрочняющимся.

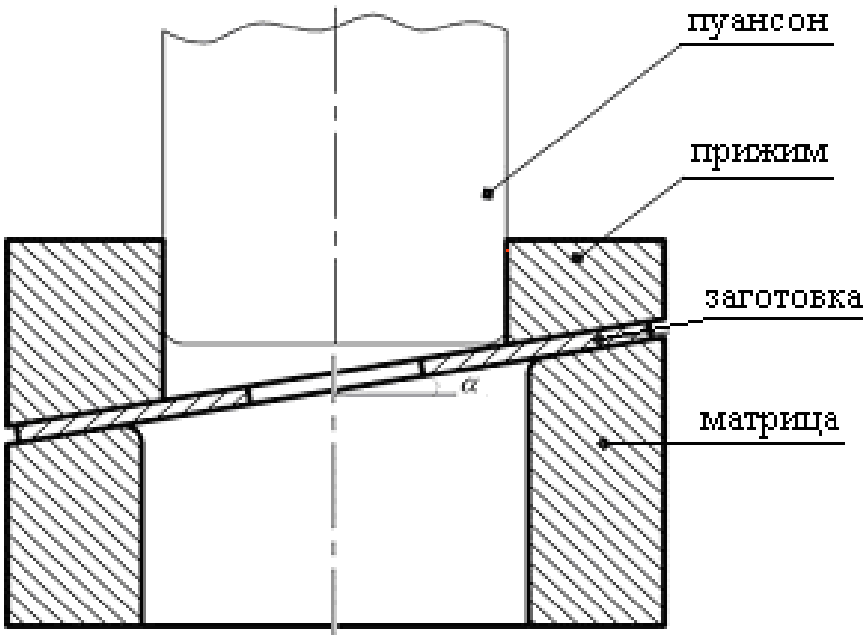
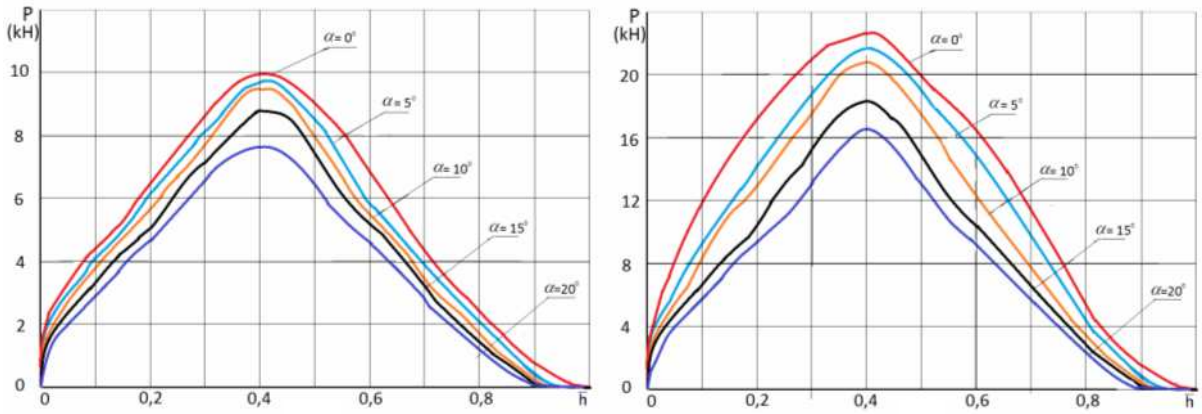


Рис. 1. Схема процесса отбортовки

Установлены картины распределения интенсивностей напряжений и деформаций в полученных изделиях, оценены силовые режимы изотермической отбортовки.

На рис. 2 представлены графические зависимости изменения силы P от относительного перемещения инструмента $\bar{h} = h / h_k$ при изотермической отбортовке отверстий, где h и h_k - текущее и конечное перемещение пуансона.

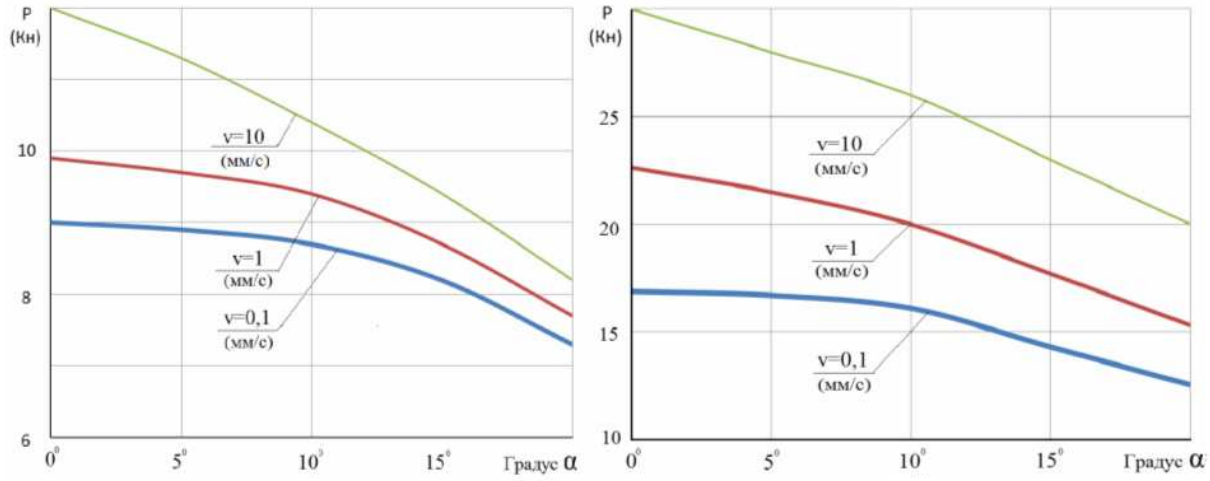


а ***б***

Рис. 2. Графические зависимости P от $\bar{h}$ при отбортовке заготовок: а - сплав АА1050; б - сплав ВТ6 ($v = 0{,}1 мм/с$; $K_o = 1{,}7$; $\mu = 0{,}1$)

Показано, что операция отбортовки происходит за несколько последовательных этапов. Первый этап характеризуется входом пуансона в часть заготовки и деформированием половины её донной части, что сопровождается существенным ростом силы. На втором этапе операции осуществляется формоизменение всей донной части заготовки под пуансоном и образование стенки. Максимальных значений сила операции достигает на втором этапе. Третий заключительный этап деформирования оставшейся донной части заготовки сопровождается снижением силы.

На рис. 3 представлены графические зависимости изменения силы P от угла наклона фланца α для алюминиевого сплава АА1050 и титанового сплава ВТ6.



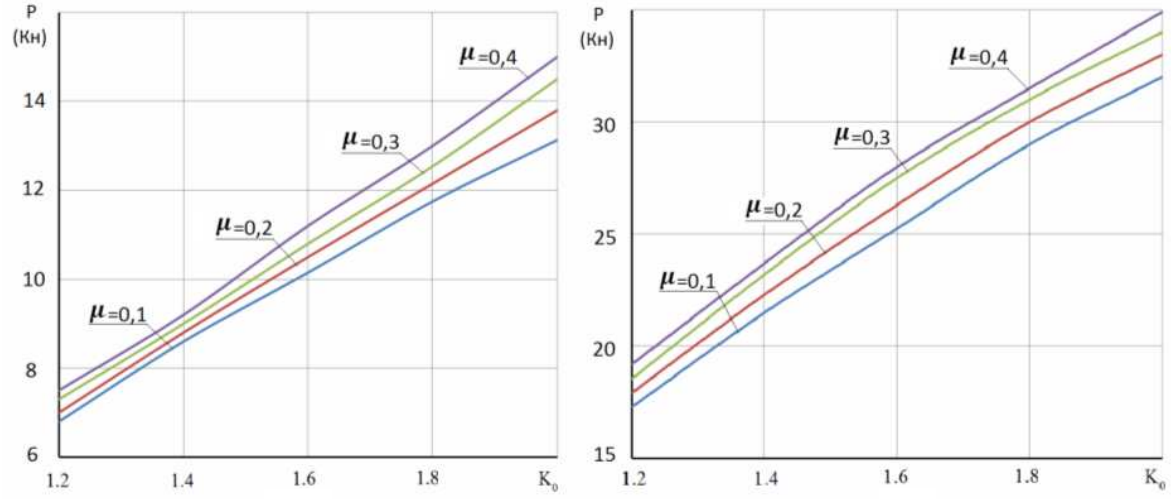
а ***б***

Рис. 3. Графические зависимости P от α при отбортовке заготовок: а - сплав АА1050; б - сплав ВТ6 ($K_o = 1{,}7$; $\mu = 0{,}1$)

Анализ графических зависимостей показывает, что с увеличением угла наклона фланца α от 0° до 20° сила отбортовки уменьшается на 20...30% для алюминиевого сплава АА1050 и на 35...50% для титанового сплава ВТ6. При увеличении скорости перемещения инструмента V от 0,1 до 10 мм/с P возрастает на 10-35% для алюминиевого и на 35...45% для титанового сплавов.

Оценено влияние на максимальную силу отбортовки P коэффициента отбортовки $K_o = D/d$ и коэффициента трения на контактных границах инструмента и заготовки μ (рис. 4).

Анализ графических зависимостей показывает, что с увеличением коэффициента K_o от 1,2 до 2 сила отбортовки возрастает в 1,9-2 раза для алюминиевого сплава АА1050 и в 1,7-1,9 раза для титанового сплава ВТ6. Установлено, что с увеличением коэффициента трения μ от 0,1 до 0,4 сила отбортовки возрастает на 10-20% для алюминиевого сплава АА1050 и на 10...15% для титанового сплава ВТ6.



а ***б***

Рис. 4. Графические зависимости P от K_o при отбортовке заготовок: а - сплав АА1050; б - сплав ВТ6 ($\alpha = 10^\circ$; $v = 0{,}1$ мм/с)

Сравнение результатов расчета в программном комплексе QFORM 2D/3D с данными, полученными верхнеграничным решением [3], показывает их качественное согласование. При этом результаты верхней оценки силы превышают результаты расчета в QFORM 2D/3D на 20-30%.

Выводы.

1. Показано, что использование программного комплекса QFORM 2D/3D позволяет произвести моделирование изотермической отбортовки заготовок с наклонным фланцем в режиме вязко-пластического течения материала.

2. Установлены зависимости силы изотермической отбортовки от технологических параметров и геометрических характеристик заготовки: скорости перемещения инструмента, условий трения, степени деформации, угла наклона фланца.

Полученные результаты могут быть использованы при проектировании технологических процессов изотермического деформирования алюминиевых и титановых сплавов в условиях вязко-пластического течения для назначения рациональных режимов деформирования.

Список литературы

1. Чудин В.Н., Яковлев С.С., Корнюшина М.В. Математическая модель операции отбортовки отверстия в листовых анизотропных заготовках в режиме кратковременной ползучести // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2013. Вып. 4. С. 66-77.

2. Изотермическое деформирование высокопрочных анизотропных материалов / С.П. Яковлев [и др.]. М.: Машиностроение, 2004. 427 с.

3. Черняев А.В., Чудин В.Н., Корнюшина М.В. Силовые режимы изотермической отбортовки отверстий в листовых анизотропных заготовках // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2014. Вып. 10. Ч. 1. С. 173-177.

Черняев Алексей Владимирович, д-р техн. наук, проф, mpf-tula@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

До Ань Ту, магистрант, doanhtu91.ru@gmail.com, Россия, Тула, Тульский государственный университет.

MODELLING OF OPERATION ISOTHERMAL FLANGING OF HOLES IN THE WORKPICES WITH THE INCLINED FLANGE

A.V. Chernyaev, A.T. Do

The results of theoretical studies of isothermal operation flanging holes in workpieces with inclined flange finite element method based on software complex QFORM 2D/3D are given. The dependences of the flanging force of technological parameters with visco-plastic flow of material are rated.

Key words: simulation, viscosity, short-term creep, flanging, finite element method, power modes.

Chernyaev Aleksey Vladimirovich, doctor of technical sciences, professor, mpf-tula@rambler.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Do Anh Tu, magistrant, doanhtu91.ru@gmail.com, Russia, Tula, Tula State University

УДК 621.7.01

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ИНТЕНСИВНОСТИ НАПРЯЖЕНИЯ ОТ СТЕПЕНИ И СКОРОСТИ ДЕФОРМАЦИИ ОБРАЗЦА ИЗ МЕТАЛЛА ПРИ РАСТЯЖЕНИИ С ПОВЫШЕННОЙ ТЕМПЕРАТУРОЙ

С.Н. Ларин, В.А. Лазарев, В.А. Коротков, В.И. Платонов

В настоящее время перед машиностроительным производством стоит необходимость широкого внедрения принципиально новых технологий, позволяющих повысить производительность труда, снизить энергоматериалоемкость производства, обеспечить высокое качество получаемых изделий. Создание новой техники, отдельные узлы которой работают в условиях агрессивных сред, высоких давлений и температур, связано с использованием труднодеформируемых, малопластичных материалов. Значительное количество деталей аэрокосмической техники изготавливается из листовых малопластичных, труднодеформируемых сплавов, которые обрабатываются в режимах медленного горячего деформирования. Для определения оптимальных режимов медленного горячего деформирования необходимо знать вязкопластическое состояние новых материалов и сплавов, а именно зависимости интенсивности напряжения от степени и скорости деформации. Для этого разработаны методы испытания на растяжение.

Ключевые слова: испытание, растяжение, напряжение, деформация, температура.

Испытание на растяжение образцов вязкопластического деформирования с повышенной температурой нагрева регламентируется ГОСТ 9651-84 «Методы испытаний на растяжение при повышенных температурах», при использовании которого определяют основные механические и пластические свойства металла: предел текучести физический, предел текучести условный, временное сопротивление, относительное равномерное удлинение, относительное удлинение после разрыва, относительное сужение поперечного сечения после разрыва. В частности рекомендуется определять механические и пластические характеристики исследуемого металла поэтапно при скоростях деформации в диапазоне значений $2{,}5*10^{-4}…2{,}5*10^{-3}$ $с^{-1}$ и одинаковой скорости деформирования. Таким образом, при растяжении образца исследуются его механические свойства без учёта влияния вязкой составляющей материала и не устанавливается зависимость интенсивности напряжения от степени и скорости деформации при фиксированных высоких температурах нагрева.

Для определения зависимости интенсивности напряжения от степени и скорости деформации металла при испытания образца на растяжение с повышенной температурой нагрева, учитывающей, как пластическую, так и вязкую составляющую механических свойств материала необходимо проводить растяжение образцов при одинаковой температуре нагрева, но

разных скоростях деформирования. В соответствии с требованиями ГОСТ 9651-84 были изготовлены образцы на растяжение из алюминиевого сплава АМг6М. Перед началом испытания на растяжение на образце через 5 или 10 мм наносились поперечные риски и измерялись начальные размеры поперечных сечений вдоль каждой риски. Образец закреплялся в захватных устройствах испытательной машины INSTRON 5982 внутри нагревательного устройства. К поверхности образца на участке его рабочей длины подводились термопары, которые непрерывно контактировали с образцом в процессе растяжения. После нагрева и выдержки при температуре нагрева 420°С, включалась испытательная машина, и производилось растяжение образца при постоянных скоростях перемещения захватного устройства V_1=1 мм/мин; V_2 =5 мм/мин и V_3 =10 мм/мин с записью диаграмм «нагрузка-перемещение». После растяжения до разрушения с записью диаграмм «нагрузка-перемещение» в местах нанесения поперечных рисок в области равномерных деформаций измерялись конечные размеры по толщине и ширине, рассчитывались логарифмические деформации и площадь поперечных сечений. Полученные диаграммы «нагрузка-перемещение» разбивали на интервалы. На каждом интервале определяли нагрузку и рассчитывали деформацию удлинения в области рассматриваемого поперечного сечения. Результаты измерений и расчётов приведены в табл. 1.

По результатам испытаний и расчётам была проведена статистическая обработка и получены уравнения регрессии соответственно для скоростей перемещения V_1, V_2, V_3.

$$\left.\begin{aligned} \sigma_i &= -23{,}412\varepsilon^2 + 8{,}5179\varepsilon + 9{,}649 \\ \sigma_i &= -86{,}9887\varepsilon^2 + 29{,}4982\varepsilon + 17{,}8017 \\ \sigma_i &= -138{,}0796\varepsilon^2 + 44{,}2662\varepsilon + 21{,}584 \end{aligned}\right|, \qquad (1)$$

где σ_i и ε - соответственно интенсивность напряжений и деформации при заданных скоростях перемещения захватного устройства испытательной машины. Для определения зависимости интенсивности напряжения от скорости деформации или скорости перемещения захватного устройства испытательной машины проводились расчёты по определению интенсивности напряжения при фиксированных значениях степеней деформаций. Таким образом, устанавливалось влияние скорости деформации или скорости перемещения захватного устройства испытательной машины на величину интенсивности деформации.

Для снижения трудоёмкости испытания на растяжение образцов при повышенных температурах исследовалась возможность определения интенсивности напряжений от интенсивности деформаций в зависимости от скорости деформации по испытанию одного образца. Для этого образцы из алюминиевого сплава АМг6М нагретые до 420°С растягивали не с по-

стоянной скоростью перемещения, а с циклическим изменением скорости перемещения захватного устройства испытательной машины 1 мм/мин, 5 мм/мин и 10 мм/мин в интервале удлинения 5…10% от общего удлинения. Была получена пилообразная диаграмм «нагрузка-перемещение» (рис. 1) с числом циклов шесть.

Таблица 1

Результаты обработки диаграмм «нагрузка-перемещение» при растяжении образцов из алюминиевого сплава АМГ6М при температуре нагрева 420°С со скоростями перемещения захватных органов испытательной машины 1 мм/мин, 5 мм/мин, 10 мм/мин

Образец 1, скорость 1 мм/мин, температура 420°С, угол вырезки 90°, скорость деформации 3,23*10^{-4}									
№ Сеч	№ этапа	Площадь 1, мм^2	Площадь 2, мм^2	Перемещение на графике	Деформация		Напряжения, н/мм^2		Нагрузка, кН
					Сечение 1	Сечение 2	Сечение 1	Сечение 2	
	0	8,9951	9,0056	0					
	1	7.8622	7.9980	42	0.1346	0.1187	10.43	10.25	82.0
1	2	6.9460	7.1587	86	0.2585	0.2295	10.36	10.05	71.94
	3	6.2509	6.5069	128	0.3640	0.3250	10.16	9.76	63.48
	4	5.6820	5.9640	170	0.4594	0.4121	9.50	9.05	53.96
	5	5.1977	5.4946	213	0.5485	0.4941	8.04	7.61	41.79
	6	4.7808	5.0850	257	0.6321	0.5715	6.86	6.45	32.80
2	7	4.4333	4.7398	300	0.7075	0.6419	3.94	3.68	17.46
	8	4,1414	4,4479	342	0.7761	0.7061	3.19	2.97	13.23
Образец 2, скорость 5 мм/мин, температура 420°С, угол вырезки 90°, скорость деформации 1,435*10^{-3}									
№ Сеч	№ этапа	Площадь 2	Площадь 3	Перемещение на графике	Деформация		Напряжения, н/мм^2		Нагрузка, кН
					Сечение 2	Сечение 3	Сечение 2	Сечение 3	
	0	8,9344	8,9453						
	1	8.0244	8.3883	54	0.1074	0.0643	20.19	19.31	162
2	2	7.2952	7.9050	107	0.2027	0.1236	19.99	18.44	145.8
	3	6.6874	7.4743	160	0.2897	0.1797	18.57	16.62	124.2
	4	6.1642	7.0815	214	0.3714	0.2337	16.99	14.79	104.76
	5	5.7169	6.7278	268	0.4465	0.2849	14.36	12.20	82.08
3	6	5.3155	6,4021	322	0.5165	0.3337	9.34	7.76	49.68
Образец 3, скорость 10 мм/мин, температура 420°С, угол вырезки 90°, скорость деформации 2,116*10^{-3}									
№ Сеч	№ этапа	Площадь 1	Площадь 2	Перемещение на графике	Деформация		Напряжения, н/мм^2		Нагрузка, кН
					Сечение 1	Сечение 2	Сечение 1	Сечение 2	
	0	8,9362	8,9344						
	1	8.361	8.0230	80	0.0665	0.1076	23.92	24.93	200
1	2	7.8491	7.2720	161	0.1297	0.2059	22.59	24.38	177.30
	3	7.4018	6.6565	241	0.1884	0.2943	20.54	22.83	152
	4	6.9983	6.1312	322	0.2445	0.3765	16.76	19.13	117.3
2	5	6,7735	5,8554	371	0.2769	0.4231	13.18	15.25	89.3

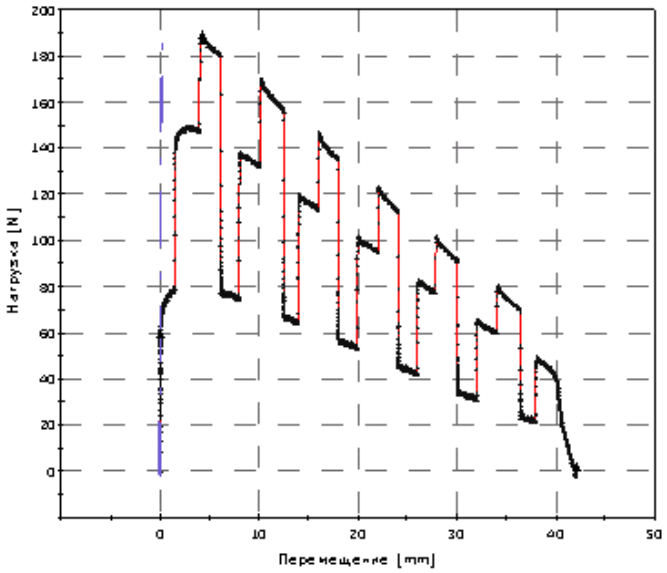


Рис. 1. Диаграмма «нагрузка-перемещение», полученная по результатам испытания на растяжение образца из сплава АМг6М с изменением скорости в процессе растяжения при заданной температуре нагрева 420°С: V_1***=1мм/мин;*** V_2 ***=5мм/мин;*** V_3 ***=10мм/мин***

Проводилась обработка диаграммы «нагрузка-перемещение», в которой кривыми линиями соединяли соответствующие вершины выступов с получением диаграмм «нагрузка-перемещение» при растяжении со скоростями перемещения захватного устройства соответствующих значениям V_1, V_2, V_3 и т.д. Таким образом, при растяжении одного образца при заданной температуре нагрева с переключением испытательной машины в процессе растяжения на различные скорости перемещения захватного устройства V_1, V_2, V_3 и т.д. получались одновременно три диаграммы «нагрузка-перемещение» (рис.2).

Результаты обработки диаграмм (рис. 2) «нагрузка-перемещение» при растяжении одного образца с графиками нагрузка-перемещение 1, 2, 3 и скоростями перемещения захватного устройства испытательной машины соответственно 1 мм/мин, 5 мм/мин, 10 мм/мин приведены в табл. 2.

На рис. 3 представлены графики зависимости интенсивности напряжений от деформации при скоростях деформации ξ=3,77*10^{-3}(рис. 3, а); ξ=1,88*10^{-3} (рис. 3, б); ξ=3,77*10^{-4}(рис. 3, в). После статистической обработки были получены уравнения регрессии для скоростей перемещения, соответственно 1 мм/мин, 5 мм/мин, 10 мм/мин.

$$\left.\begin{aligned} \sigma_i &= -20{,}7964\varepsilon^2 + 13{,}9511\varepsilon + 8{,}4916 \\ \sigma_i &= -31{,}296\varepsilon^2 + 22{,}1707\varepsilon + 16{,}4407 \\ \sigma_i &= -36{,}3371\varepsilon^2 + 25{,}8429\varepsilon + 20{,}9738 \end{aligned}\right| . \qquad (2)$$

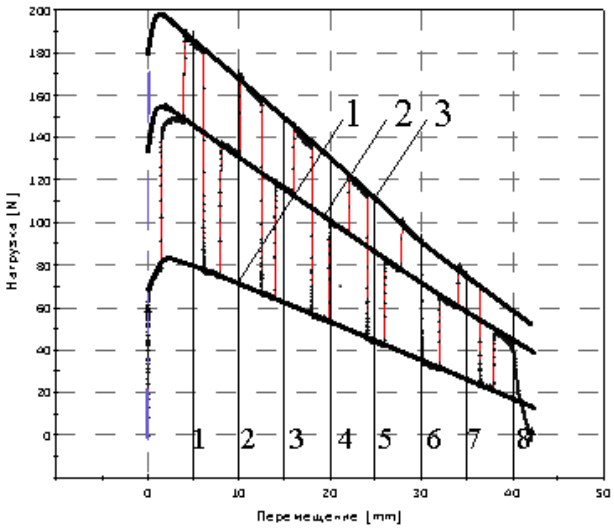


Рис. 2. Обработка "пилообразной" диаграммы «нагрузка-перемещение», где 1 - 1 мм/мин, 2 - 5 мм/мин, 3 - 10 мм/мин соответствует скорости перемещения захватного органа

Таблица 2

Результаты обработки диаграмм «нагрузка-перемещение» при растяжении образцов из алюминиевого сплава АМГ6М при температуре нагрева 420°С с переключением скоростей перемещения захватных органов испытательной машины 1 мм/мин, 5 мм/мин, 10 мм/мин в процессе растяжения одного образца (во 2-м сечении)

№ этапа	Площадь, мм^2		Нагрузка, кН			Деформация		Напряжения, н/мм^2					
								Сечение 1			Сечение 2		
	1	2	1	2	3	Сеч.1	Сеч.2	Ск.1	Ск5	Ск. 10	Ск.1	Ск5	Ск. 10
0	8.8690	8.8781											
1	7.6070	7.5130	78.33	147	184.37	0.1535	0.1669	10.30	19.32	24.24	10.43	19.57	24.54
2	6.6594	6.5122	69.9	131.35	166.3	0.2865	0.3099	10.50	19.72	24.97	10.73	20.17	25.54
3	5.9217	5.7463	61.46	116.89	147	0.4039	0.4350	10.38	19.74	24.82	10.70	20.34	25.58
4	5.3009	5.1112	51.82	101.22	127.73	0.5147	0.5521	9.78	19.09	24.10	10.14	19.80	24.99
5	4.8478	4.6524	44.59	87.97	109.66	0.6040	0.6462	9.20	18.15	22.62	9.58	18.91	23.57
6	4.4237	4.2271	34.95	71.10	91.60	0.6956	0.7421	7.90	16.07	20.71	8.27	16.82	21.67
7	4.0856	3.8907	25.31	56.64	74.71	0.7751	0.8250	6.19	13.86	18.29	6.51	14.57	19.20
8	3.7881	3.5944	15.67	41	54.23	0.8507	0.9042	4.14	10.82	14.32	4.36	11.41	15.09

После статистической обработки полученных уравнений регрессии с учётом влияния степени и скорости деформации на интенсивность напряжения было получено уравнение

$$\sigma_i = 6{,}7095[0{,}7951(5{,}3536 + \ln\xi) + 0{,}7682\varepsilon(6{,}4927 + \ln\xi) -$$

$$-\varepsilon^2(6{,}8787 + \ln\xi)\,. \qquad (3)$$

Кроме снижения трудоёмкости испытания на растяжение повышалась точность эксперимента благодаря тому, что температура испытания для переменных скоростей перемещения захватного устройства одна и та же, соответствующая температуре нагрева одного образца, тогда как при раздельном испытании нескольких образцов обеспечить одинаковую температуру нагрева в разных образцах затруднительно. Дальнейшая обработка результатов эксперимента по вышеприведённой методике позволяет по испытанию на растяжение одного образца определить экспериментально зависимость интенсивности напряжения не только от степени деформации, но и от скорости деформации или скорости перемещения захватного устройства испытательной машины. Полученная закономерность изменения интенсивности напряжения от степени и скорости деформации позволяет более обоснованно определять режимы изотермической штамповки листовых металлов.

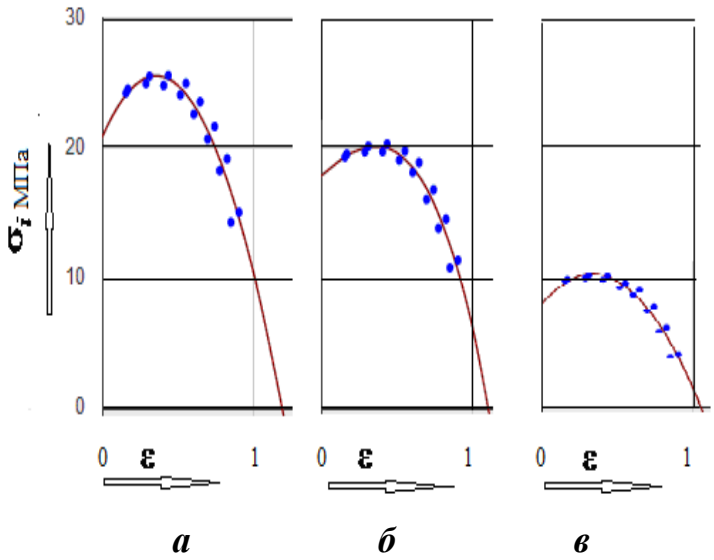


Рис. 3. Экспериментальные графики зависимости интенсивности напряжения σ_i от степени деформации ε при фиксированной скорости перемещения захватного устройства испытательной машины: а - $\xi=3{,}77*10^{-3}$, б - $\xi=1{,}88*10^{-3}$, в - $\xi=3{,}77*10^{-4}$

Сравнение значений интенсивности напряжения σ_i от деформаций ε и скоростей деформаций ξ показало, что погрешность не превышает 5%.

Выводы:

1. Предлагаемая методика и способ определения интенсивности напряжения от деформации и скорости деформации образца из металла при растяжении с повышенной температурой значительно уменьшает трудоёмкость испытания (в рассматриваемом примере в три раза).

2. Повышение точности результатов исследований достигается благодаря тому, что испытывается один образец при заданной температуре нагрева в процессе переключения скоростей перемещения захватных органов испытательной машины, тогда как при раздельном растяжении образцов одинаковый температурный режим нагрева затруднителен.

Работа выполнена в рамках базовой части государственного задания №2014/227 на выполнение научно-исследовательских работ Министерства образования и науки Российской Федерации на 2014-2020 годы, грантов РФФИ № № 16-48-710016 и 16-08-00020 и грантов правительства Тульской области ДС 48.

Список литературы

1. Яковлев С.П., Чудин В.Н., Яковлев С.С., Соболев Я.А. Изотермическое деформирование высокопрочных анизотропных металлов. М., Тула: Машиностроение-1; Изд-во ТулГУ, 2004. 427 с.

2. Малинин Н.Н. Ползучесть в обработке металлов. М.: Машиностроение, 1986. 216 с.

3. Теория обработки металлов давлением: учебник для вузов / В.А. Голенков, С.П. Яковлев, С.А. Головин, С.С. Яковлев, В.Д. Кухарь / под ред. В.А. Голенкова, С.П. Яковлева. М.: Машиностроение, 2009. 442 с.

Ларин Сергей Николаевич, д-р техн. наук, проф., mpf-tula@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Лазарев Виталий Александрович, mpf-tula@rambler.ru, Россия, Королев, АО «Корпорация «Тактическое ракетное вооружение»»,

Коротков Виктор Анатолиевич, канд. техн. наук, с.н.с., mpf-tula@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Платонов Валерий Иванович, канд. техн. наук, доц., mpf-tula@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

DEFINITION OF VOLTAGE DEPENDENCE OF INTENSITY OF DEGREES AND STRAIN RATE SAMPLE OF METAL IN TENSION WITH INCREASING TEMPERATURE

S.N. Larin, V.V. Lazarev, V.A. Korotkov, V.I. Platonov

At present, the machine-building production is the need for the widespread introduction of innovative technologies to improve productivity, reduce production energomaterialoemkost, providing high-quality of the products. Creation of new techniques, the individual components which work in aggressive environments, high temperatures and pressures associated with the use of hard-to, low ductility materials. A significant number of aerospace parts are made from sheet maloplastichnyh, hard-alloys, which are processed in the mode of slow hot deformation. To determine the optimal mode of slow hot deformation must know viscoplastic state of new materials and alloys, namely, depending on the degree of intensity of stress and strain rate. To this end, developed test methods in tension.

Key words: test, tension, stress, strain, temperature.

Larin Sergey Nikolaevich, doctor of technical sciences, professor, mpf-tula@rambler.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Lazarev Vitaliy Aleksandovich, mpf-tula@rambler.ru, Russia, Korolev, Tactical Missiles Corporation,

Korotkov Viktor Anatolievich, candidate of technical sciences, mpf-tula@rambler.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Platonov Valeriy Ivanovich, candidate of technical sciences, docent, mpf-tula@rambler.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 621.983:539.974

ИССЛЕДОВАНИЕ СИЛОВЫХ РЕЖИМОВ И ПРЕДЕЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ОТБОРТОВКЕ В РЕЖИМЕ КРАТКОВРЕМЕННОЙ ПОЛЗУЧЕСТИ

С.Н. Ларин, А.А. Пасынков, Г.А. Нуждин

Представлено продолжение исследований изотермической отбортовки в режиме кратковременной ползучести заготовок из высокопрочных материалов, основанных на верхнеграничной теореме пластичности. Получены зависимости влияния технологических параметров процесса на силовые режимы и предельные возможности формоизменения. Полученные результаты пригодятся при проектировании технологических процессов изотермической отбортовки в режиме кратковременной ползучести и конструировании инструментальной оснастки. Исследования выполнены на базе метода конечных элементов.

Ключевые слова: отбортовка, кратковременная ползучесть, сила, напряжения, формоизменение.

В данной работе представлены результаты исследования, основанного на базе метода конечных элементов процесса отбортовки листовых изделий из высокопрочных материалов в изотермических условиях. Схема рассматриваемой операции приведена на рис. 1.

Исследования выполнены в среде программного комплекса Qform 2D/3D для титанового ВТ6С ($\sigma_T = 210\,МПа$; $\sigma_в = 340\,МПа$; $П = 750\,МПа$) сплава. Расчеты выполнены при следующих геометрических характеристиках заготовки: $s = 1, 2, 4$ мм; различных коэффициентах трения $\mu = 0{,}1;\ 0{,}4;\ 0{,}8$ и скоростях деформирования $V = 0{,}01...1\,мм/с$.

На рис. 2 приведены 3D модели заготовки и инструмента. Предполагалось, что деформирование производится на гидравлическом прессе силой 50 МН при постоянной температуре деформирования 930 °С.

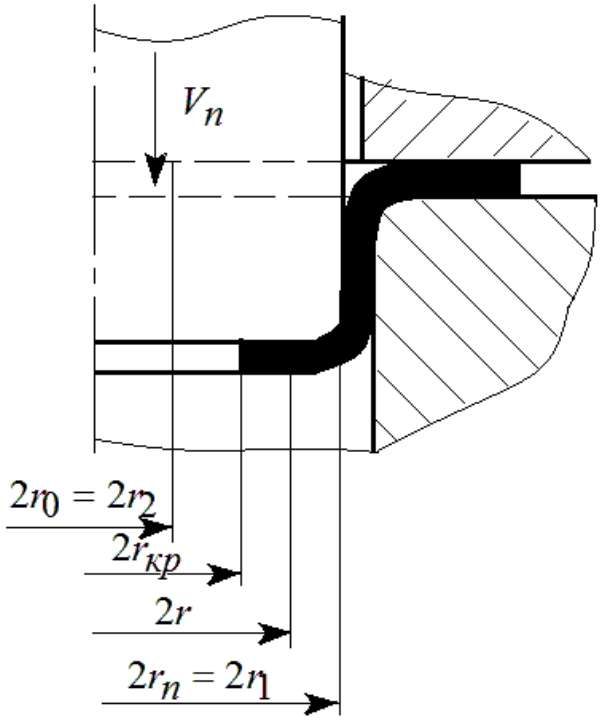


Рис. 1. Схема изотермической отбортовки

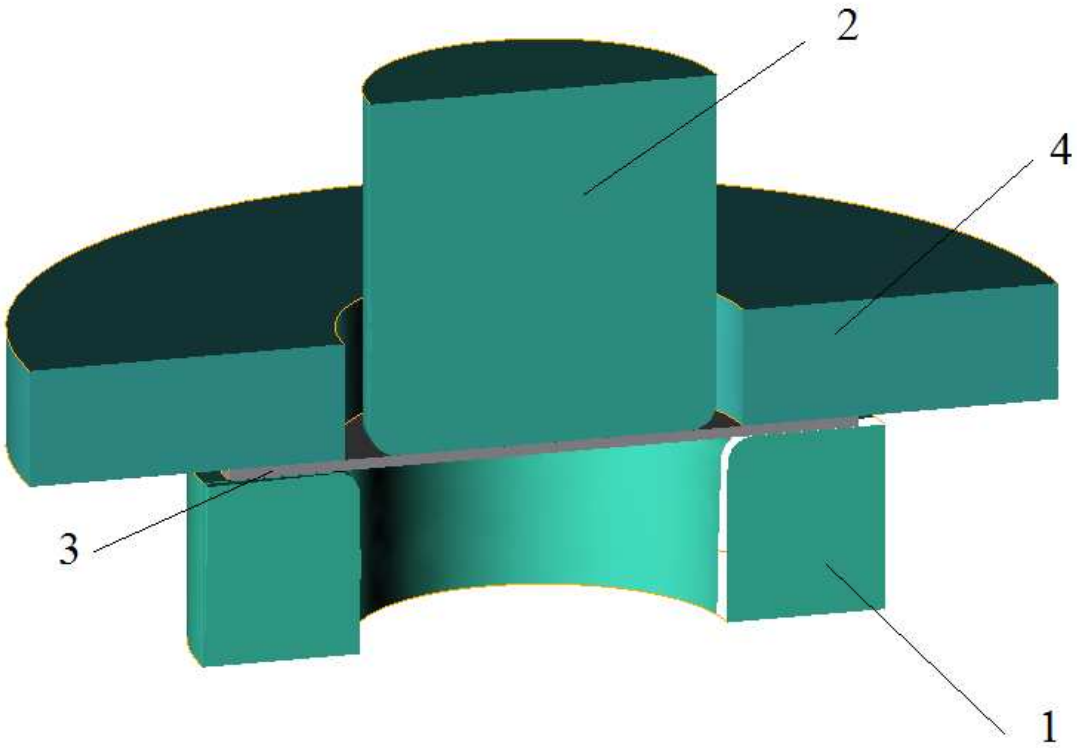
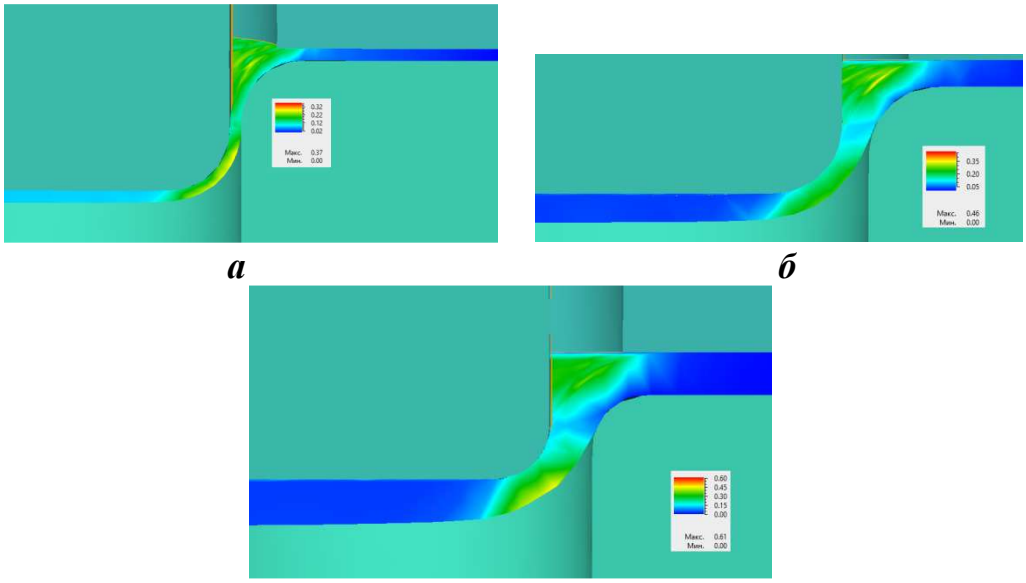


Рис. 2. 3D модели инструмента и заготовки:
1 – матрица; 2 – пуансон; 3 - заготовка

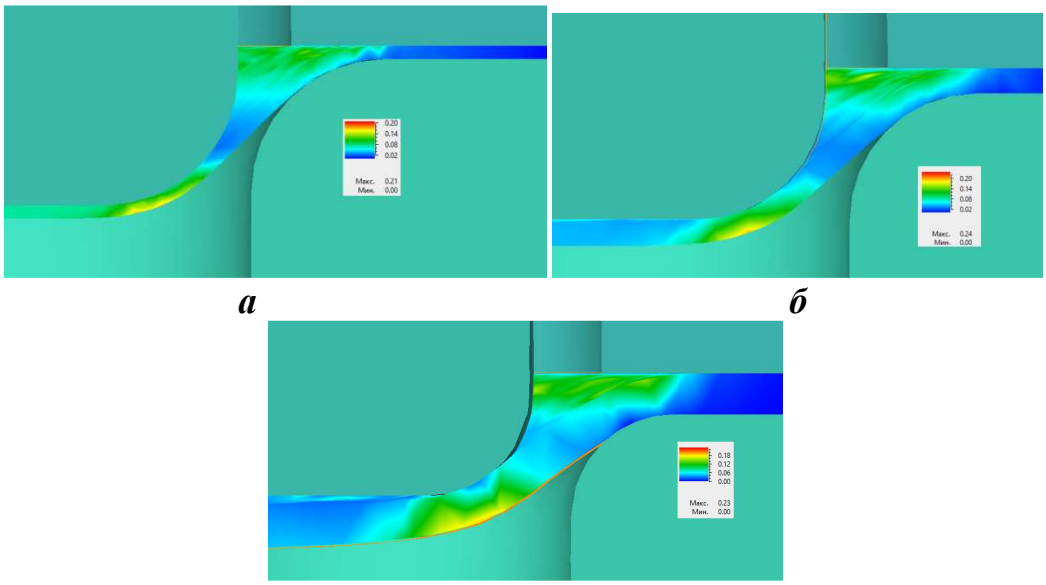
На рис. 3 - 7 представлены схемы распределения критических напряжений в заготовке для различных значений трения, скорости, толщин заготовки и радиусов закруглений пуансона. По анализу данных схем можно сделать выводы о том, что напряжения не превышают своих критических величин. Наиболее подвержены разрушению наружные части заготовки в месте перехода цилиндрической части в дно и фланец.



а ***б***

в

Рис. 3. Схема к оценке разрушения заготовки при изотермической отбортовке ***(***$\mu = 0{,}1;\ V = 0{,}1 мм/с;\ R = 5\ мм$***):а -*** $s = 1\ мм$***; б -*** $s = 2\ мм$***;***
в - $s = 4\ мм$

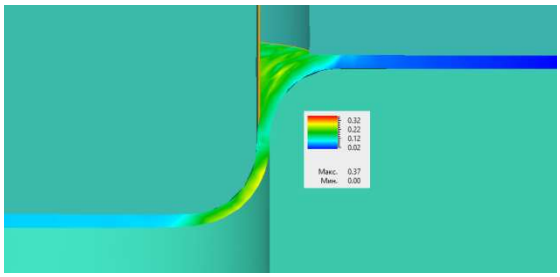


а ***б***

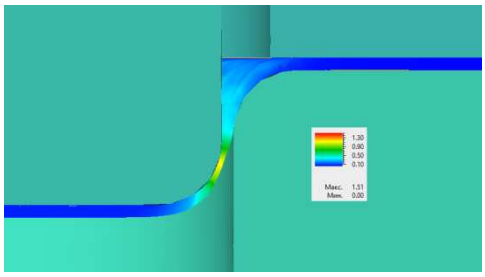
в

Рис.4. Схема к оценке разрушения заготовки при изотермической отбортовке ***(***$\mu = 0{,}1;\ V = 0{,}1 мм/с;\ R = 10 мм$***):а -*** $s = 1\ мм$***; б -*** $s = 2\ мм$***;***
в - $s = 4\ мм$

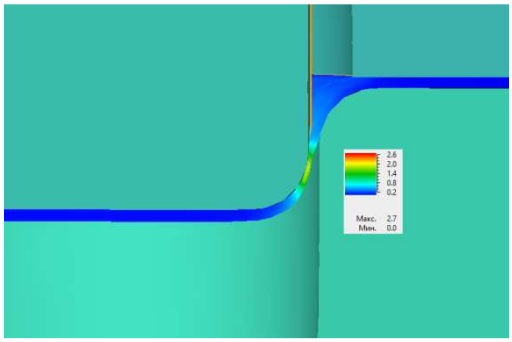
На рис. 8-10 показаны зависимости изменения критических напряжений от толщины материала заготовки, трения между инструментом и заготовкой и скорости деформирования.



а

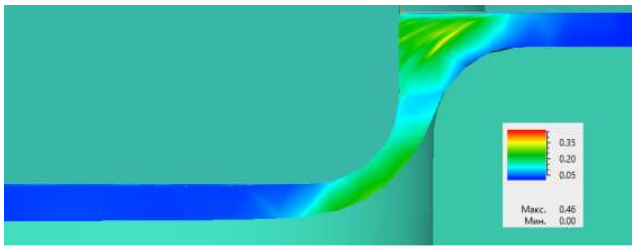


б

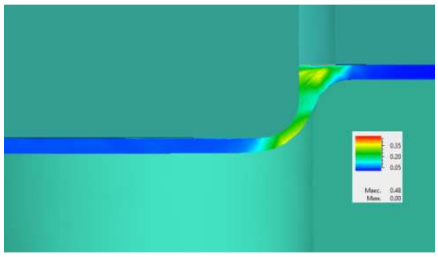


в

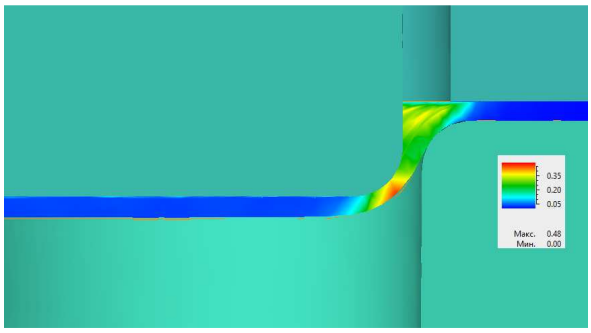
Рис. 5. Схема к оценке разрушения заготовки при изотермической отбортовке ($s = 1$ мм; $V = 0{,}1 мм/с$; $R = 5$ *мм*)***: а*** - $\mu = 0{,}15$***; б*** - $\mu = 0{,}5$ *мм*; ***в*** - $\mu = 0{,}8$ *мм*



а



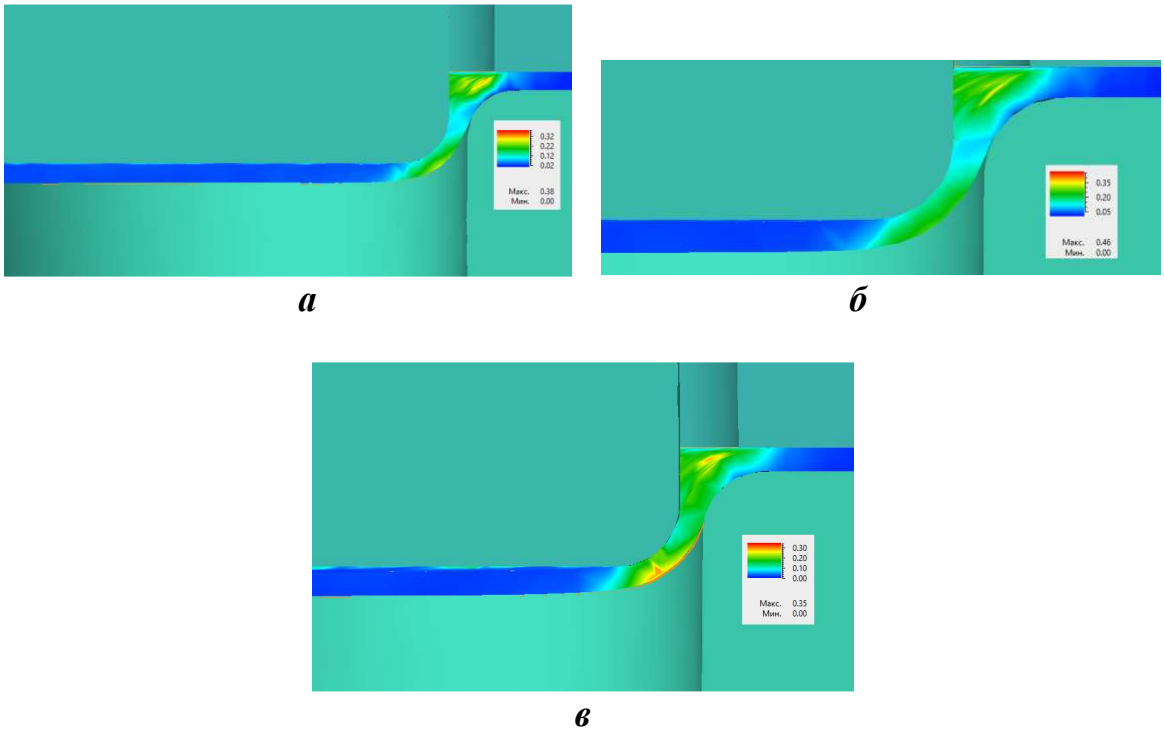
б



в

Рис. 6. Схема к оценке разрушения заготовки при изотермической отбортовке ($s = 2$ мм; $V = 0{,}1 мм/с$; $R = 5$ *мм*)***: а*** - $\mu = 0{,}15$***;***

б - $\mu = 0{,}5$ *мм*; ***в*** - $\mu = 0{,}8$ *мм*



а ***б***

в

Рис. 7. Схема к оценке разрушения заготовки при изотермической отбортовке ($s = 2$ мм; $\mu = 0{,}1$; $R = 5$ *мм*)***: а -*** $V = 0{,}01$ мм/с***;***
б - $V = 0{,}1$ мм/с***; в -*** $V = 1$ мм/с

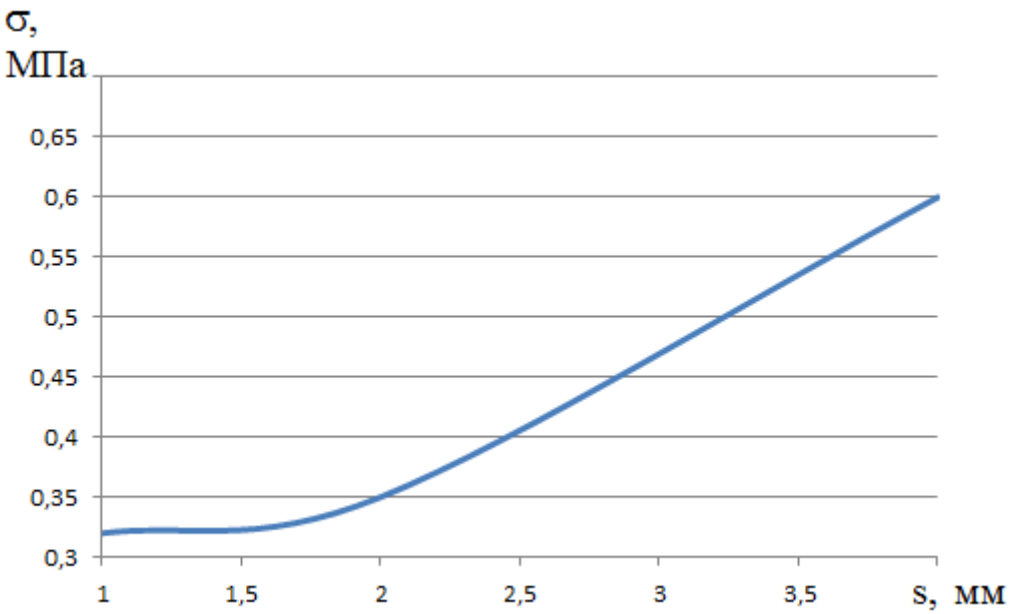


Рис. 8. Зависимость изменения критического напряжения от толщины материала заготовки
($\mu = 0{,}1$; $V = 0{,}1 мм/с$; $R = 5$ *мм)*

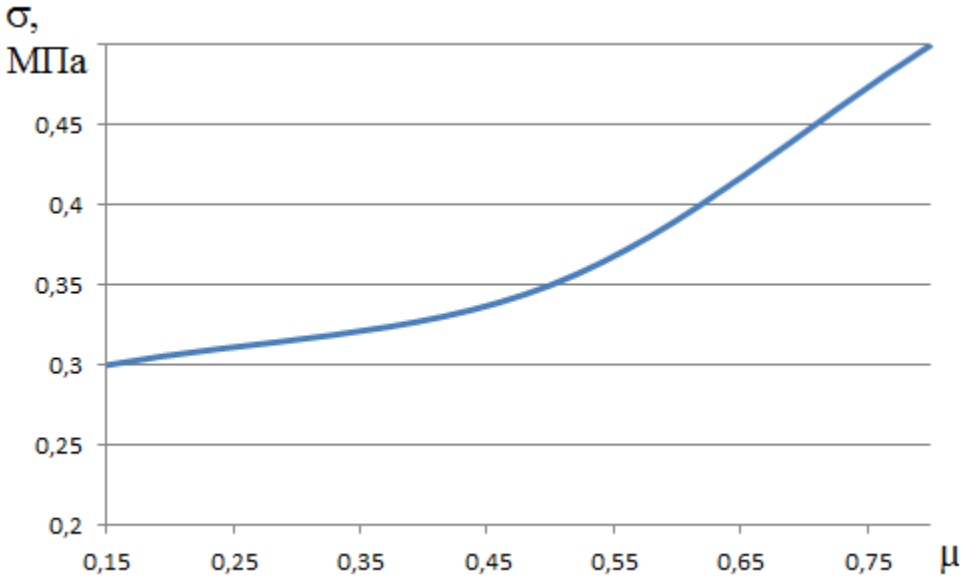


Рис. 9. Зависимость изменения критического напряжения от коэффициента трения ($s = 2$ мм; $V = 0{,}1 мм/с$; $R = 5$ *мм)*

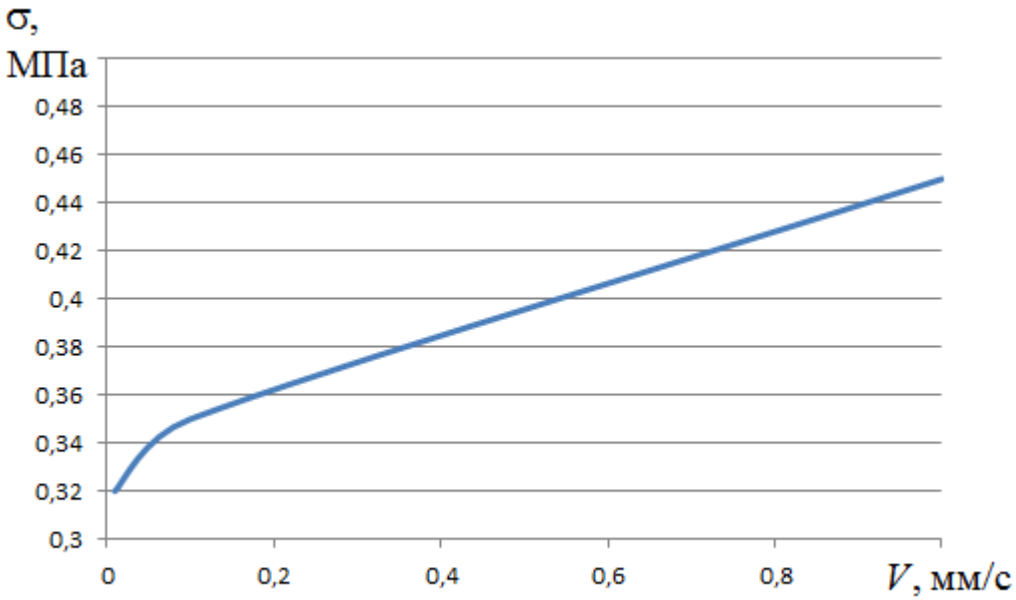


Рис. 10. Зависимость изменения критического напряжения от скорости деформирования ($s = 2$ мм; $\mu = 0{,}1$; $R = 5$ *мм)*

Из анализа приведенных выше зависимостей можно сделать следующие выводы: с увеличением трения и скорости деформирования критическое напряжение возрастает.

На рис. 11-14 представлены графические зависимости изменения силы процесса от трения, скорости деформирования, толщины заготовки и радиуса закругления матрицы, основанные на широком круге исследований, проведенных в программном комплексе QFORM 3D.

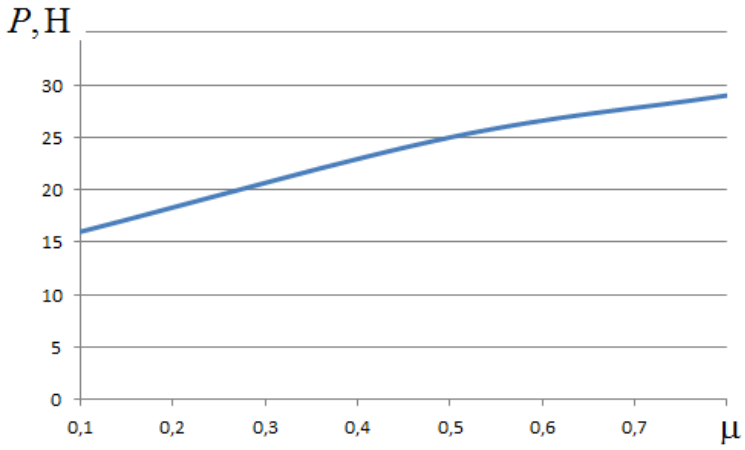


Рис. 11. Зависимость силы отбортовки от трения ***(*** $s = 2$ мм; $V = 0{,}1$ мм/с; $R = 5$ *мм****)***

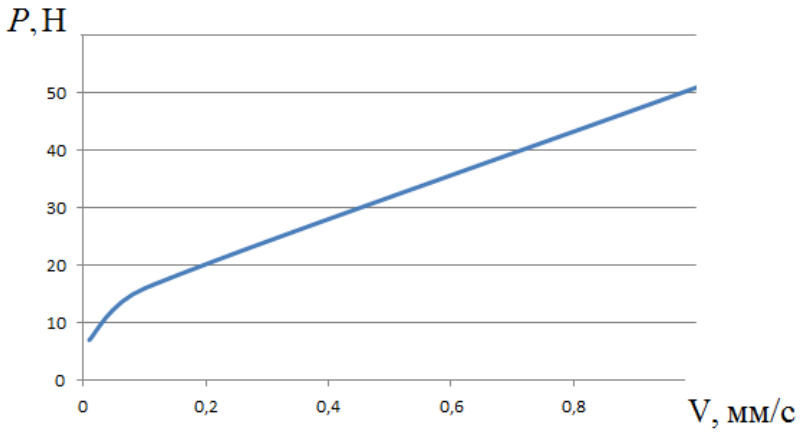


Рис. 12. Зависимость силы отбортовки от скорости перемещения инструмента ($s = 2$ мм; $\mu = 0{,}1$; $R = 5$ *мм****)***

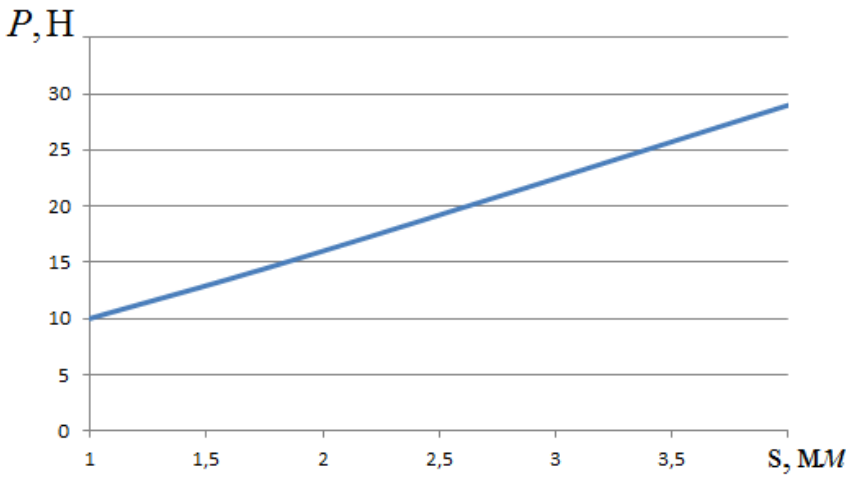


Рис. 13. Зависимость силы отбортовки от толщины заготовки ***(*** $V = 0{,}1$ мм/с; $\mu = 0{,}1$; $R = 5$ *мм****)***

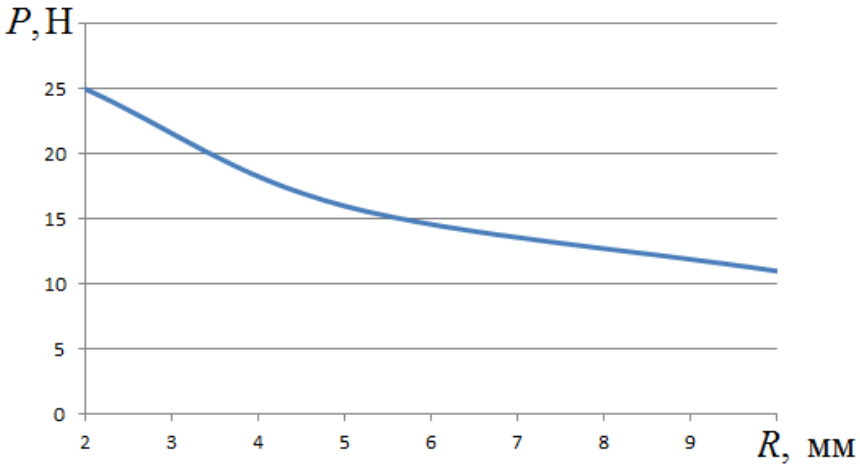


Рис. 14. Зависимость силы отбортовки от радиуса закругления матрицы ($V = 0{,}1$ мм/с; $\mu = 0{,}1$; $s = 2$ *мм)*

Установлено, что с увеличением коэффициента трения, скорости перемещения пуансона, толщины заготовки и уменьшением радиуса закругления матрицы сила деформирования растет.

Полученные результаты хорошо согласуются экспериментальными данными и данными полученными на основе верхнеграничной теоремы пластичности. Их можно использовать при проектировании технологических процессов изотермической отбортовки.

Работа выполнена в рамках грантов РФФИ 14-08-00066 а и гранта правительства Тульской области ДС/128.

Список литературы

1. Изотермическое формоизменение анизотропных материалов жестким инструментом в режиме кратковременной ползучести / С.С. Яковлев, С.П. Яковлев, В.Н. Чудин, В.И. Трегубов, А.В. Черняев. М.: Машиностроение, 2009. 412 с.

2. Малинин Н.Н. Ползучесть в обработке металлов. М.: Машиностроение, 1986. 216 с.

3. Романов К.И. Механика горячего формоизменения. М.: Машиностроение. 1993. 240 с.

4. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением. УПИ, 2001. 836 с.

5. Теория обработки металлов давлением: учебник для вузов / В.А. Голенков, С.П. Яковлев, С.А. Головин, С.С. Яковлев, В.Д. Кухарь / под ред. В.А. Голенкова, С.П. Яковлева. М.: Машиностроение, 2009. 442 с.

Ларин Сергей Николаевич, д-р техн. наук, проф., mpf-tula@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Пасынков Андрей Александрович, канд. техн. наук, доц., mpf-tula@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Нуждин Георгий Анатолиевич, mpf-tula@rambler.ru, Россия, Москва, Орган по сертификации систем качества «Консерсиум»

STUDY OF POWER MODE AND LIMITING PARAMETERS IN ISOTHERMAL FLANGING MODE SHORT-TERM CREEP

S.N. Larin, A.A. Pasynkov, G.A. Nuzhdin

Continuation of researches of an isothermal otbortovka in the mode of short-term creep of procurements from the high-strength materials based on the verkhnegranichny theorem of plasticity is provided. Dependences of influence of technological process parameters on the power modes and limiting opportunities of forming are received. The received results will be useful when designing engineering procedures of an isothermal otbortovka in the mode of short-term creep and designing of the tool equipment. Researches are executed based on a finite-element method.

Key words: flange, short-term creep strength, voltage, forming.

Larin Sergey Nikolaevich, doctor of technical sciences, professor, mpf-tula@rambler.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Pasynkov Andrey Aleksandrovich, candidate of technical sciences, docent, mpf-tula@rambler.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Nuzhdin Georgiy Anatolievich, mpf-tula@rambler.ru, Russia, Moscow, organ by quality system certification "Konsersium"

УДК 621.983:539.974

ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ ВЫСАДКЕ ТРУБНЫХ ЗАГОТОВОК ИЗ ВЫСОКОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ

А.А. Пасынков, А.И. Серегина

Представлены результаты теоретических исследований напряженного и деформированного состояния заготовок при раздаче трубных заготовок при регламентированных температуре и скоростях деформирования. Установлено влияние технологических параметров процесса и геометрических параметров заготовки на силовые режимы, напряженное и деформированное состояние. Исследование производились в среде программного комплекса Qform 2D/3D, основанного на базе метода конечных элементов. Сравнение полученных в статье данных с результатами теоретического анализа, основанного на базе верхнеграничной теоремы пластичности и данных экспериментов показывает удовлетворительную сходимость.

Ключевые слова: высадка, Qform 2D/3D, изотермические условия, скорость деформирования, сила, напряжения.

В данной статье представлено продолжение теоретических исследований, основанных на верхнеграничной теореме пластичности [1], изотермической раздачи концов труб из высокопрочного титанового сплава ВТ6С при регламентированных скоростях штамповки, которые будут обеспечивать условие кратковременной ползучести. Схема рассматриваемой операции приведена на рис. 1.

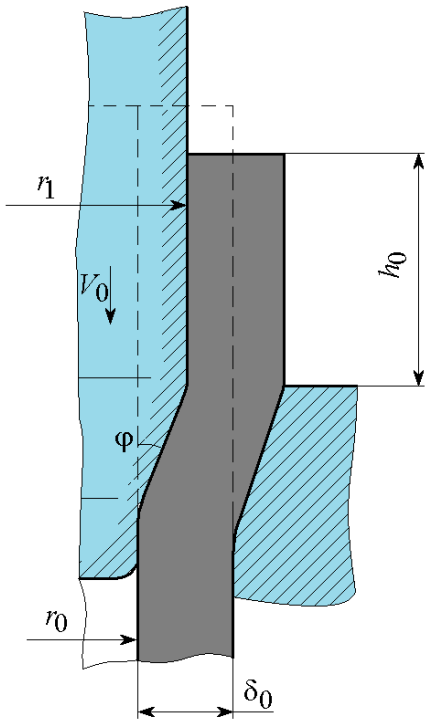


Рис. 1. Схема раздачи

Выполнены исследования влияния технологических параметров на силовые режимы операции изотермической раздачи в среде программного комплекса Qform 2D/3D. Исследования выполнены для титанового ВТ6С ($\sigma_T = 210 МПа$; $\sigma_в = 340 МПа$; $П = 750 МПа$) сплава. Расчеты выполнены при следующих геометрических характеристиках заготовки: $h = 3$ мм; $d_2 = 40; 35; 45$ мм; различных коэффициентах трения $\mu = 0{,}15;\ 0{,}4;\ 0{,}7$ и скоростях деформирования $V = 1...10\ мм/с$.

На рис. 2 приведены 3D модели заготовки и инструмента. Предполагалось, что деформирование производится на гидравлическом прессе силой 50 МН при постоянной температуре деформирования 930 °С.

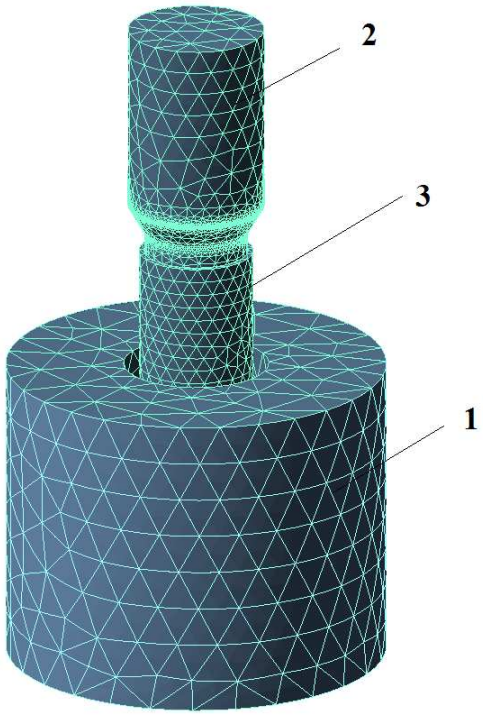
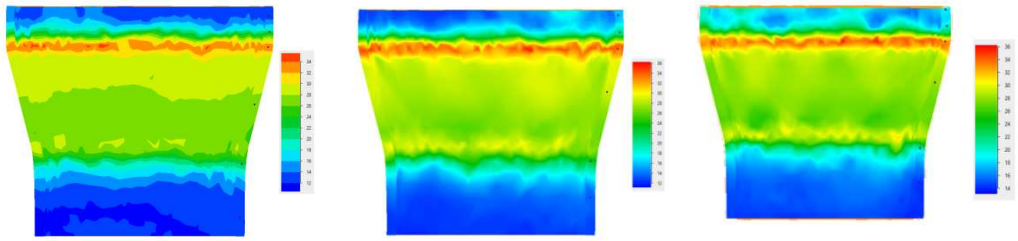


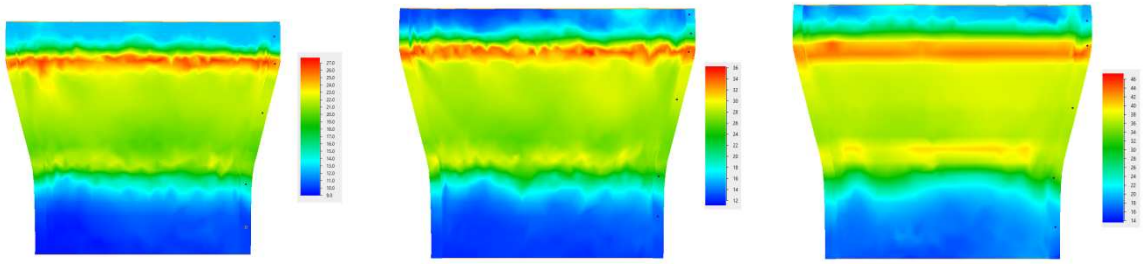
Рис. 2. 3D модели инструмента и заготовки:
1 – матрица; 2 – пуансон; 3 - заготовка

На рис. 3 - 6 представлены схемы распределения интенсивностей напряжений при раздаче для сплава ВТ6С для различных значений трения, скорости деформирования и углов скоса матрицы ее радиуса закругления. Из представленных схем видно, что интенсивность напряжений растет с увеличением трения, скорости деформирования. Из анализа представленных схем можно сделать вывод о том, что максимальные напряжения рассредоточены на месте перехода конической части заготовки в цилиндрическую.



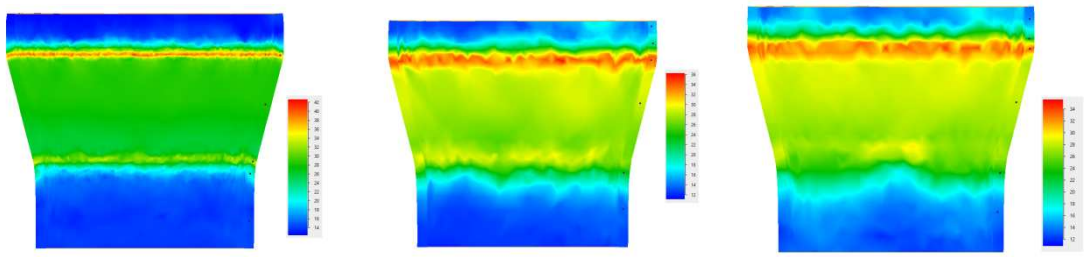
а ***б*** ***в***

Рис. 3. Схема распределения интенсивностей напряжений при раздаче ***(*** $\alpha = 15°, V = 0{,}1 мм/с$ ***): а -*** $\mu = 0{,}05$ ***; б -*** $\mu = 0{,}3$ ***; в -*** $\mu = 0{,}8$



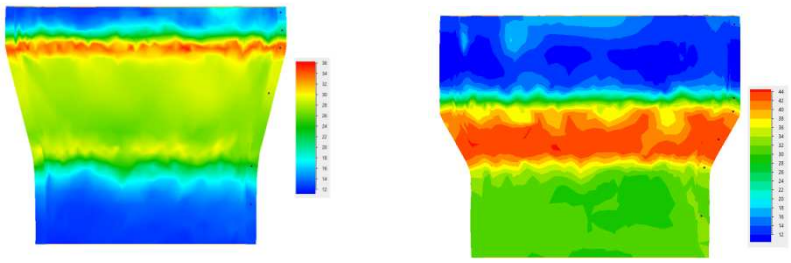
а ***б*** ***в***

Рис. 4. Схема распределения интенсивностей напряжений при раздаче ***(*** $\alpha = 15°, \mu = 0{,}3$ ***): а -*** $V = 0{,}01 мм/с$ ***; б -*** $V = 0{,}1 мм/с$ ***; в -*** $V = 1 мм/с$



а ***б*** ***в***

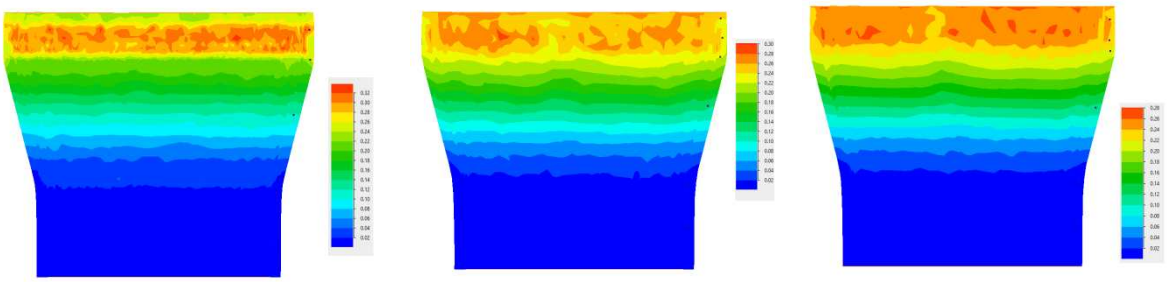
Рис. 5. Схема распределения интенсивностей напряжений при раздаче ***(*** $\alpha = 15°, V = 0{,}1 мм/с, \mu = 0{,}3$ ***): а -*** $R = 0 мм$ ***; б -*** $R = 3 мм$ ***; в -*** $R = 5 мм$



а ***б***

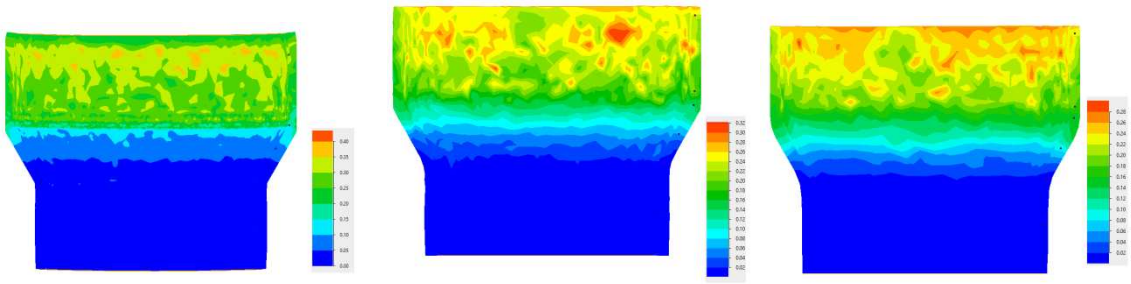
Рис. 6. Схема распределения интенсивностей напряжений при раздаче ***(*** $R = 3 мм, V = 0{,}1 мм/с, \mu = 0{,}3$ ***): а -*** $\alpha = 15°$ ***; б -*** $\alpha = 30°$

На рис. 7 - 8 представлены схемы к оценке разрушения заготовки при раздаче для сплава ВТ6С для различных значений углов скоса матрицы и ее радиуса закругления. Из представленных схем видно, что критические напряжения не превышают своей максимально допустимой величины. Можно сделать вывод о том, что максимальные напряжения рассредоточены на цилиндрической части заготовки.



а ***б*** ***в***

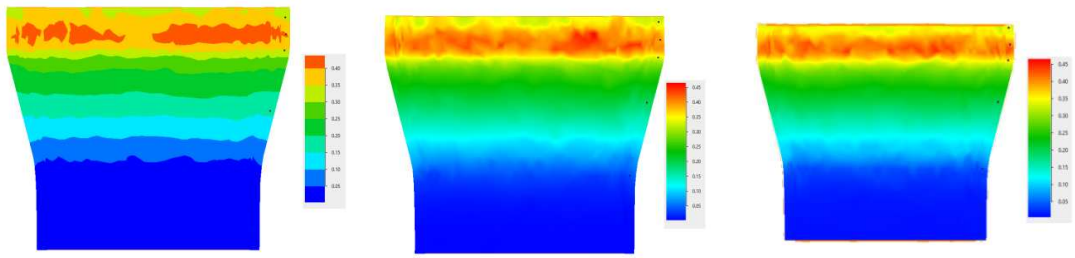
Рис. 7. Схема к оценке разрушения материала заготовки ***(*** $\alpha = 15°, V = 0{,}1 мм/с, \mu = 0{,}3$ ***): а -*** $R = 0 мм$ ***; б -*** $R = 3 мм$ ***; в -*** $R = 5 мм$



а ***б*** ***в***

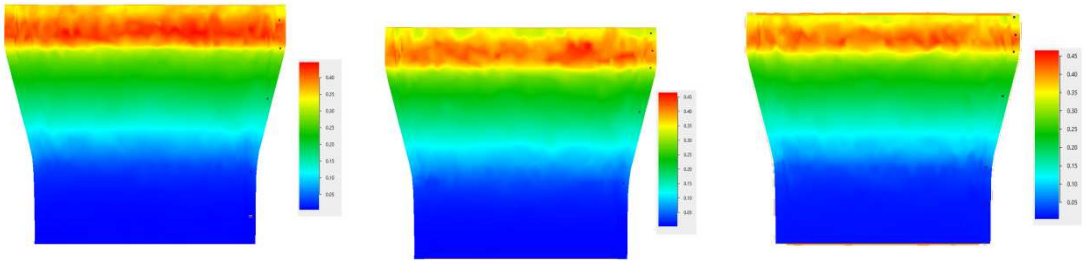
Рис. 8. Схема к оценке разрушения материала заготовки ***(*** $\alpha = 30°, V = 0{,}1 мм/с, \mu = 0{,}3$ ***): а -*** $R = 0 мм$ ***; б -*** $R = 3 мм$ ***; в -*** $R = 5 мм$

На рис. 9 - 12 представлены схемы распределения деформаций при раздаче для сплава ВТ6С для различных значений трения, скорости деформирования и углов скоса матрицы ее радиуса закругления. Из представленных схем видно, максимальные деформации рассредоточены на месте перехода конической части заготовки в цилиндрическую.



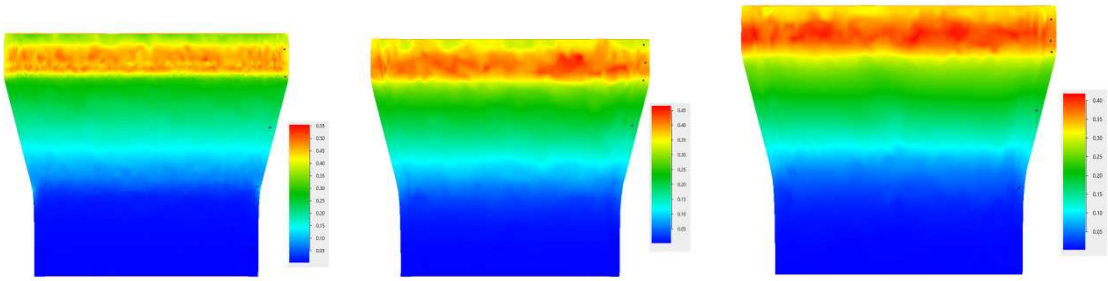
а ***б*** ***в***

Рис. 9. Схема к оценке изменения степени деформации при раздаче ***(*** $\alpha = 15°, V = 0{,}1 мм/с$ ***): а -*** $\mu = 0{,}05$ ***; б -*** $\mu = 0{,}3$ ***; в -*** $\mu = 0{,}8$



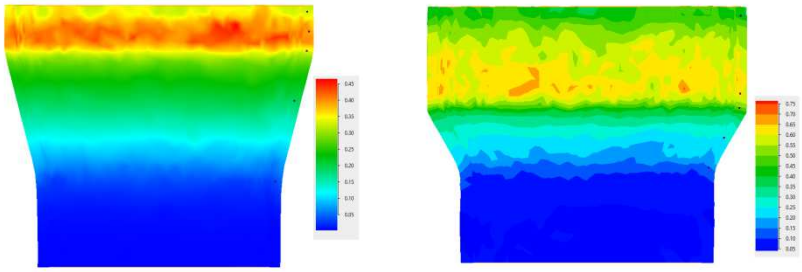
а ***б*** ***в***

Рис. 10. Схема к оценке изменения степени деформации при раздаче ***(*** $\alpha = 15°, \mu = 0{,}3$***): а -*** $V = 0{,}01 мм/с$***; б -*** $V = 0{,}1 мм/с$***; в -*** $V = 1 мм/с$



а ***б*** ***в***

Рис. 11. Схема к оценке изменения степени деформации при раздаче ***(*** $\alpha = 15°, V = 0{,}1 мм/с, \mu = 0{,}3$***): а -*** $R = 0 мм$***; б -*** $R = 3 мм$***; в -*** $R = 5 мм$



а ***б***

Рис. 12. Схема к оценке изменения степени деформации при раздаче ***(*** $R = 3 мм, V = 0{,}1 мм/с, \mu = 0{,}3$***): а -*** $\alpha = 15°$***; б -*** $\alpha = 30°$

Для более точного представления о распределении напряжений и деформаций в теле заготовке при раздаче были выбраны характерные точки в местах с разным напряженно-деформированных состоянием, схемы расположения которых представлены на рис. 13, 16. Для этих точек были построены графические зависимости изменения интенсивности напряжений и степени деформаций в процессе деформирования (рис. 14, 15, 17, 18).

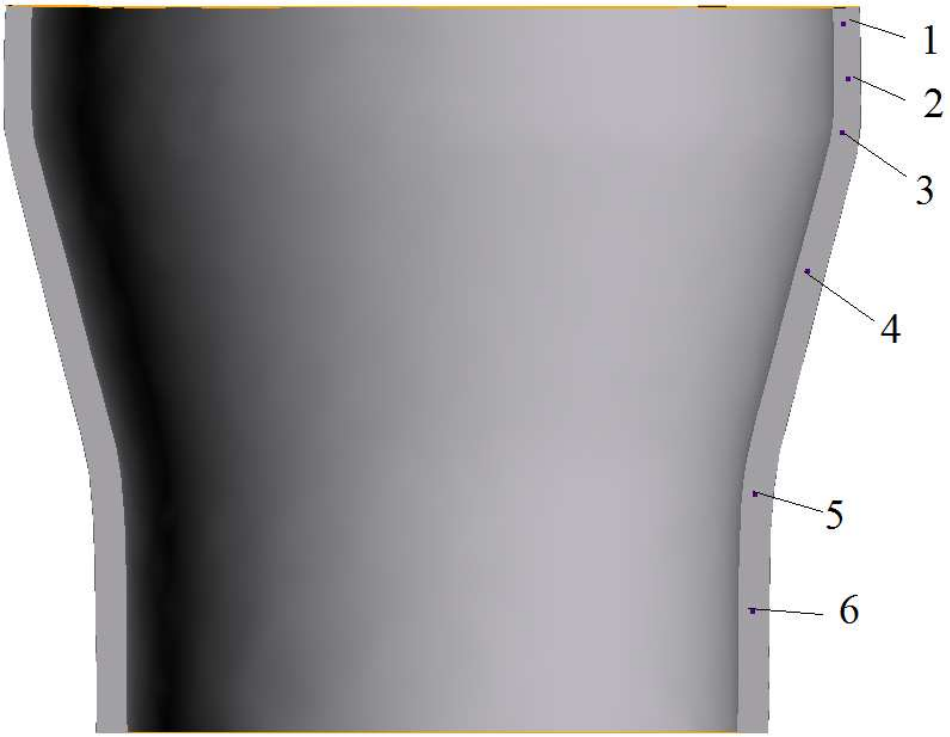


Рис. 13. Схема расположения точек в заготовке ***(*** $\alpha = 15°, V = 0{,}1 мм/с, \mu = 0{,}3$***)***

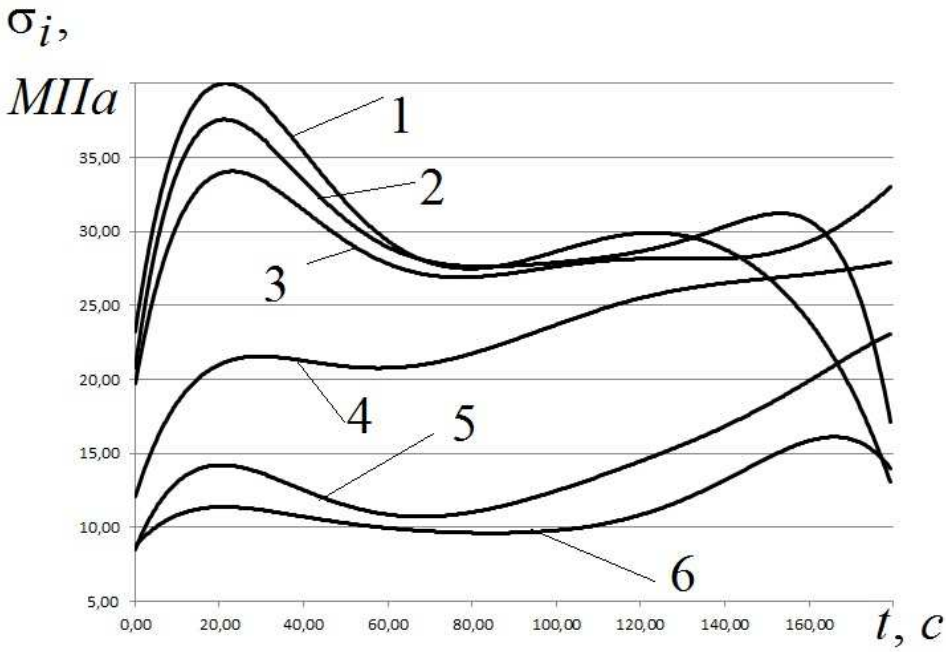


Рис. 14. Зависимость изменения интенсивности напряжений в процессе деформирования ($\alpha = 15°, V = 0{,}1 мм/с, \mu = 0{,}3$***)***

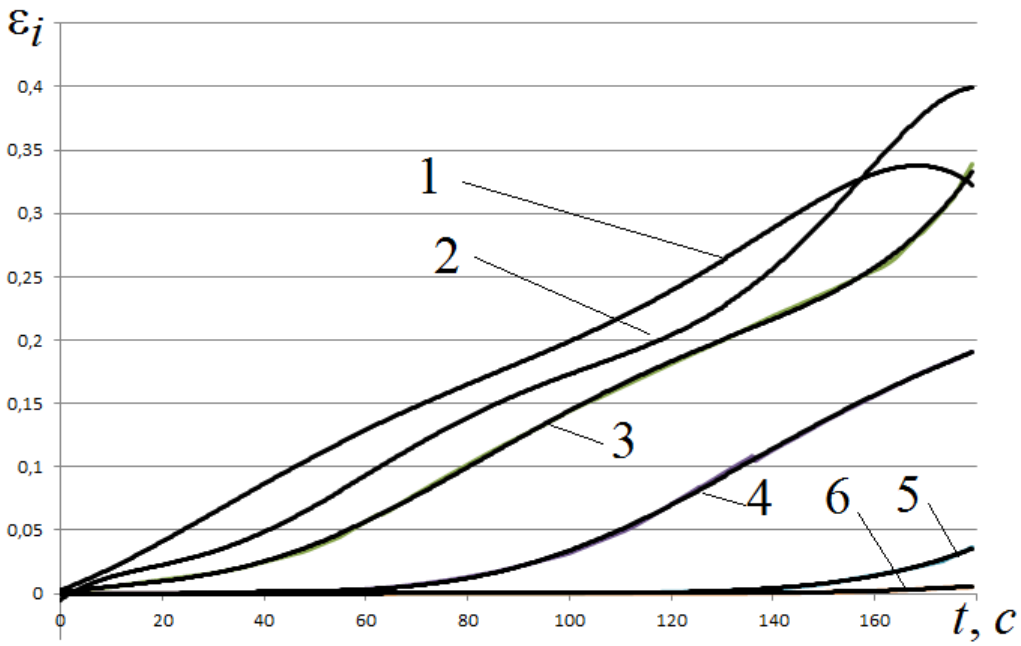


Рис. 15. Зависимость изменения степени деформаций в процессе деформирования ***(***$\alpha = 15°, V = 0{,}1 мм/с, \mu = 0{,}3$***)***

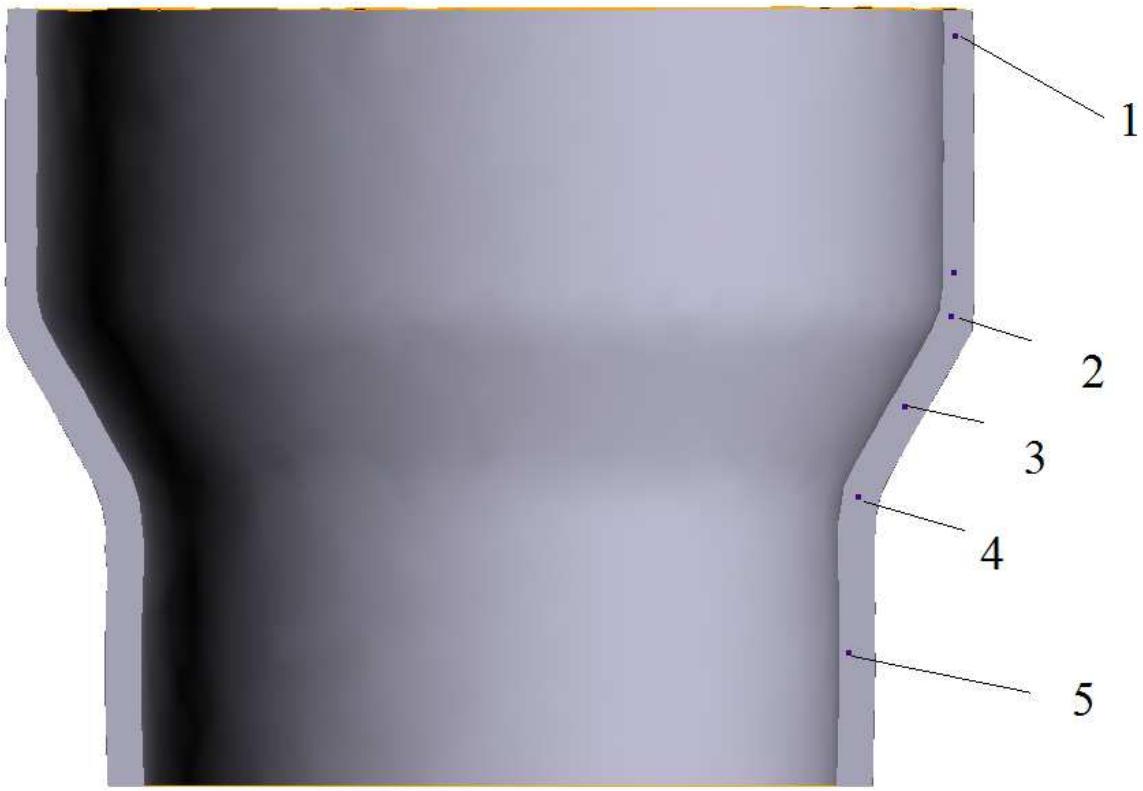


Рис. 16. Схема расположения точек в заготовке ***(***$\alpha = 30°, V = 0{,}1 мм/с, \mu = 0{,}3$***)***

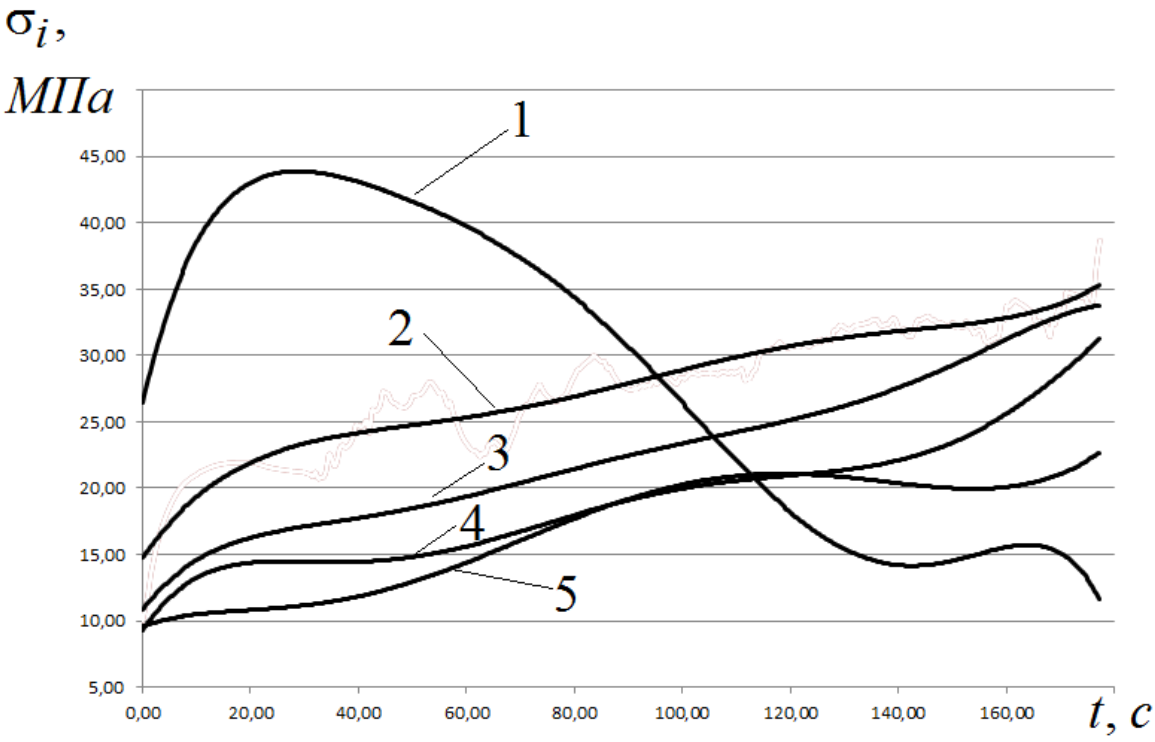


Рис. 17. Зависимость изменения интенсивности напряжений в процессе деформирования ($\alpha = 30°, V = 0{,}1 мм/с, \mu = 0{,}3$)

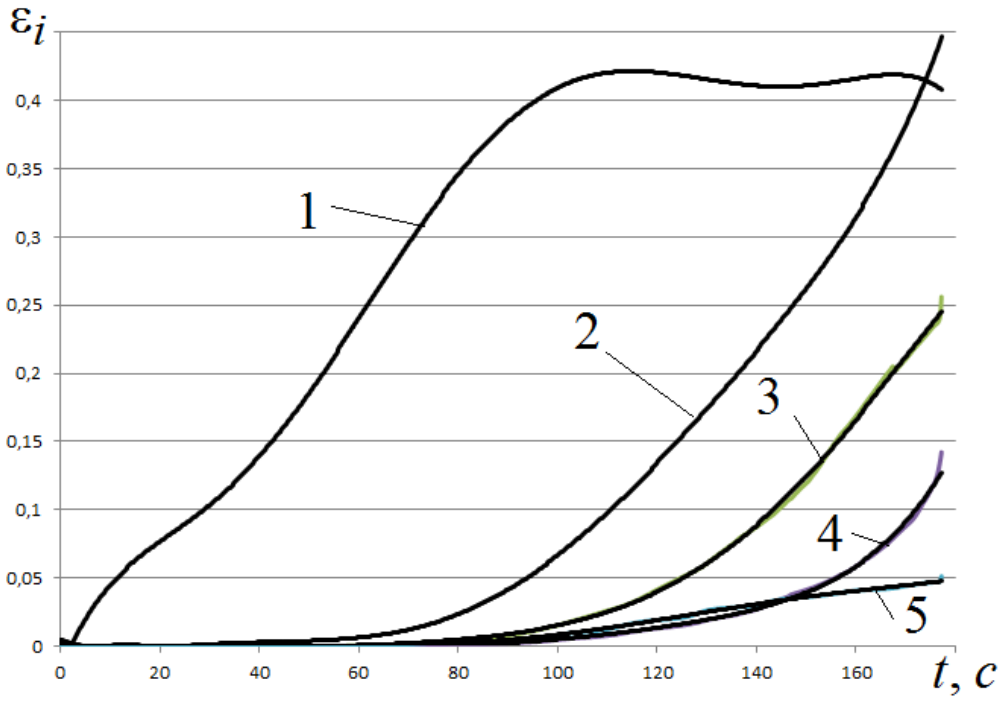


Рис. 18. Зависимость изменения степени деформаций в процессе деформирования ($\alpha = 30°, V = 0{,}1 мм/с, \mu = 0{,}3$)

Были построены зависимости изменения силы процесса во времени деформирования при различных значения трения (рис. 19). Так же были построены зависимости изменения силы процесса от коэффициента трения (рис. 20), от скорости деформирования (рис. 21), от радиуса (рис. 22) и угла скоса матрицы (рис. 23).

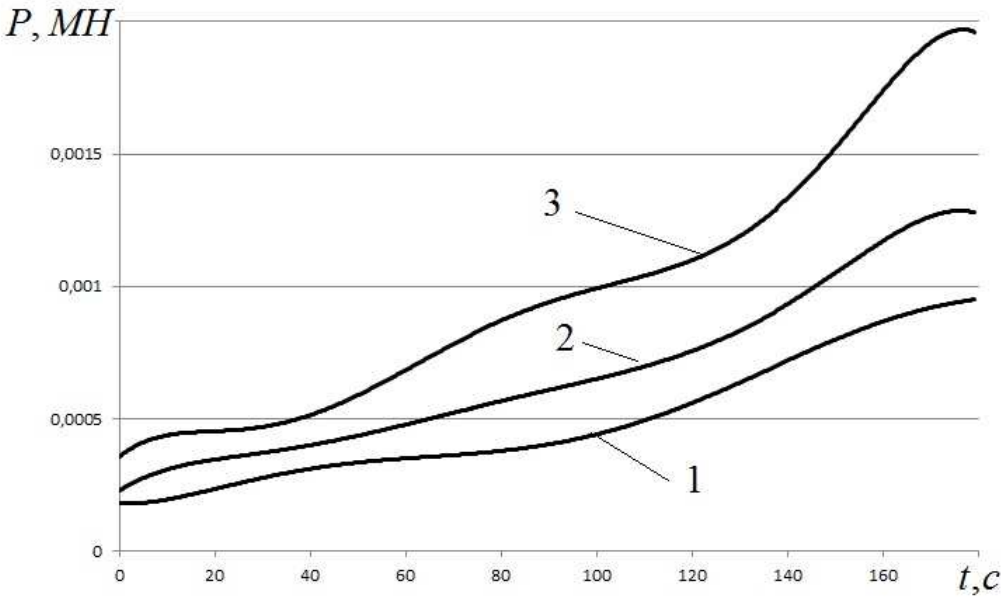


Рис. 19. Зависимость изменения силы штамповки в процессе деформирования ($\alpha = 15°, V = 0{,}1 мм/с, R = 3\ мм$)***:*** ***1*** - $\mu = 0{,}05$***;*** ***2*** - $\mu = 0{,}3$***;*** ***3*** - $\mu = 0{,}8$

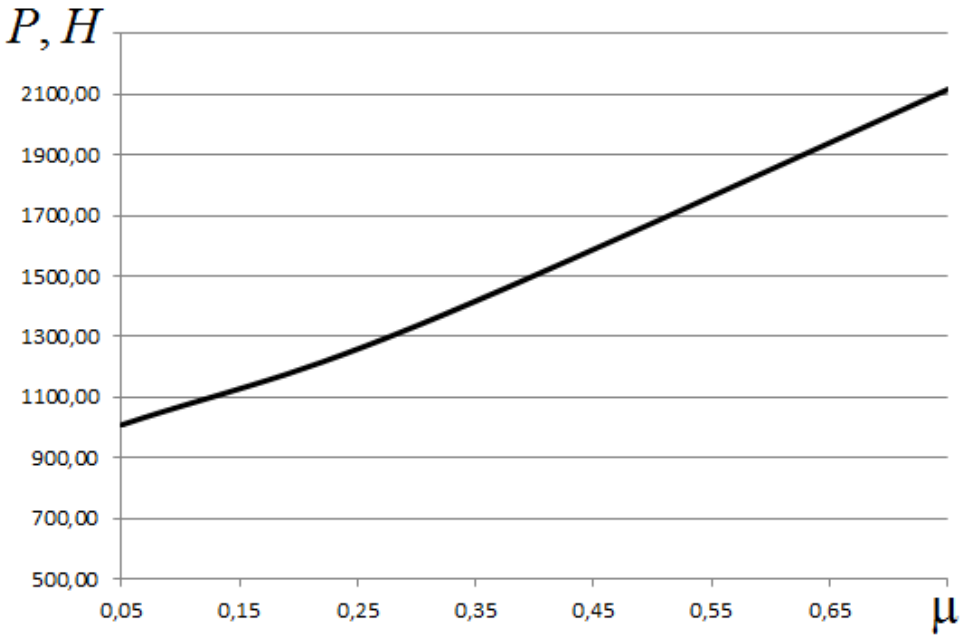


Рис. 20. Зависимость изменения силы деформирования от коэффициента трения ($\alpha = 15°, V = 0{,}1 мм/с, R = 3\ мм$)

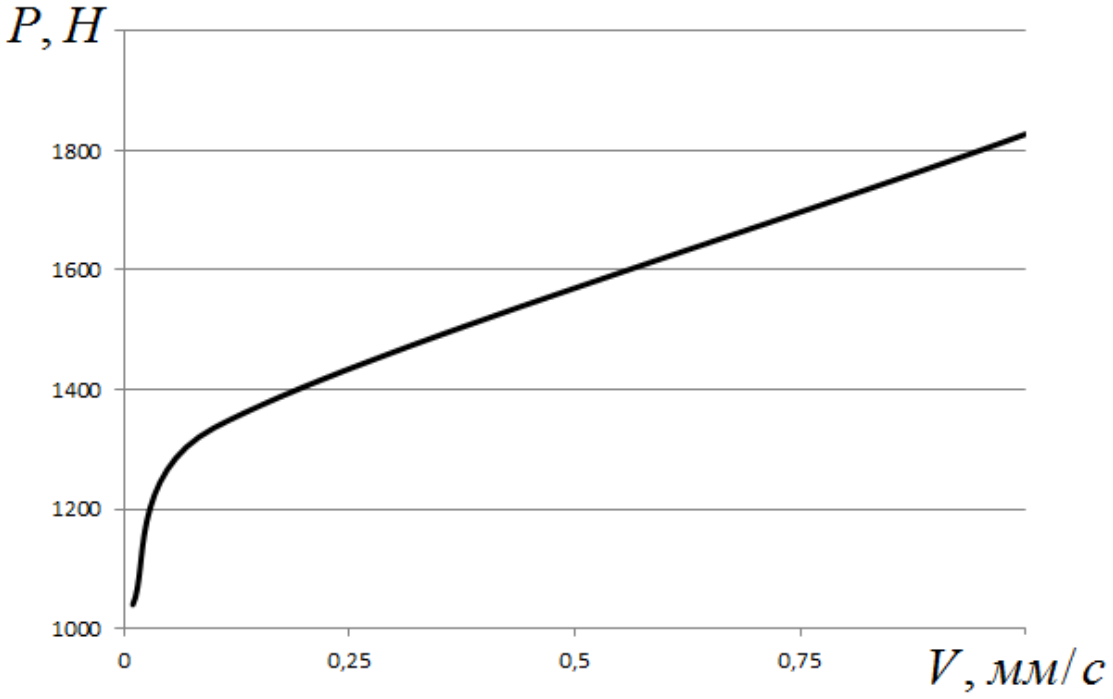


Рис. 21. Зависимость изменения силы от скорости деформирования ***(*** $\alpha = 15°, \mu = 0{,}3, R = 3$ *мм* ***)***

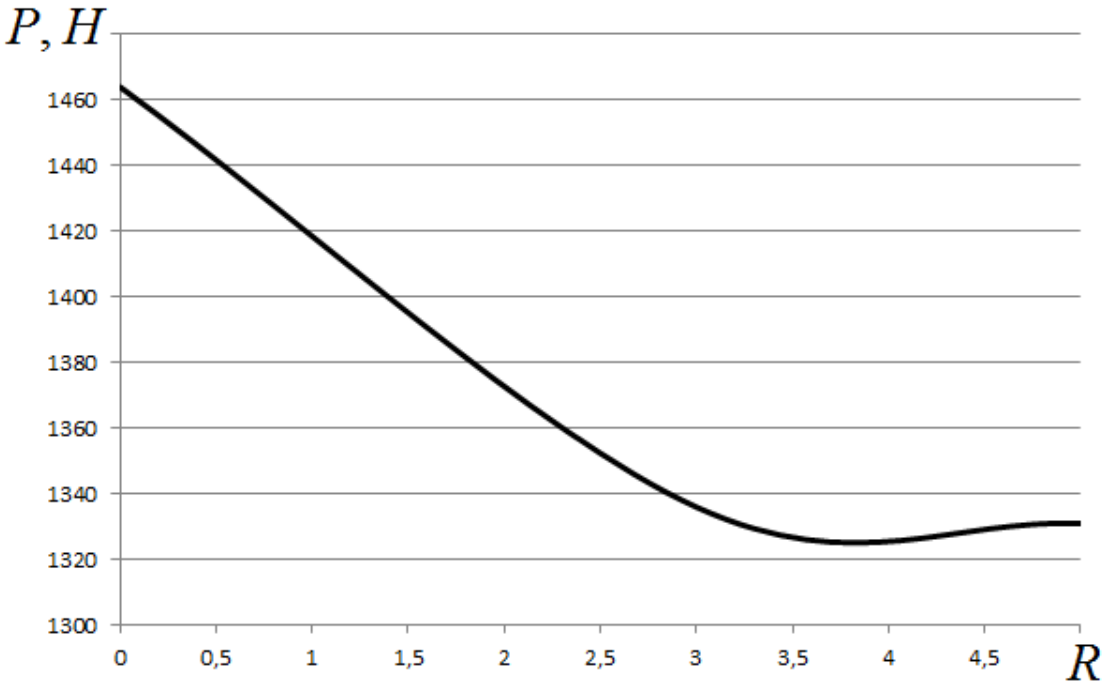


Рис. 22. Зависимость изменения силы от радиуса матрицы ***(*** $\alpha = 15°, V = 0{,}1$ *мм/с* ***,*** $\mu = 0{,}3$ ***)***

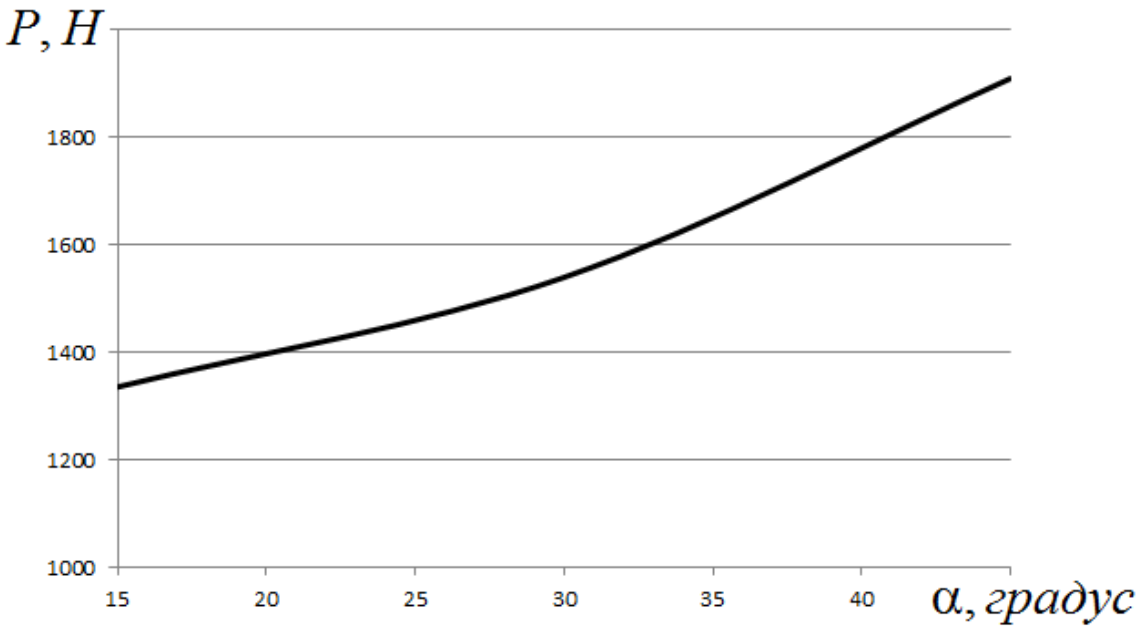


Рис. 23. Зависимость изменения силы деформирования от угла матрицы ($\mu = 0{,}3$, $R = 3$ *мм*, $V = 0{,}1 мм/с$***)***

Установлено что с увеличением трения, скорости деформирования, угла скоса матрицы и уменьшением радиуса матрицы сила процесса растет.

Сравнение данных, предоставленных в данной статье с данными, основанных на верхнеграничной теореме пластичности говорит о достаточной степени сходства [2-4]. Закономерности изменения зависимостей технологических параметров в данных исследованиях совпадают с экспериментальными и теоретическими, основанными на верхнеграничной теореме пластичности, что говорить о допустимости использования программного комплекса Qform 2D/3D для исследования объемных процессов штамповки в изотермических условиях.

Работа выполнена в рамках грантов РФФИ № 15-48-03234_р_центр_а и РФФИ № 14-08-00066 и гранта правительства Тульской области ДС/128.

Список литературы

1. Яковлев С.С., Пасынков А.А., Ларина М.В. Оценка влияния технологических параметров процесса бокового выдавливания по плоской схеме деформаций на силовые режимы и качество получаемых изделий // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2015. Вып. 10. С. 13-19.

2. Изотермическое деформирование высокопрочных анизотропных материалов / С.П. Яковлев, В.Н. Чудин, С.С. Яковлев, Я.А. Соболев. М.: Машиностроение, 2004. 427 с.

3. Изотермическое формоизменение анизотропных материалов жестким инструментом в режиме кратковременной ползучести / С.С. Яковлев, С.П. Яковлев, В.Н. Чудин, В.И. Трегубов, А.В. Черняев. М.: Машиностроение, 2009. 412 с.

4. Теория обработки металлов давлением: учебник для вузов / В.А. Голенков, С.П. Яковлев, С.А. Головин, С.С. Яковлев, В.Д. Кухарь / под ред. В.А. Голенкова, С.П. Яковлева. М.: Машиностроение, 2009. 442 с.

Пасынков Андрей Александрович, канд. техн. наук, доц., mpf-tula@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Серегина Анастасия Игоревна, студент, mpf-tula@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

EVALUATION STRESS-STRAIN STATE AT THE LANDING PIPE BLANKS OF HIGH-STRENGTH ALLOYS

A.A. Pasynkov, A.I. Seregina

This article presents the results of theoretical studies of stress and strain state of preparations in the distribution of round billets with regulated temperature and strain rates. The influence of process parameters and geometric parameters of the workpiece on the power modes, stress and strain state. A study made in an environment software package Qform 2D / 3D, based on the basis of the finite element method. Comparison of the data in the article with the results of a theoretical analysis based on the basis of Theorem verhnegranichnoy plasticity and experimental data shows satisfactory agreement.

Key words: landing, Qform 2D / 3D, isothermal conditions, deformation speed, strength, power.

Pasynkov Andrey Aleksandrovich, candidate of technical sciences, associate professor, mpf-tula@rambler.ru, Russia, Tula, Tula State University

Seregina Anastasiya Igorevna, student, mpf-tula@rambler.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 621.983:539.374

ШТАМПОВКА ПОКОВОК ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ КОНИЧЕСКИХ ОБЛИЦОВОК С ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ОБРАБОТКОЙ РЕЗАНЬЕМ

В.Д. Кухарь, А.Е. Киреева, О.Н. Митин

В статье рассмотрен процесс получения конических кумулятивных облицовок малого калибра штамповкой поковок с последующей обработкой резаньем.

Ключевые слова: кумулятивная облицовка, прутковая заготовка, штамповка, матрица, пуансон, деформация, обработка металлов давлением.

В работе [3] обоснована целесообразность получения конических кумулятивных облицовок малого калибра штамповкой из мерных прутковых заготовок. Реализация данного технологического процесса возможна по следующим вариантам [2, 4]:

вариант №1 - штамповка полуфабриката из прутковой заготовки с последующей механообработкой;

вариант №2 - штамповка полуфабриката из прутковой заготовки с последующей раскаткой;

вариант №3 - получение кумулятивной оболочки из мерной заготовки выдавливанием за один переход.

Рассмотрим первый из них для получения кумулятивной облицовки из медного прутка М1, со следующими геометрическими размерами (рис.1).

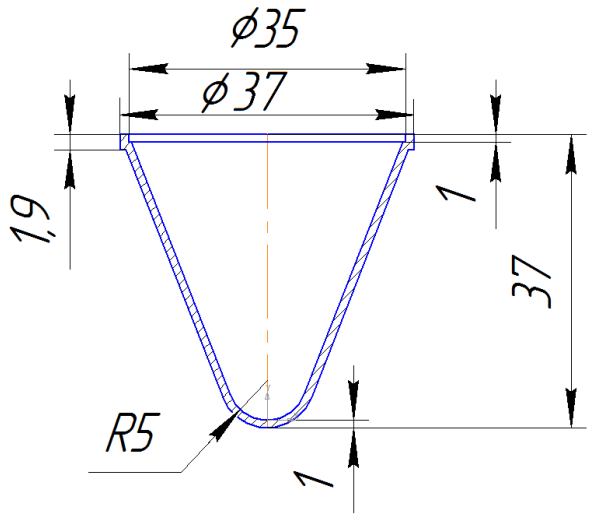


Рис. 1. Коническая кумулятивная облицовка

В этом случае последующая механообработка предполагает наличие припуска штампованного полуфабриката по отношению к геометрическим размерам готового изделия.

На рис. 2. представлены геометрические размеры поковки после штамповки перед последующей механообработкой.

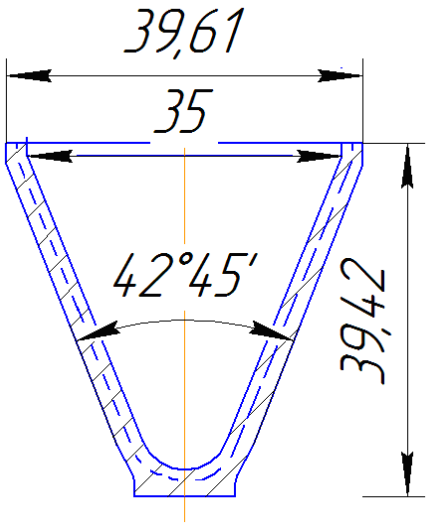


Рис. 2. Чертеж поковки

Объем поковки $V_{поковки} = 7780 мм^3$ и ее масса $m_{поковки} = 0.07 кг$.

Для теоретического анализа процесса штамповки данной поковки воспользуемся программным комплексом QForm 2D/3D [5], который позволяет отразить реальную картину пластического формоизменения материала в процессе нагружения, оценить напряженно-деформированное состояние во всем объеме обрабатываемой заготовки в любой момент времени, а также оценить силовые параметры процесса и возможность разрушения материала в процессе нагружения.

Простейшей заготовкой получаемой из прутка является цилиндр соответствующих геометрических размеров.

Согласно ГОСТ 1535-71 по изготовлению медного прутка, наиболее целесообразным использовать прутки диаметрами прутка 20, 24, 28мм.

Ниже показаны картины формоизменения при штамповке поковок из заготовок диаметрами 20 мм, 24 мм и 28 мм в конической матрице (рис. 3 - 5).

Анализ полученных результатов показал, что при воздействии закруглённого пуансона на цилиндрическую заготовку, она в процессе нагружения теряет осесимметричное положение относительно матрицы, что приводит к изготовлению бракованного изделия.

Поэтому было предложено получить кумулятивную облицовку за две операции.

На первой операции заготовку осаживают плоским пуансоном в конической матрице для формирования конического участка на ней, а затем на втором этапе осуществляют штамповку полученной заготовки коническим пуансоном требуемых геометрических размеров.

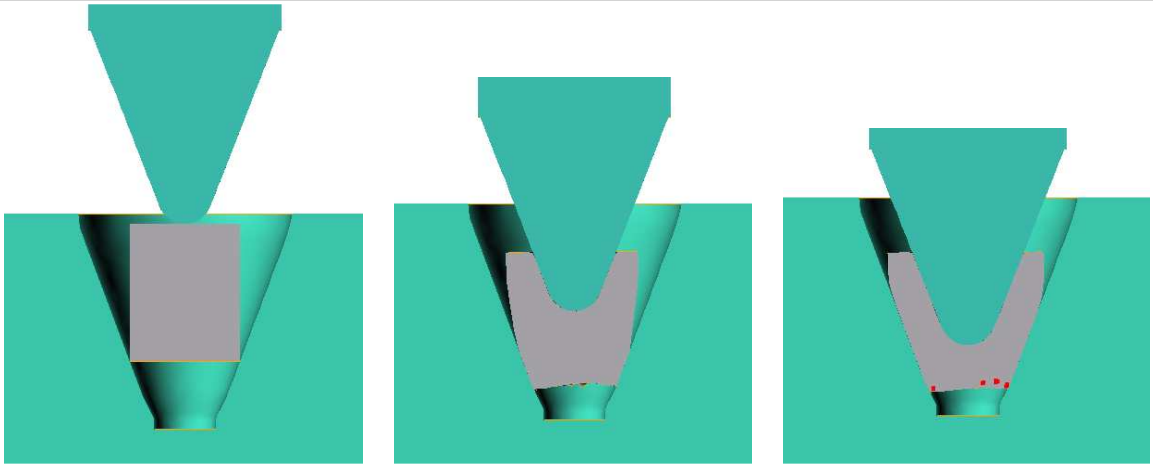


Рис. 3. Промежуточные этапы формоизменения заготовки диаметром 20 мм высотой 24,8 мм

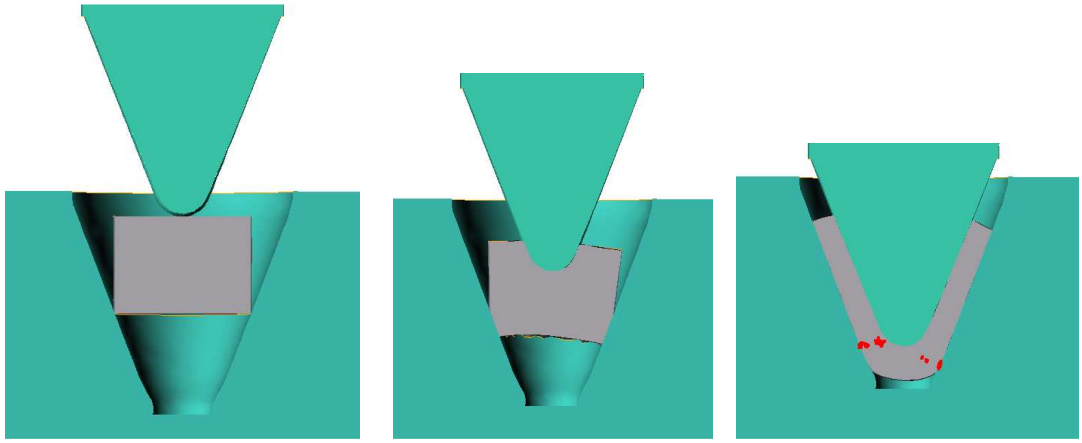


Рис. 4. Промежуточные этапы формоизменения заготовки диаметром 24мм высотой 17,2мм

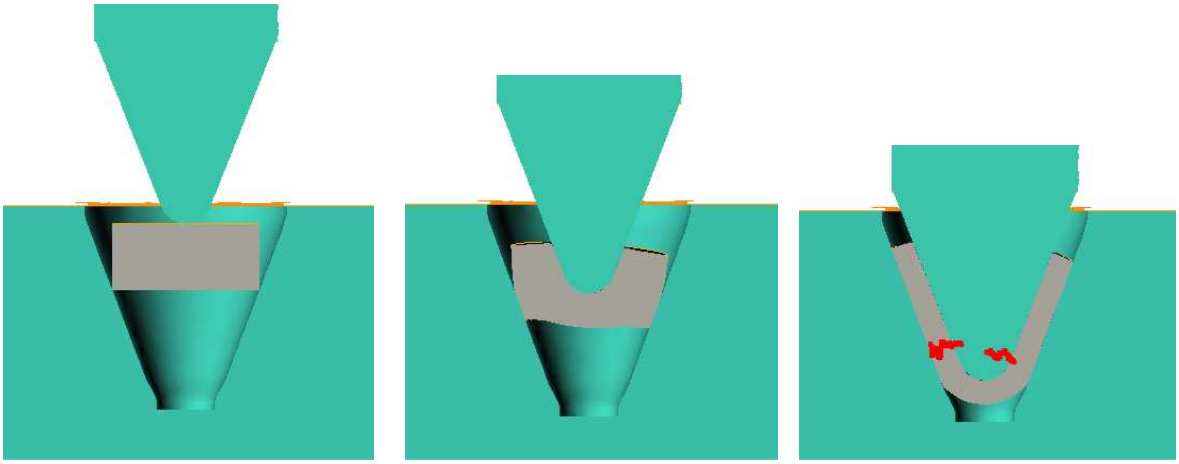


Рис. 5. Промежуточные этапы формоизменения заготовки диаметром 28мм высотой 12,6мм

Рассмотрим этот процесс на примере заготовки 24мм высотой 17,2мм. При этом рассмотрим крайний случай, когда заготовка в исходном состоянии занимает не осесимметричное положение относительно оси матрицы, а примыкает одной из своих сторон к коническому участку матрицы (рис. 6).

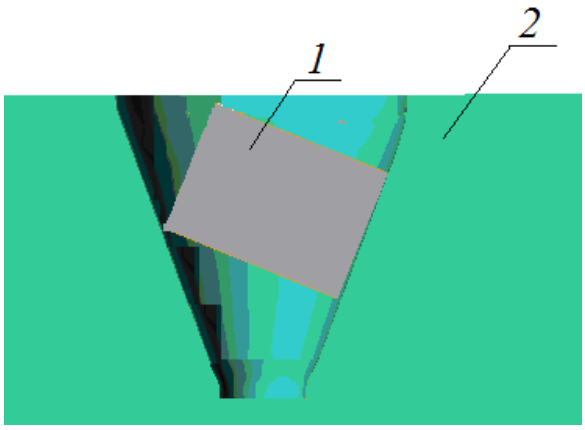


Рис. 6. Расположение заготовки (1) в полости матрицы (2)

В начале деформирования по действием плоского пуансона заготовка центрируется относительно полости матрицы (рис. 7).

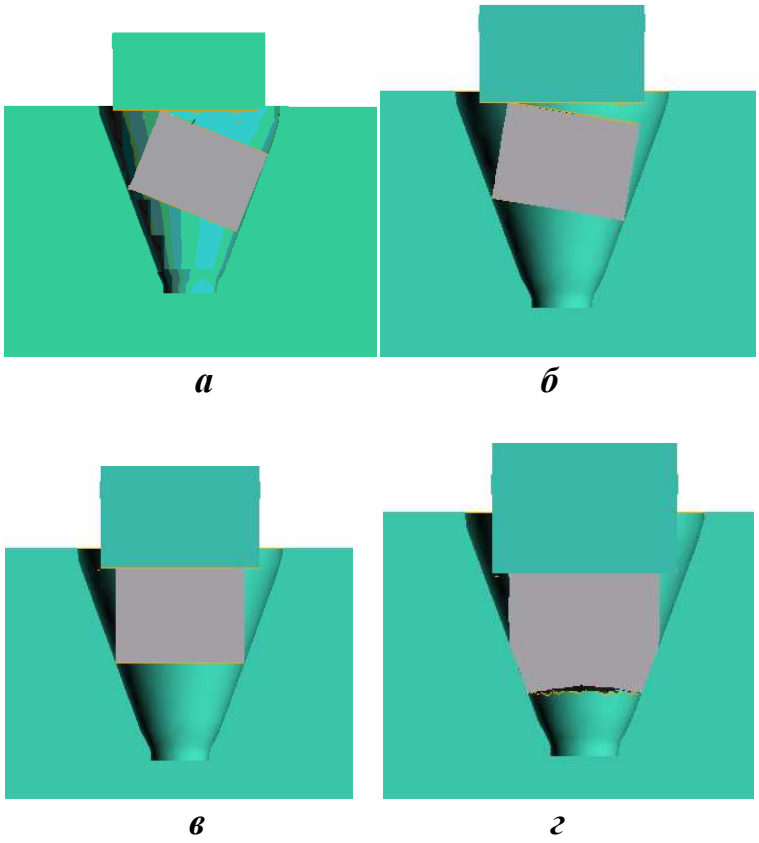


Рис. 7. Этапы деформирования заготовка плоским пуансоном

При дальнейшем нагружении на заготовке формируется конический участок (рис.7, г), который позволяет осуществить центрирование ее в полости матрицы перед вторым переходом штамповки коническим пуансоном.

В этом случае заготовка в процессе нагружения деформируется устойчиво (рис. 8).

Для реализации процесса штамповки поковки за один переход было предложено использовать заготовку с геометрическими размерами, представленными на рис. 9, получаемую резаньем из прутка.

Хотя в этом случае коэффициент использования материала уменьшится на 9 % , но такая заготовка позволит исключить операцию предварительной штамповки. Так как ее форма позволяет ей самоцентрироваться в полости матрицы (рис. 10).

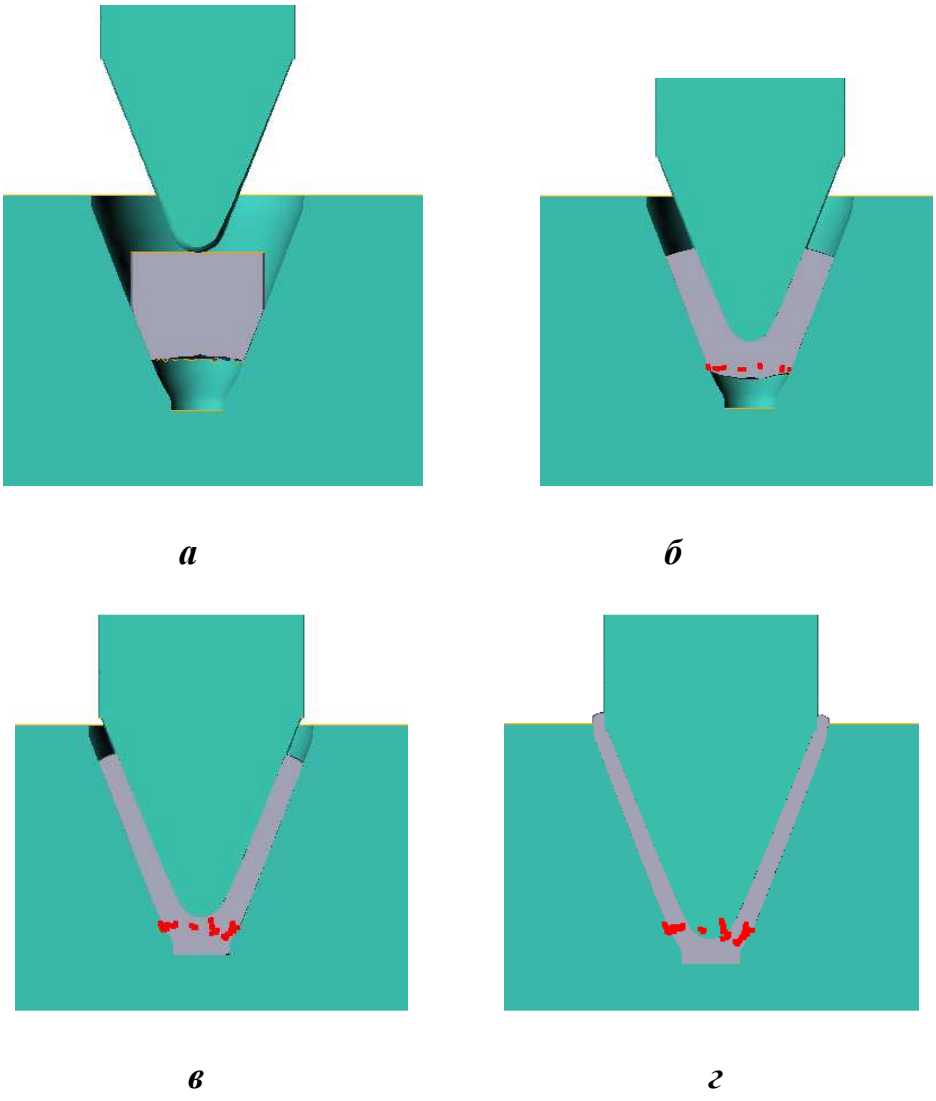
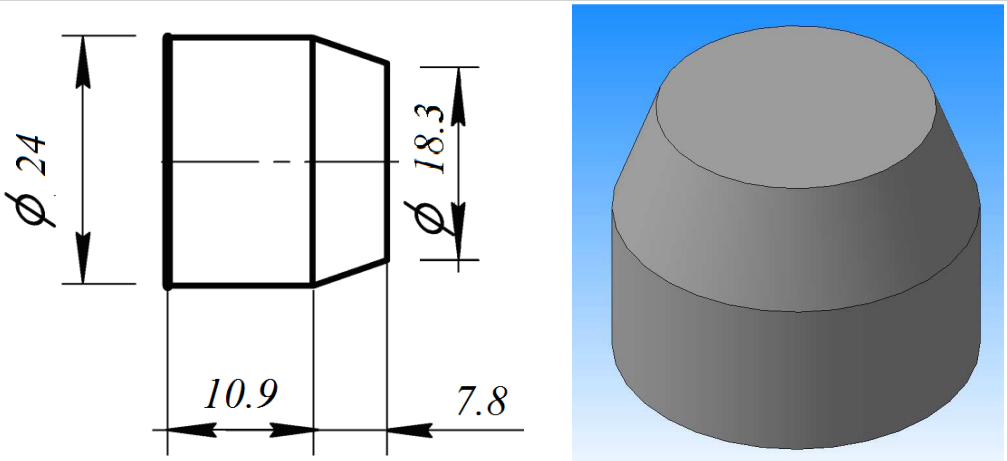
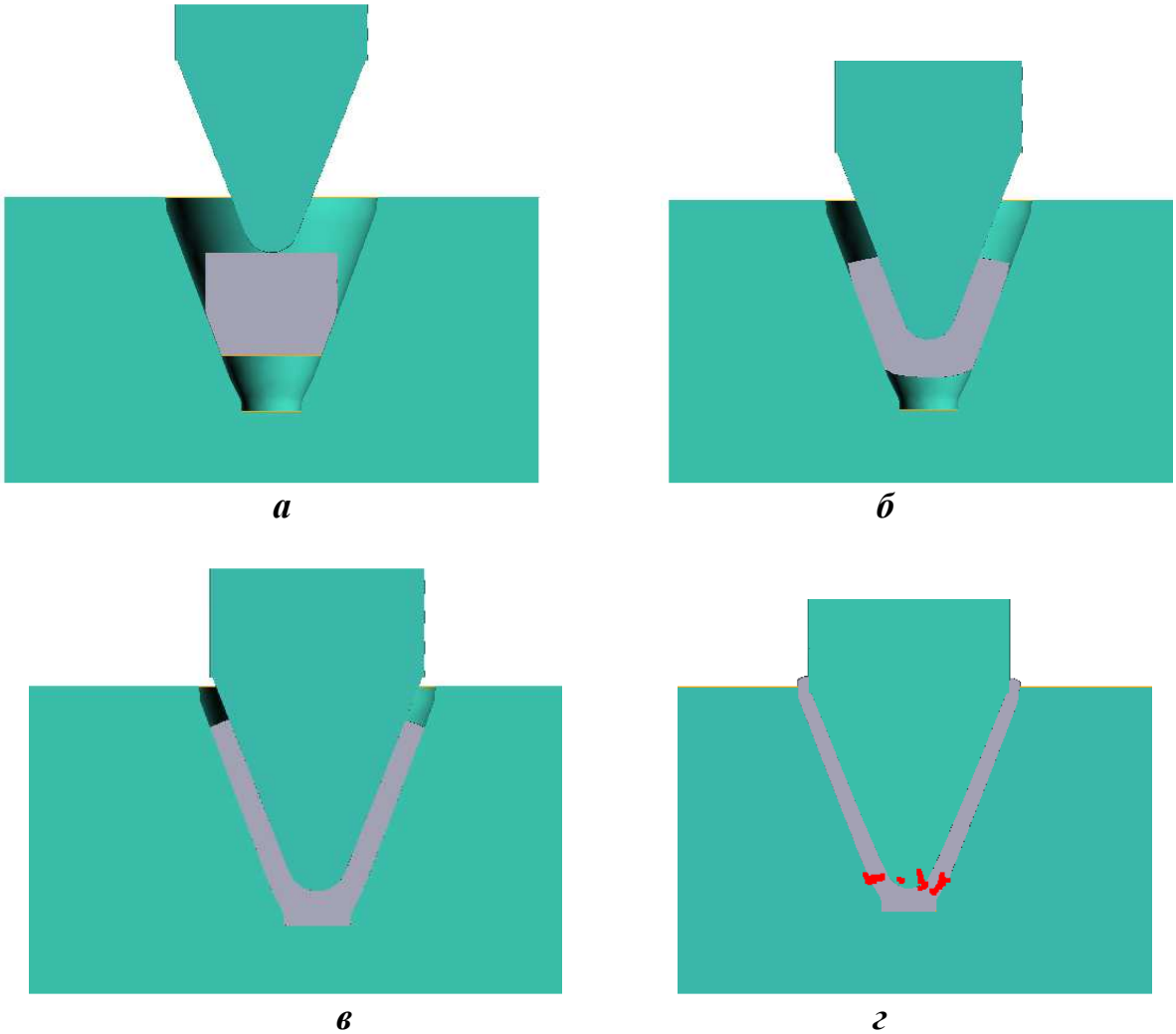


Рис. 8. Этапы формоизменения заготовки на второй операции



а *б*

Рис. 9. Исходные размеры заготовки (а) и форма (б)



а *б*

в *г*

Рис. 10. Этапы формоизменения заготовки, приведенной на рис. 9

График усилие - путь деформирования данной заготовки приведен на рис. 11.

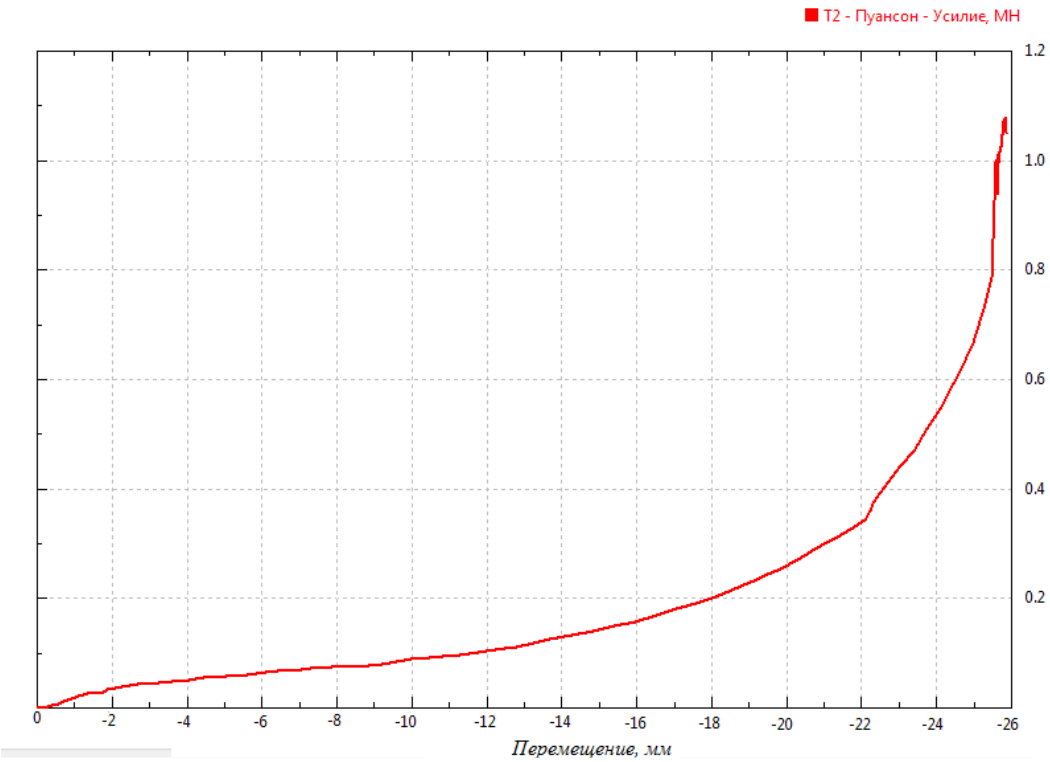


Рис. 11. График усилия деформирования

Видно, что усилие деформирования резко возрастает на заключительном этапе формоизменения и достигает достаточно высокого значения 1,05 МН, поэтому дальнейшие исследования должны быть направлены на поиск путей снижения технологического усилия.

Работа выполнена в рамках гранта РФФИ 16-48-710824 и гранта правительства Тульской области ДС/47 от 25.05.2016.

Список литературы

1. Биба Н.В., Стебунов С.А. «QForm 5.0 – программный инструмент для повышения эффективности производства в обработке металлов давлением». 2008.

2. Вопросы моделирования и конструирования кумулятивных зарядов: учеб. пособие / М.С. Воротилин, С.В. Дорофеев, Л.Н. Князева, А.Н. Чуков. Тула: ТулГУ, 2003. 168с.

3. Киреева А.Е., Кухарь В.Д., Митин О.Н. Технологические особенности получения конических кумулятивных облицовок // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2016. Вып. 11. Ч. 2. С. 213 - 219.

4. Кумулятивные заряды: монография / И.В. Минин, О.В. Минин. Новосибирск: СГГА, 2013. 200 с.

Кухарь Владимир Денисович, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой, Vladimir.D.Kuchar@tsu.tula.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Киреева Алена Евгеньевна, канд. техн. наук, доц., kirealena@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Митин Олег Николаевич, канд. техн. наук, докторант, mpf-tula@rambler.ru, Россия, Тула, ОАО «НПО «СПЛАВ»

STAMPING OF FORGINGS FOR RECEIVING THE CONICAL WALL WITH THE SUBSEQUENT MACHINING

V.D. Kukhar, A.E. Kireeva, O.N. Mitin

The article describes the process of obtaining a conical shaped-charge liners small caliber stamping forging and subsequent machining.

Key words: the cumulative cladding, bar processing, stamping, matrix, punch, deformation, processing of metals by pressure.

Kukhar Vladimir Denisovich, doctor of technical science, professor, manager of kathedra, Vladimir.D.Kuchar@tsu.tula.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Kireeva Alena Evgenevna, candidate of technical science, docent, kirealena@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Mitin Oleg Nikolayevich, candidate of technical sciences, doctoral, mpf-tula@rambler.ru, Russia, Tula, OPC "SPA "SPLAV"

УДК 621.777.4

СИЛОВЫЕ РЕЖИМЫ ИЗОТЕРМИЧЕСКОГО ОБРАТНОГО ВЫДАВЛИВАНИЯ ПАТРУБКА С НАКЛОННЫМ ФЛАНЦЕМ

А.В. Черняев, В.Т. Нгуен

Приведены результаты моделирования изотермического обратного выдавливания патрубка с наклонным фланцем методом конечных элементов на основе программного комплекса QFORM 2D/3D. Установлено влияние технологических параметров на силовые режимы обратного выдавливания.

Ключевые слова: моделирование, кратковременная ползучесть, обратное выдавливание, метод конечных элементов, силовые режимы.

Перспективной технологией производства патрубков с наклонным фланцем для изделий ответственного назначения является отбортовка плоских листовых заготовок с предварительно образованным отверстием с последующей операцией обратного выдавливания, повышающей точность толщины стенки и внутреннего диаметра патрубка [1, 2]. Процессы реализуются в регламентированных температурно-скоростных условиях, в режиме вязко-пластического течения материала [3].

Рассмотрена операция изотермического обратного выдавливания патрубка с наклонным фланцем в режиме кратковременной ползучести (рис. 1). Материал заготовки принимается вязкопластическим, изотропным, несжимаемым, однородным, изотропно-упрочняющимся. Принимается, что на контактных поверхностях инструмента и заготовки реализуется закон трения Леванова.

Расчеты выполнены с использованием программного комплекса Qform 2D/3D v. 7, который основан на использовании метода конечных элементов. Теоретические исследования силовых режимов проводились в следующих диапазонах изменения технологических параметров: редукция $r = F_0 / F_1 = 1{,}2..1{,}8$, где F_0 и F_1 - соответственно площади поперечного сечения патрубка до и после обратного выдавливания; коэффициент трения на контактной поверхности инструмента и заготовки $\mu = 0{,}05..0{,}2$; угол конусности пуансона $\gamma = 6...24^\circ$; скорость перемещения инструмента $V = 0{,}01...10\,мм/с$. Геометрические размеры заготовки принимались следующие: начальная толщина $s_0 = 4мм$, диаметр $D_0 = 80мм$, угол наклона фланца $\alpha = 0...20^\circ$. Расчеты выполнены для алюминиевого сплава АМг6 и титанового сплава ВТ6 при температурах обработки $T = 450^\circ C$ и $T = 930^\circ C$ соответственно.

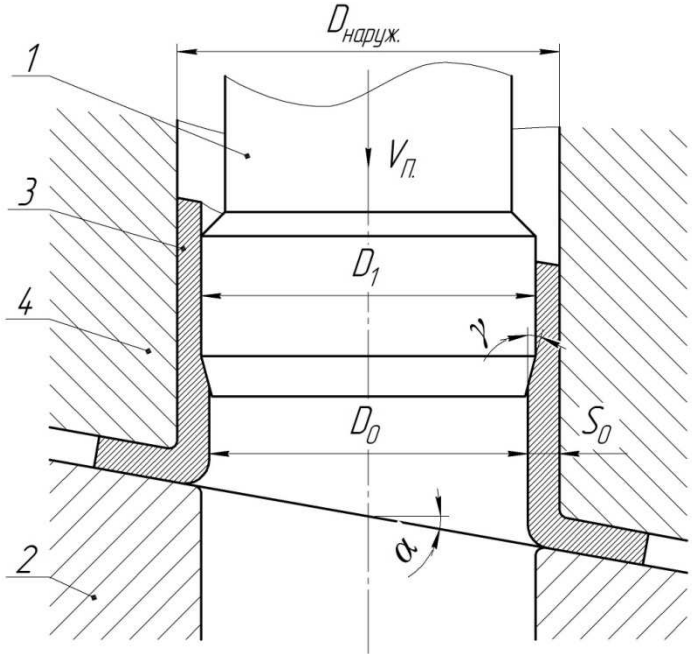
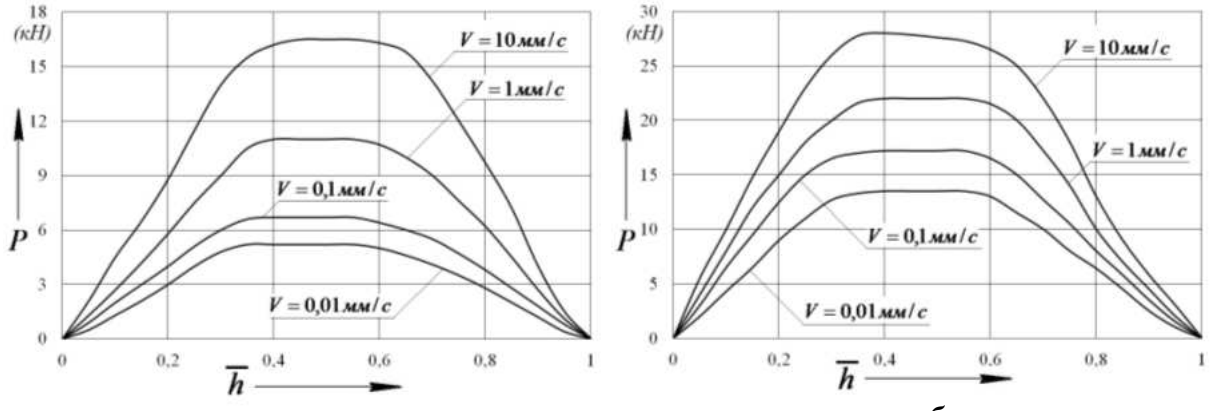


Рис. 1. Схема обратного выдавливания патрубка с наклонным фланцем: 1 – пуансон; 2 – опора; 3 – заготовка; 4 – оправка

Для проведения моделирования подготовлены геометрические модели заготовки и инструмента, которые импортированы в программу Qform.

В результате проведения теоретических исследований установлены картины распределения интенсивности напряжений и деформаций в процессе формоизменения заготовки при обратном выдавливании, оценены силовые режимы процесса.

На рис 2. представлены графические зависимости силы операции P от перемещения пуансона $\bar{h} = h/h_{б.}$, где h - текущее перемещение пуансона, $h_{б.}$ - конечная высота борта изделия, при обратном выдавливании патрубка.

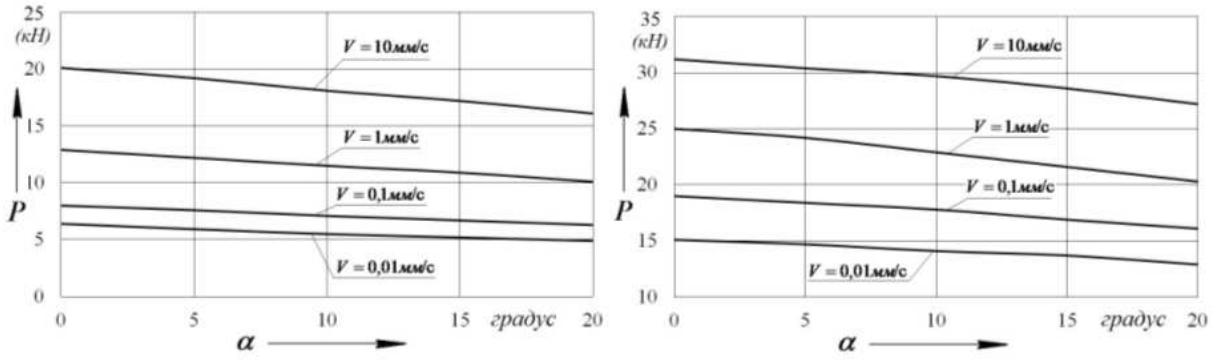


а ***б***

Рис. 2. Графические зависимости P от $\bar{h}$ при обратном выдавливании: а - сплав АМг6; б - сплав ВТ6 ($r = 1{,}32$; $\alpha = 10^{\circ}$; $\gamma = 10^{\circ}$; $\mu = 0{,}05$)

Установлено, что процесс обратного выдавливания патрубков с наклонным фланцем состоит из трех этапов. На первом этапе происходит деформирование части заготовки с неполным охватом её рабочего контура пуансона. На втором этапе осуществляется обратное выдавливание заготовки с полным охватом рабочей части инструмента (стационарная стадия). Третий заключительный этап сопровождается выходом пуансона из контакта с частью трубной заготовки. Показано, что максимальное значение силы операции наблюдается на второй стационарной стадии процесса деформирования патрубка.

На рис. 3 представлены графические зависимости силы операции P от угла наклона фланца α и скорости перемещения инструмента V при обратном выдавливании патрубка.



а ***б***

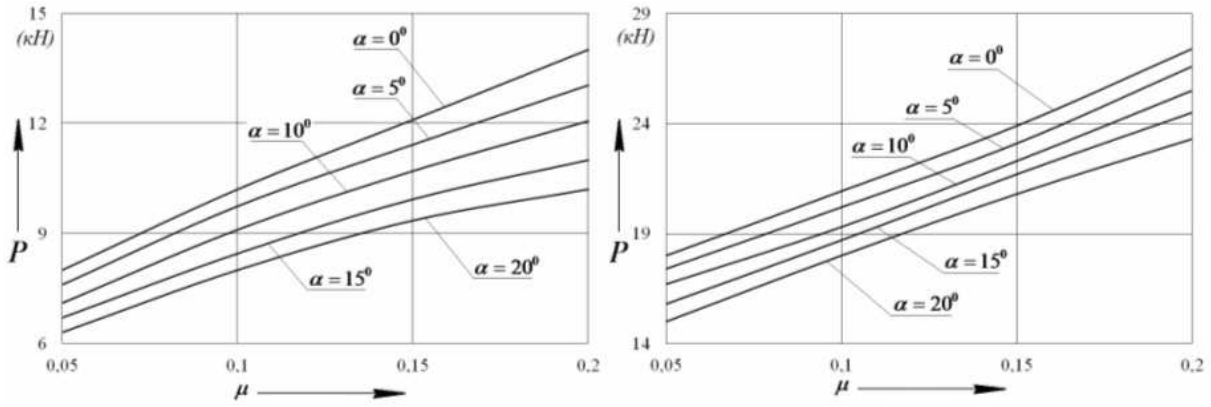
Рис. 3. Графические зависимости P ***от*** α ***при обратном выдавливании: а - сплав АМг6; б - сплав ВТ6*** $(r = 1{,}32\,;\ \gamma = 10^{\circ}\,;\ \mu = 0{,}05)$

Анализ графических зависимостей показывает, что величина максимальной силы P увеличивается при увеличении скорости перемещения пуансона V и уменьшении угла наклона фланца патрубка α. Так, с увеличением скорости перемещения инструмента V от 0,01 до 10 мм/с величина максимальной силы P увеличивается в 3,2 раза для алюминиевого АМг6 и в 2,1 раза для титанового ВТ6 сплава. Увеличение угла наклона фланца патрубка α от 0 до 20° приводит к снижению величины максимальной силы P на 20 % для сплава АМг6 и на 15% для сплава ВТ6.

На рис. 4 представлены графические зависимости силы операции P от коэффициента трения на контактных поверхностях инструмента и заготовки μ.

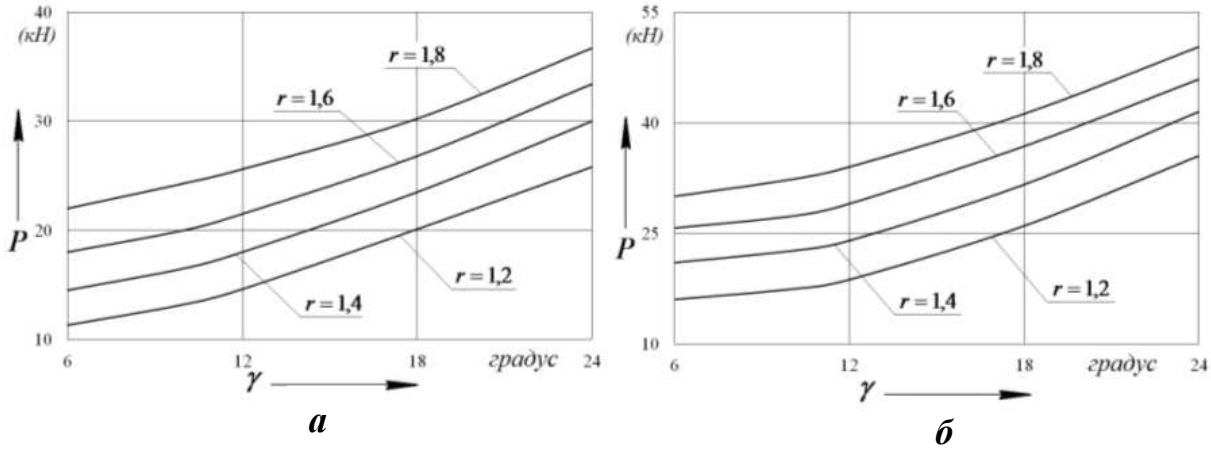
Уставлено, с увеличением коэффициента трения μ величина максимальной силы P возрастает. Так, с увеличением коэффициента трения μ от 0,01 до 0,2 величина максимальной силы P увеличивается в 1,7 раза для алюминиевого АМг6 и в 1,55 раза для титанового ВТ6 сплава.

На рис. 5 представлены графические зависимости максимальной силы операции P от редукции r и угла конусности пуансона γ.



а ***б***

Рис. 4. Графические зависимости P от μ при обратном выдавливании: а - сплав АМг6; б - сплав ВТ6 ($r = 1{,}32$; $\gamma = 10^{\circ}$; $V = 0{,}1 мм/с$)



а ***б***

Рис. 5. Графические зависимости P от γ при обратном выдавливании: а - сплав АМг6; б - сплав ВТ6 ($\mu = 0{,}05$; $\alpha = 10^{\circ}$; $\mu = 0{,}05$)

Анализ графических зависимостей показывает, что величина максимальной силы P увеличивается при увеличении редукции r и угла конусности пуансона γ. Так увеличение коэффициента редукции r от 1,2 до 1,8 приводит к росту величины максимальной силы P в 1,5-1,9 раза, а увеличение угла конусности γ от 6 до 24° приводит к увеличению P в 1,7-2,1 раза для сплавов АМг6 и ВТ6.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке технологии производства патрубков с наклонным фланцем из малопластичных материалов в режиме кратковременной ползучести.

Список литературы

1. Чудин В.Н., Яковлев С.С., Корнюшина М.В. Математическая модель операции отбортовки отверстия в листовых анизотропных заготовках в режиме кратковременной ползучести // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2013. Вып. 4. С. 66-77.

2. Яковлев С.С., Чудин В.Н., Корнюшина М.В. Математическая модель операции изотермической осесимметричной прошивки патрубка из анизотропного материала в режиме кратковременной ползучести // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2013. Вып. 7. Ч. 2. С. 181-188.

3. Изотермическое деформирование высокопрочных анизотропных материалов / С.П. Яковлев [и др.]. М.: Машиностроение, 2004. 427 с.

Черняев Алексей Владимирович, д-р техн. наук, проф, mpf-tula@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Нгуен Ван Тинь, магистрант, tinhnguyenvan1003@gmail.com, Россия, Тула, Тульский государственный университет

POWER MODES ISOTHERMAL RETURN EXTRUSION TUBE FLANGE

A.V. Chernyaev, V.T. Nguyen

The results of modeling the isothermal revers extrusion tube with inclined flange finite element method based on QFORM 2D / 3D software. The influence of process parameters on the power modes reverse extrusion are found.

Key words: modeling, transient creep, reverse extrusion, finite element method, power modes.

Chernyaev Aleksey Vladimirovich, doctor of technical sciences, professor, mpf-tula@rambler.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Nguyen Van Tinh, magistrant, tinhnguyenvan1003@gmail.com, Russia, Tula, Tula State University

УДК 621.983:539.374

ВЫТЯЖКА КОНИЧЕСКИЧЕСКОЙ ОБЛИЦОВКИ ИЗ ЛИСТОВОЙ ЗАГОТОВКИ

А.Е. Киреева, О.Н. Митин, Т.А. Ялхимова

В статье рассмотрен процесс получения конических облицовок вытяжкой из листовых заготовок с обоснованием выбора количества операций.

Ключевые слова: коническая облицовка, листовая заготовка, вытяжка, матрица, пуансон, деформация, обработка металлов давлением.

Кумулятивные заряды [2] из-за высокой пробивной способности получили широкое распространение, как в военной технике, так и в нефтедобывающей и металлургической промышленностях.

Важнейшем элементом кумулятивного заряда во многом определяющую ее пробивную способность является облицовка кумулятивной выемки. При этом повышение пробивного действия кумулятивного заряда существенно зависит от физико-механических свойств материала облицовки и технологии ее изготовления.

В настоящее время наибольшее распространение получили медные облицовки конической формы (рис.1).

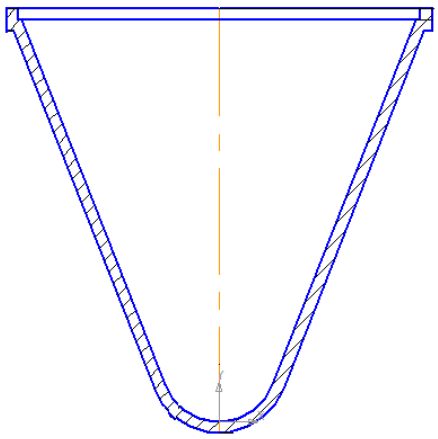


Рис. 1. Коническая облицовка

Рассмотрим один из способов ее получения вытяжкой из листовой заготовки.

Расчеты производились с помощью программного комплекса QForm 2D/3D [1].

Геометрия получаемого изделия близка к конической, поэтому целесообразно воспользоваться рекомендациями по вытяжке конических деталей, приведённых в справочнике В.П. Романовского [3].

Процесс вытяжки конических деталей выполняется по-разному, в зависимости от относительной высоты и конусности их и относительной толщины материала.

Согласно рекомендациям В.П. Романовского данное изделие можно отнести к высоким конусным деталям, так как $\frac{h}{D}=1$. Вытяжка таких деталей происходит за несколько последовательных операций, при этом в начале вытягивается полуфабрикат поверхностью равной или несколько больше поверхности конической детали, при чем размеры борта равны размерам бортов конуса.

Затем за каждую последовательную операцию вытягивается всеувеличивающая часть конической поверхности (рис. 2).

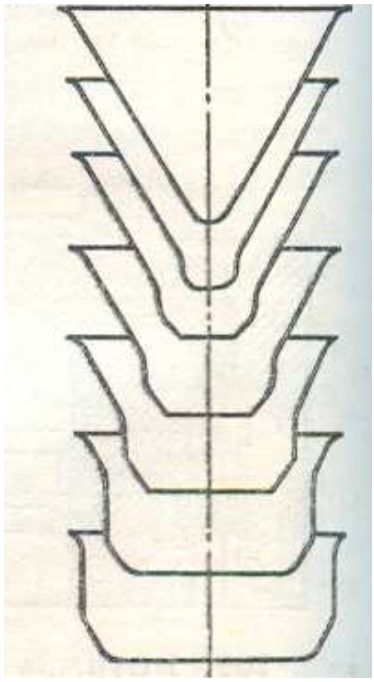


Рис. 2. Многопереходная вытяжка высоких конических деталей

Однако все эти рекомендации справедливы для конических изделий с постоянной толщиной стенки и дна. Геометрия же получаемого изделия, характеризуется разбросом толщины от 0.61мм до 1.55мм.

Если в качестве исходной толщины заготовки величину равную 0.6 мм, то диаметр исходной заготовки будет равен 72мм. В этом случае для вытяжки конической детали такой толщины потребуется 9 переходов и при этом ее высота будет намного выше, чем высота требуемого изделия, что позволяет говорить о невозможности использования заготовки данной толщины.

Второй вариант вытяжки предполагает использование заготовки с толщиной 1.55мм и диаметром 45,4мм.

Пооперационное изменение геометрии заготовки показаны на рис. 3. При этом на шестой операции использовался пуансон, формой соответствующей готовому изделию.

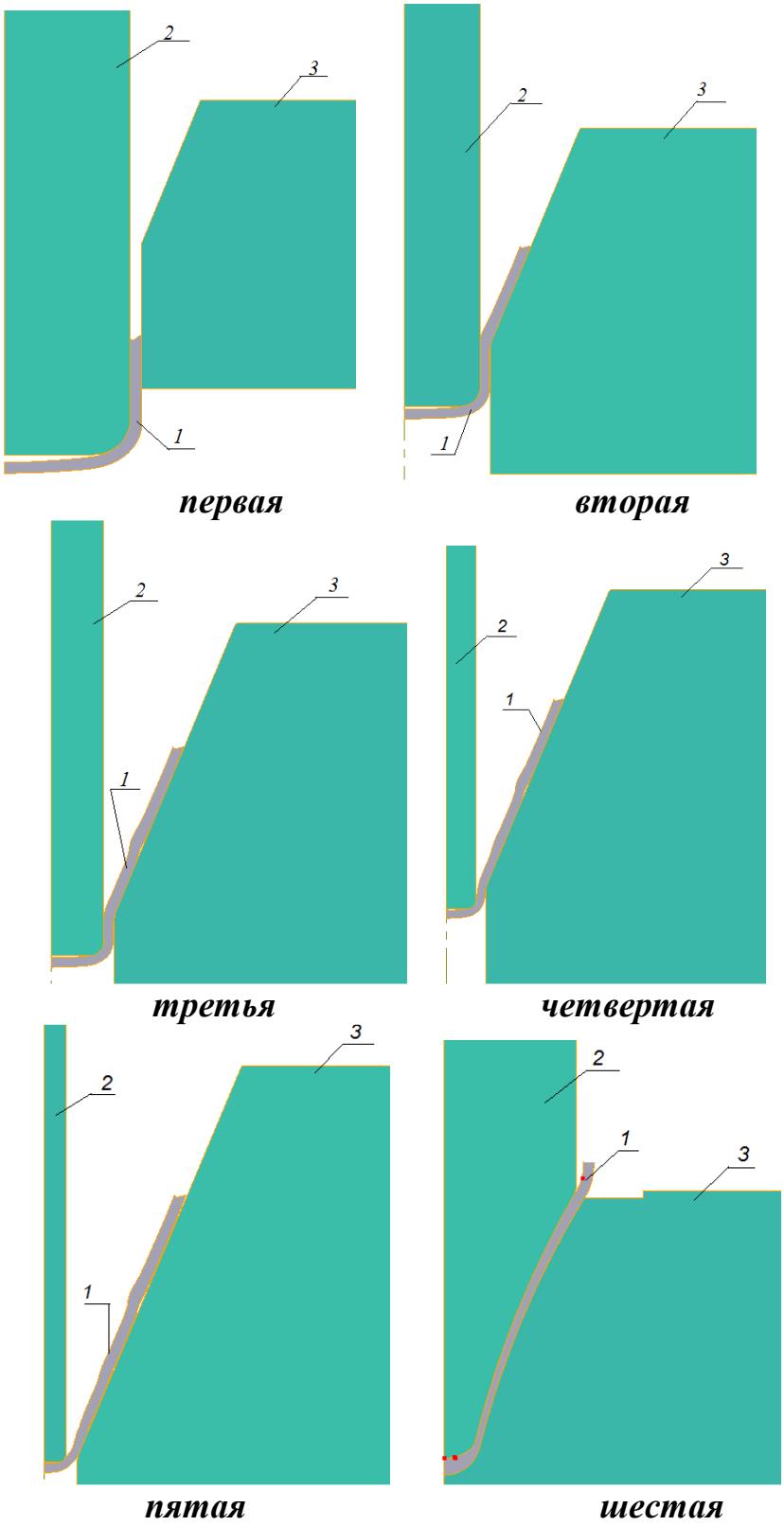


Рис. 3. Пооперационное изменение геометрии заготовки (1) после дефорамции цилиндрическим пуансоном (2) через матрицу (3)

Максимальное усилие процесса составило 1.5 МН на шестой операции деформирования (рис.4).

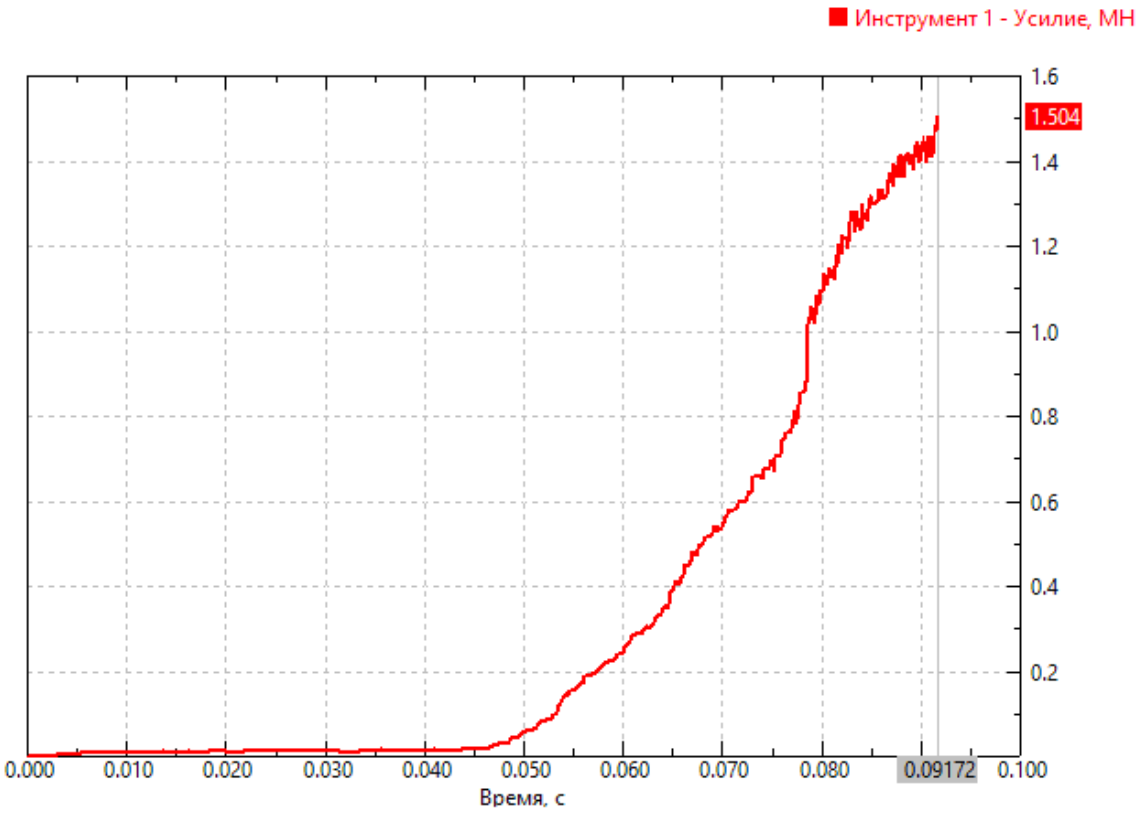


Рис. 4. Усилие процесса деформирования заготовки на пятой операции

Анализ рассмотренного технологического процесса показал, что он включает в себя 6 технологических переходов с промежуточными термическими операциями, что ведет к значительным затратам на изготовление технологической оснастки и увеличению трудоемкости процесса.

Работа выполнена в рамках гранта РФФИ 16-48-710824 и гранта правительства Тульской области ДС/47 от 25.05.2016.

Список литературы

1. Биба Н.В., Стебунов С.А. «QForm 5.0 – программный инструмент для повышения эффективности производства в обработке металлов давлением». 2008.

2. Кумулятивные заряды: монография / И.В. Минин, О.В. Минин. Новосибирск: СГГА, 2013. 200 с.

3. Романовский В.П. Справочник по холодной штамповке. Л.: Машиностроение, 1979. 520 с.

Киреева Алена Евгеньевна, канд. техн. наук, доц., kirealena@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Митин Олег Николаевич, канд. техн. наук, докторант, mpf-tula@rambler.ru, Россия, Тула, ОАО «НПО «СПЛАВ»,

Ялхимова Татьяна Александровна, студент, tm@tsu.tula.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

HOOD CONCESSIONAL VENEER SHEET BLANKS

A.E. Kireeva, O.N. Mitin, T.A. Alkhimova

The article describes the process of obtaining conical wall hood from sheet blanks with a rationale for the selection of the number of operations.

Key words: bevel siding, sheet metal, hood, matrix, punch, deformation processing of metals by pressure.

Kireeva Alena Evgenevna, candidate of technical science, docent, kirealena@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Mitin Oleg Nikolayevich, candidate of technical sciences, doctoral, mpf-tula@rambler.ru, Russia, Tula, OPC "SPA "SPLAV",

Alkhimova Tatiana Aleksandrovna, student, tm@tsu.tula.ru, Russia, Tula, Tula State University

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА, ОБРАБОТКА И ЗАЩИТА ИНФОРМАЦИИ

УДК 004.932.2:004.932.72’1

ИССЛЕДОВАНИЯ ВЕЙВЛЕТОВ ГАБОРА В ЗАДАЧЕ ЛОКАЛИЗАЦИИ ТОЧЕЧНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ НА СНИМКАХ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Д.Н. Степанов

Рассмотрены вопросы поиска точечных особенностей (заранее заданных ориентиров) на снимках земной поверхности в задаче навигации беспилотного летательного аппарата по данным с видеокамеры. Для поиска ориентиров используются вейвлеты Габора. Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований вейвлетов Габора в задаче поисках известных ориентиров на видеокадрах. Разработаны методы повышения точности локализации ориентиров и другие методы оптимизации предложенного способа локализации.

Ключевые слова: визуальная навигация, вейвлеты Габора, БПЛА, точечная особенность, свертка, преобразование Фурье, билинейная интерполяция.

Введение. В настоящее время, методы и алгоритмы обработки и анализа изображений применяются для решения различных задач в промышленности, сельском хозяйстве, военном деле и др. Одна из задач, в которых подобные методы активно развиваются и применяются – сопоставление и взаимная привязка снимков земной поверхности для навигации беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Спутниковые навигационные системы (GPS/ГЛОНАСС) подвержены проблеме пропадания сигнала, а для инерциальных навигационных систем характерно накопление ошибки в вычислениях в ходе работы.

Взаимная привязка изображений сводится к поиску и сопоставлению структурных или точечных особенностей на изображениях. Структурные особенности – прямые линии, прямоугольники, окружности и др., поиск таких особенностей основан на выделении контуров на изображениях. Например, в работе [1] выполняется поиск характерных точек изгибов контуров и сопоставление отдельных участков контуров. Недостатком

структурного подхода является то, что структурные особенности относительно легко выделяются на сценах антропогенного характера, естественные ландшафты редко содержатся устойчивые ориентиры подобного рода.

В алгоритмах сопоставления точечных особенностей, вначале формируется дескриптор (описатель) точки на изображении. Первая группа таких алгоритмов - корреляционно-экстремальные алгоритмы, в них путем перебора пикселей на обрабатываемом изображении, выбирается тот пиксель, в котором достигает своего экстремума некоторая корреляционная функция для сравнения дескрипторов. Примеры различных корреляционных функций приведены в работе [2]. Однако же корреляционно-экстремальные алгоритмы слабо инвариантны к яркостным и геометрическим преобразованиям.

Во второй группе алгоритмов, на двух изображениях вначале выделяются особые точки, затем вычисляются их дескрипторы [3, 4]. Далее для каждой особой точки с первого изображения, выбирается соответствующая ей особая точка со второго изображения (на основании расстояний между дескрипторами). Недостаток подобных алгоритмов состоит в том, что инвариантный дескриптор можно вычислить только для той точки, которая выбрана алгоритмом в качестве особой. Если точка задана вручную, то инвариантность дескриптора не гарантируется.

Третья группа алгоритмов сопоставления точечных особенностей основана на вычислении оптического потока, пример - алгоритм Лукаса-Канаде и его развитие [5]. Но алгоритмы оптического потока изначально были разработаны для сопоставления изображений, которые незначительно различаются между собой по яркости, масштабу и ориентации (смежные кадры видео). В случае же сопоставления эталонного изображения местности и видеокадра с БПЛА подобные различия могут быть существенными.

В задачах обработки и анализа снимков земной поверхности достаточно широко используются искусственные нейронные сети (ИНС), примерами подобных работ являются статьи [6, 7]. Работа ИНС хорошо распараллеливается, и они обладают хорошей различающей способностью, но для них характерен ряд недостатков, ограничивающих их применение в задаче визуальной навигации. В частности, отсутствуют математически строгие методы выбора оптимальной структуры сети для решения конкретной прикладной задачи. Процесс обучения ИНС может занимать довольно длительное время. Для успешного распознавания, требуется как можно большее количество эталонных изображений: если точечная особенность представлена небольшим числом эталонов (или всего лишь одним), эффективность ИНС резко снижается.

Таким образом, актуальной является разработка методов сопоставления особенностей на снимках земной поверхности, которые были бы свободны от недостатков существующих методов. Данная работа продол-

жает цикл публикаций, посвященных результатам исследований и разработок методов и алгоритмов навигации БПЛА по видео, которые основаны на использовании эталонных изображений подстилающей поверхности. На эталонных изображениях предварительно выделяются точечные особенности с известными 3D-координатами в глобальной системе координат (опорные точки), для каждой опорной точки вычисляется ее дескриптор с помощью вейвлетов Габора. В процессе работы камеры на БПЛА, опорные точки детектируются на видеокадрах [8].

В настоящей работе представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований вейвлетов Габора в задаче локализации опорных точек на видеопоследовательности снимков земной поверхности. Эксперименты выполнены с применением полунатурных данных: видеоролики генерировались с помощью трехмерных моделей земной поверхности, 3D-модель состоит из спутникового снимка, а также карты высот.

Вейвлеты Габора, методика позиционирования видеокамеры с помощью локализации опорных точек. Вейвлеты (фильтры) Габора широко используются в распознавании символов, биометрических системах безопасности и обладают относительной устойчивостью к яркостным и геометрическим преобразованиям изображений. Импульсная переходная характеристика фильтров Габора имеет следующий вид [9]:

$$g_{vu}(x,y)=\frac{k_v^2}{4\pi^2}\cdot e^{\left(-\frac{k_v^2}{4\pi^2}\cdot\frac{\left(x^2+y^2\right)}{2}\right)}\cdot\left(\cos\left(k_v\cdot x_u\right)-e^{-2\pi^2}\right)$$

$$x_u=x\cos\left(\phi_u\right)+y\sin\left(\phi_u\right),\ k_v=\frac{\pi}{2\cdot\left(\sqrt{2}\right)^v},\quad \phi_u=u\cdot\frac{\pi}{8}\quad ,$$

$$v\in\{0,1,2,3,4\},\quad u\in\{0,1,2,3,4,5,6,7\}$$

где u – параметр, определяющий масштаб фильтра; v – ориентацию фильтра. Всего $5\times8=40$ фильтров (5 различных масштабов и 8 различных ориентаций). Дискретный вариант фильтра – квадратная маска определенного размера. Результат свертки всех фильтров с некоторой областью изображения – набор вещественных чисел, так называемый джет, его можно использовать в качестве дескриптора пикселя в центре области (размер области совпадает с размером масок). Сравнение джетов с двух изображений позволяет сопоставлять точечные особенности между ними [10].

Кратко изложим методику вычисления положения и ориентации видеокамеры, подробно описанную в статьях [8, 11, 12]:

1. На этапе предподготовки данных, из эталонного изображения местности создается пирамида изображений, разделенных на небольшие фрагменты (тайлы). Подобное представление позволяет выполнять взаимную привязку видеокадров местности с эталонными изображениями зна-

чительных размеров. На каждом тайле каждого слоя пирамиды детектируются особые точки с помощью алгоритма SURF [3], и вычисляются SURF-дескрипторы особых точек.

2. Среди особых точек, найденных на тайле, выбираются несколько и принимаются в качестве опорных точек. Для каждой опорной точки вычисляются ее 3D-координаты (с помощью карты высот), а также джет Габора.

3. На этапе решения задачи позиционирования по видео, для каждого видеокадра, на кадре выделяются особые точки и сопоставляются с особыми точками, предварительно найденными на эталонном изображении. После получения множества пар общих особых точек, вычисляется фундаментальная матрица F [13], связывающая видеокадр и эталонное изображение.

4. С помощью матрицы F, а также информации о вычисленном положении, ориентации и скорости БПЛА для предыдущего кадра видеоряда, выполняется геометрическая коррекция текущего кадра. Далее, для каждой опорной точки, которая может попасть в поле зрения видеокамеры для текущего кадра, вычисляется примерное положение точки на кадре, а также радиус поиска – определяется область поиска опорной точки, обозначим ее как U.

5. Для каждого пикселя из области U, вычисляется его джет Габора и выполняется его сравнение с джетом, вычисленным для опорной точки на эталонном изображении местности. Тот пиксель на видеокадре, для которого корреляционная функция сравнения джетов достигает своего максимума (минимума), выбирается в качестве координат опорной точки на текущем видеокадре.

6. После нахождения координат достаточного количества опорных точек на текущем кадре, задача определения положения и ориентации камеры сводится к задаче внешней калибровки [14]. Исходными данными в этой задаче является множество пар вида «2D-координаты опорной точки на видеокадре – 3D-координаты опорной точки в глобальной системе координат».

Использование билинейной интерполяции для повышения точности локализации опорных точек. В целях повышения точности определения координат опорных точек, было решено исследовать возможность перебора пикселей с более мелким шагом – 0.5 пикс., с использованием билинейной интерполяции яркости пикселей на видеокадре. Если (x, y) - целочисленные координаты некоторого пикселя, а δx и δy - вещественные числа из диапазона $(0\ldots1)$, то интерполированное значение функции яркости f в точке $(x+\delta x, y+\delta y)$ равно

$$f(x+\delta x, y+\delta y) = (1-\delta x)\cdot(1-\delta y)\cdot f(x,y) + \\ + \delta x\cdot(1-\delta y)\cdot f(x+1,y) + \delta x\cdot\delta y\cdot f(x+1,y+1) + \\ + (1-\delta x)\cdot\delta y\cdot f(x,y+1). \quad (1)$$

Результат свертки дискретной функции (изображения) f с маской g размером $r\times r$ определяется как

$$Z(x+\delta x, y+\delta y) = \sum_{i=-r}^{+r}\sum_{j=-r}^{+r} f(x+\delta x+i, y+\delta y+j)\cdot g(r+i, r+j). \quad (2)$$

Преобразуем выражение (2) с учетом выражения (1)

$$Z(x+\delta x, y+\delta y) = \sum_{i=-r}^{+r}\sum_{j=-r}^{+r} g(r+i,r+j)\cdot((1-\delta x)(1-\delta y)\cdot f(x+i,y+j) + \\ + \delta x(1-\delta y)\cdot f(x+1+i,y+j) + \delta x\delta y\cdot f(x+1+i,y+1+j) + \\ + (1-\delta x)\delta y\cdot f(x+i,y+1+j)),$$

$$Z(x+\delta x, y+\delta y) = (1-\delta x)(1-\delta y)\cdot\sum_{i=-r}^{+r}\sum_{j=-r}^{+r} g(r+i,r+j)\cdot f(x+i,y+j) + \\ + \delta x(1-\delta y)\cdot\sum_{i=-r}^{+r}\sum_{j=-r}^{+r} g(r+i,r+j)\cdot f(x+1+i,y+j) + \\ + \delta x\delta y\cdot\sum_{i=-r}^{+r}\sum_{j=-r}^{+r} g(r+i,r+j)\cdot f(x+1+i,y+1+j) + \\ + (1-\delta x)\delta y\cdot\sum_{i=-r}^{+r}\sum_{j=-r}^{+r} g(r+i,r+j)\cdot f(x+i,y+1+j),$$

$$Z(x+\delta x, y+\delta y) = (1-\delta x)(1-\delta y)\cdot Z(x,y) + \\ + \delta x(1-\delta y)\cdot Z(x+1,y) + \delta x\delta y\cdot Z(x+1,y+1) + \\ + (1-\delta x)\delta y\cdot Z(x,y+1).$$

Как видим, для вычисления джета Габора для точки на исходном изображении, имеющей нецелочисленные координаты, необязательно интерполировать яркости пикселей исходного изображения. Достаточно получить матрицу - результаты свертки исходного изображения с маской, а затем проводить билинейную интерполяцию значений полученной матрицы.

В табл. 1 приведены результаты серии экспериментов по визуальной навигации с использованием сгенерированных видеопоследовательностей, с использованием различных шагов перебора пикселей на видеокадрах (некоторые подробности и разъяснения касательно экспериментов также можно найти в статье [8]). Размер масок для фильтров Габора - 19×19. Как видим, более мелкий шаг перебора незначительно увеличивает

время поиска, но уменьшает погрешность с локализации опорных точек, и как следствие – уменьшает погрешность в определении положения видеокамеры.

Таблица 1

Сравнение результатов локализации опорных точек и решения задачи визуальной навигации

Параметр	Шаг перебора пикселей на видеокадре	
	1 пикс.	0.5 пикс.
Время поиска одной опорной точки, мсек.	23...47	24...60
Погрешность в определении координат опорных точек, пикс.	0.06...2.02	0.03...1.77
Максимальная погрешность в позиционировании, м.	4.5	3

Использование различных корреляционных функций для сравнения джетов. Первоначально в качестве корреляционной функции между двумя джетами использовался косинус угла между векторами [10]:

$$S_1\left(\vec{A},\vec{B}\right)=\frac{\sum\limits_{i=1}^{40} A_i\cdot B_i}{\sqrt{\sum\limits_{i=1}^{40} A_i^2}\cdot\sqrt{\sum\limits_{i=1}^{40} B_i^2}}, \qquad (3)$$

где $\vec{A}$ - джет Габора, вычисленный для некоторой точки с первого (эталонного) изображения; $\vec{B}$ - джет, вычисленный для точки со второго (исследуемого) изображения. Было решено опробовать корреляционную функцию, основанную на вычислении евклидова расстояния между двумя джетами, которые предварительно нормируются:

$$\tilde{A}_i=\frac{A_i}{\left\|\vec{A}\right\|},\ \tilde{B}_i=\frac{B_i}{\left\|\vec{B}\right\|},$$

$$S_2\left(\vec{A},\vec{B}\right)=\sqrt{\sum_{i=1}^{40}\left(\tilde{A}_i-\tilde{B}_i\right)^2}.$$

В случае использования функции S_1, для выбора пикселя на видеокадре решалась задача максимизации корреляционной функции. В случае же использования функции S_2, корреляционную функцию необходимо минимизировать.

Результаты экспериментов показали, что предложенные корреляционные функции на всех тестах имеют одинаковую погрешность в локализации опорных точек, и как следствие – точность определения положения и ориентации камеры также одинакова. Но поиск одной опорной точки с функции S_1 занимал в среднем 1-2 миллисекунды меньше (в случае перебора с шагом в 0.5 пикс – на 1-6 миллисекунд меньше). Функция S_1 является более предпочтительной, поскольку для ее вычисления требуется меньше вычислительных операций.

Исследование влияния количества используемых фильтров Габора на точность определения положения. Было решено исследовать следующую проблему: есть ли необходимость применять все 40 различных вейвлетов Габора для вычисления дескриптора точки, можно ли уменьшить количество используемых вейвлетов, сохранив при этом приемлемую точность локализации опорных точек и точность определения положения камеры? Рассмотрено 16 наборов различных масштабов и 8 наборов различных ориентаций вейвлетов Габора – всего $16\times 8 = 128$ различных наборов:

$$scales = \begin{Bmatrix} \{0,1,2,3,4\},\{0,1,2,3\},\{1,2,3,4\},\{0,1,2\},\{1,2,3\},\{2,3,4\},\{0,2,4\} \\ \{0,1\},\{1,2\},\{2,3\},\{3,4\},\{0,2\},\{2,4\},\{0,3\},\{0,4\},\{0\} \end{Bmatrix},$$

$$orientations = \begin{Bmatrix} \{0,1,2,3,4,5,6,7\},\{0,2,4,6\},\{1,3,5,7\}, \\ \{0,3,6\},\{1,4,7\},\{0,4\},\{0,7\},\{0\} \end{Bmatrix}.$$

Эксперименты проводились для различных маршрутов полета на разных высотах ($300, 400, 500, \ldots 2400$ м.). В табл. 2 приведены погрешности в позиционировании при использовании различных наборов масштабов и ориентаций фильтров (в метрах), для высот полета 300 м., а в табл. 3 – для высоты полета 2400 м. В качестве корреляционной функции использовалась функция S_1, перебор пикселей на видеокадре шел с шагом в 0.5 пикс, размер масок для фильтров Габора – 19×19. Показаны результаты не для всех наборов масштабов (для остальных наборов, погрешность при позиционировании оказалась велика при использовании любых наборов ориентаций).

Результаты экспериментов позволили разработать систему правил для принятия решений о выборе подмножества фильтров Габора, с целью уменьшения времени счета при сохранении приемлемой точности позиционирования:

– для высот полета <1000 м. достаточно использовать 16 фильтров: масштабы $\{0,1,2,3\}$ и ориентации $\{1,3,5,7\}$;

– для высот полета 1000-2000 м. достаточно 20 фильтров: масштабы $\{0,1,2,3,4\}$ и ориентации $\{1,3,5,7\}$;

– для высот полета >2000 м. необходимы все 40 фильтров.

Таблица 2

Зависимость погрешности при позиционировании камеры от набора используемых масштабов и ориентаций фильтров Габора (в метрах, высота полета – 300 м)

Масштабы фильтров	Ориентации фильтров							
	0 1 2 3 4 5 6 7	0 2 4 6	1 3 5 7	0 3 6	1 4 7	0 4	0 7	0
0 1 2 3 4	0.43	0.42	0.46	0.42	0.48	0.53	0.61	8.00
0 1 2 3	0.43	0.42	0.47	0.42	0.44	7.83	8.34	12.76
1 2 3 4	0.54	0.48	0.46	0.44	0.52	1.00	0.64	3.89
0 1 2	0.38	3,09	0.44	5.78	2.82	13.55	14.87	15.04
1 2 3	0.53	0.45	0.47	0.46	0.52	8.42	15.6	17.67
2 3 4	0.42	0.42	0.44	0.45	0.46	0.90	3.57	5.60
0 2 4	0.43	0.37	2.29	2.29	0.54	4.65	7.72	8.83
0 1	1.11	46.21	19.48	33.99	31.49	18.90	45.60	37.57
1 2	0.40	6.39	6.18	42.59	6.95	22.76	39.39	57.90

Таблица 3

Зависимость погрешности при позиционировании камеры от набора используемых масштабов и ориентаций фильтров Габора (в метрах, высота полета – 2400 м)

Масштабы фильтров	Ориентации фильтров							
	0 1 2 3 4 5 6 7	0 2 4 6	1 3 5 7	0 3 6	1 4 7	0 4	0 7	0
0 1 2 3 4	1.49	8.55	15.76	40.53	28.04	21.91	42.94	43.34
0 1 2 3	9.87	27.93	32.93	17.21	42.67	43.95	58.27	83.08
1 2 3 4	1.89	1.81	2.39	42.87	6.93	17.87	50.24	60.03
0 1 2	9.71	24.42	22.97	37.50	56.43	75.18	52.66	83.18
1 2 3	2.72	25.79	39.41	49.86	25.14	52.62	52.03	70.66
2 3 4	38.14	32.50	38.22	6.97	2.77	24.49	31.92	47.20
0 2 4	19.33	20.18	22.88	41.27	25.91	57.21	72.66	83.18
0 1	24.94	46.22	43.26	78.46	61.74	69.80	73.30	108.38

Аналогичные эксперименты были поставлены при использовании масок размером 27×27 для фильтров Габора, итоговая точность позиционирования во всех случаях оказалась примерно такой же, как и при использовании масок 19×19.

Оптимизация вычисления джетов Габора с использованием быстрого преобразования Фурье. В теории обработки изображений известно, что результат свертки изображения с некоторой маской аналогичен результату выполнения следующей процедуры:

– для исходного изображения и маски выполняется прямое преобразование Фурье (в частности, быстрое преобразование Фурье – БПФ [15]);

– Фурье-образы изображения и маски поэлементно перемножаются;

– к результату поэлементного перемножения применяется обратное преобразование Фурье.

Непосредственная свертка изображения с маской имеет алгоритмическую сложность $O\left(N^2\right)$, а БПФ - $O\left(N \cdot \log N\right)$. Для свертки области U с видеокадра с каждым из 40 фильтров Габора использовалась функция *cv::filter2D* из библиотеки OpenCV [16], в которой для небольших масок (размером меньше 11×11) используется непосредственная свертка, а для масок большего размера – процедура на основе БПФ.

Была проведена следующая оптимизация:

– для области U вычисляется ее Фурье-образ. Пусть размер области U равен $w \times h$ пикселей;

– для каждого из 40 фильтров Габора, вычисляется его Фурье-образ. Предварительно, каждая маска расширяется до размеров $w \times h$ путем добавления состоящих из нулей строк и столбцов, справа и снизу;

– Фурье-образ каждого из 40 фильтров Габора поэлементно перемножается с Фурье-образом области U;

– к каждому из результатов перемножения Фурье-образов применяется обратное преобразование Фурье.

В таком алгоритме Фурье-образ области U вычисляется только один раз, при использовании функции *cv::filter2D* он будет вычисляться при каждой свертке области U с некоторым фильтром Габора. Была предложена идея вычислять Фурье-образы всех фильтров Габора всего один раз при запуске программы, но от данной идеи пришлось отказаться: размеры области U (область поиска опорной точки на видеокадре) не являются постоянными и меняются между кадрами. Для поэлементного перемножения Фурье-образов необходимо, чтобы размеры образов совпадали.

Результаты экспериментов показали, что предложенная оптимизация позволяет сократить время поиска одной опорной точки в среднем на 2-10 миллисекунд (20-80%).

Исследование устойчивости предложенного метода поиска опорных точек к линейным преобразованиям яркости. Одним из видов шумов на изображениях является изменение яркости (освещенности): снимок становится более тусклым или наоборот, более ярким. Покажем, что метод сравнения джетов с помощью корреляционной функции S_1 (3) устойчив к изменениям яркости обрабатываемого изображения, которые можно промоделировать по следующей формуле:

$$\tilde{f}\left(x, y\right) = a \cdot f\left(x, y\right), \qquad (4)$$

где $f(x,y)$ – исходное изображение; $\tilde{f}(x,y)$ – преобразованное изображение; a – неизвестный положительный коэффициент. Вычислим, чему равен результат свертки области изображения $\tilde{f}(x,y)$ с некоторым фильтром Габора, имеющим порядковый номер k. Используем свойство операции свертки:

$$\tilde{Z}_k(x,y) = \sum_{i=-r}^{+r}\sum_{j=-r}^{+r} \tilde{f}(x+i,y+j)\cdot g_k(r+i,r+j) =$$

$$= \sum_{i=-r}^{+r}\sum_{j=-r}^{+r} a\cdot f(x+i,y+j)\cdot g_k(r+i,r+j) =$$

$$= a\cdot \sum_{i=-r}^{+r}\sum_{j=-r}^{+r} f(x+i,y+j)\cdot g_k(r+i,r+j) =$$

$$= a\cdot Z_k(x,y).$$

Нетрудно заметить, что вектор-джет Габора $\tilde{\vec{B}}(x,y)$, составленный из откликов всех фильтров Габора на пиксель с координатами (x,y) изображения $\tilde{f}(x,y)$, равен вектору-джету, вычисленному для исходного изображения в этом же пикселе и домноженному на число a:

$$\tilde{\vec{B}}(x,y) = a\cdot \vec{B}(x,y).$$

Если в формуле (3) один из векторов домножить на ненулевое число, то значение корреляционной функции S_1 не изменится:

$$S_1(\vec{A}, a\cdot\vec{B}) = \frac{\sum_{i=1}^{40} A_i\cdot a\cdot B_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^{40} A_i^2}\cdot\sqrt{\sum_{i=1}^{40}(a\cdot B_i)^2}} = \frac{a\cdot\sum_{i=1}^{40} A_i\cdot B_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^{40} A_i^2}\cdot\sqrt{\sum_{i=1}^{40} a^2\cdot B_i^2}} =$$

$$= \frac{a\cdot\sum_{i=1}^{40} A_i\cdot B_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^{40} A_i^2}\cdot\sqrt{a^2\cdot\sum_{i=1}^{40} B_i^2}} = \frac{a\cdot\sum_{i=1}^{40} A_i\cdot B_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^{40} A_i^2}\cdot\sqrt{a^2}\cdot\sqrt{\sum_{i=1}^{40} B_i^2}} = S_1(\vec{A},\vec{B}).$$

В ходе проведения экспериментальных исследований, моделировалось изменение освещенности путем изменения яркости пикселей на видеокадрах с помощью формулы (4). Точность локализации опорных точек, а вместе с ней и точность позиционирования БПЛА практически не менялась как при уменьшении яркости видеокадров, так и при увеличении. Коэффициент a варьировался в диапазоне от 0.7 до 1.3.

Заключение. Результаты теоретических и экспериментальных исследований показали, что вейвлеты Габора являются эффективным средством локализации точечных особенностей на изображениях земной поверхности и могут применяться при решении задачи навигации БПЛА по видеопоследовательностям. Предложен способ повышения точности локализации с использованием билинейной интерполяции и уменьшения шага перебора пикселей. Исследован вопрос выбора оптимального набора вейвлетов Габора с целью уменьшения времени локализации при сохранении точности. Показано повышение эффективности локализации при использовании быстрого преобразования Фурье для вычисления джетов Габора.

В дальнейших исследованиях планируется рассмотреть вопрос объединения метода сопоставления особых точек на смежных видеокадрах (на основе алгоритма Лукаса-Канаде) с предложенной методикой поиска опорных точек на изображениях с использованием вейвлетов Габора.

Список литературы

1. Муратов В.И. Алгоритмы предварительной обработки изображений в системах комбинированного видения летательных аппаратов // дисс. канд. техн. наук, Рязань. 2013. 177 с.

2. Ahuja S. Correlation based similarity measures - Summary [Электронный ресурс]. URL: https://siddhantahuja.wordpress.com/tag/sum-of-absolute-differences-sad (дата обращения: 09.10.2016).

3. Bay H., Ess A., Tuytelaars T., Van Gool L. SURF: Speeded Up Robust Features // Computer Vision and Image Understanding (CVIU). Vol. 110. №. 3. 2008. 14 p.

4. Lowe D.G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints // International Journal of Computer Vision. Vol. 60. Issue 2. 2004. P. 91–110.

5. Bouguet, J. Y. Pyramidal implementation of the Lucas Kanade feature tracker // Intel Corporation, Microprocessor Research Labs. 2000. 9 p.

6. Конкин Ю.В., Колесников А.Н. Распознавание изображений на основе текстурных признаков Харалика и искусственных нейронных сетей // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2016. Вып. 2. С. 117-122.

7. Астафуров В.Г., Скороходов А.В. Классификация облаков по спутниковым снимкам на основе технологии нейронных сетей // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Т. 8. № 1. 2011. С. 65-72.

8. Степанов Д.Н. Применение вейвлетов Габора в задаче навигации БПЛА с использованием видеокамеры // Фундаментальные исследования. № 12. Ч.1. 2015. С. 85-92.

9. Gaborextract - Gabor Wavelets Feature Extraction [Электронный ресурс]. URL: https://code.google.com/p/gaborextract/ (дата обращения: 09.10.2016).

10. Bardsley, D. Practical Framework for 3D Reconstruction and Its Applications // Thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy. University of Nottingham. 2008. 223 p.

11. Степанов Д.Н. Методы и алгоритмы определения положения и ориентации беспилотного летательного аппарата с применением бортовых видеокамер // Программные продукты и системы (международный журнал). 2014. Т. 1, № 1. [Электронный ресурс]. URL: http://swsys.ru/?page=article&id=3776 (дата обращения: 09.10.2016).

12. Степанов Д.Н. Методики сопоставления особых точек в задаче визуальной навигации БПЛА // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Вычислительная Математика и Информатика». Т.4. №4. 2015. С. 32-47.

13. Hartley R., Zisserman A. Multiple View Geometry In Computer Vision, 2nd edition // Cambridge University Press. 2003. 670 p.

14. Кравцов А., Вежневец В. Общая формулировка задачи внешней калибровки камеры // Компьютерная графика и мультимедиа. Выпуск №1(2). 2003. [Электронный ресурс]. URL: http://ict.edu.ru/ft/002404/num1krav.pdf (дата обращения: 09.10.2016).

15. Cooley J.W., Tukey J.W. An Algorithm for the Machine Calculation of Complex Fourier Series // Mathematics of Computation. 1965. P. 297–301.

16. Bradski. G., Kaehler. A.: Learning OpenCV // O'Reilly Media. 2008. 576 p.

Степанов Дмитрий Николаевич, инженер-исследователь, mitek1989@mail.ru, Россия, Переславль-Залесский, Институт программных систем им. А.К. Айламазяна РАН

RESEARCH OF GABOR WAVELETS IN THE PROBLEM OF FEATURE POINTS' LOCALIZATION ON IMAGES OF THE EARTH SURFACE

D.N. Stepanov

The issues of feature points' localization (a predetermined reference point) on the Earth's surface images in the problem of UAV's visual navigation using video camera are considered. Gabor wavelets are used to search the reference points. The results of theoretical and experimental researches of Gabor wavelets in the problem of reference points' localization on video frames are presented. Also the methods to improve localization accuracy and optimization techniques for proposed manner of feature points' localization are developed.

Key words: visual navigation, Gabor wavelets, UAV, feature points, convolution, Fourier transform, bilinear interpolation.

Stepanov Dmitry Nikolaevich, research engineer, mitek1989@mail.ru, Russia, Pereslavl-Zalessky, Program System Institute of Russian Academy of Sciences

УДК 681.518.5:681.5.08

АЛГОРИТМ РАСПОЗНАВАНИЯ НАЧАЛА ВДОХА/ВЫДОХА В СТРУКТУРЕ КОМПЛЕКСОВ КОРРЕКТИРУЮЩЕГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ДЫХАТЕЛЬНУЮ СИСТЕМУ ЧЕЛОВЕКА

Н.В. Ивахно, С.С. Федоров, А.Н. Чуков

Рассмотрена структура автоматизированных комплексов корректирующего воздействия на дыхательную систему человека, в которой осуществляется подстройка нагрузки к изменяющемуся состоянию дыхательной системы человека. Обосновано применение метода обнаружения начала инспираторной/экспираторной активности на базе теории статистических решений.

Ключевые слова: характеристика давления, регулируемое сопротивление, корректировка нагрузки, обнаружение вдоха, статистические параметры.

Создание автоматизированных адаптивных тренажерных комплексов представляет собой достаточно сложную теоретическую проблему [1]. Это, в первую очередь, связано со сложностью и изменчивостью обрабатываемых сигналов. Так как аппаратура оказывает управляющее воздействие, то одновременно должны осуществляться диагностирование состояния дыхательной системы человека, обработка результатов в реальном масштабе времени и корректировка нагрузки. Решение указанной проблемы заключается в создании научно обоснованной методологической базы, определении технических параметров аппаратуры корректирующего воздействия адаптивного типа, обладающей новыми качественными характеристиками, для обеспечения всего разнообразия областей применения в лечебной, восстановительной и спортивной медицине [2].

Обобщенная структурно-функциональная схема комплексов корректирующего воздействия на дыхательную систему (ККВДС), обеспечивающая широкий спектр применения и возможности автоматической настройки для конкретного человека приведена на рис.1.

Для выбора нагрузки на дыхательную мускулатуру пациент дышит через комплекс (рис. 1), работающий в различных режимах [1].

В процессе дыхания через регулируемое сопротивление в дыхательной трубке, соединенной с загубником, датчиками, измеряется давление в полости дыхательной трубки $P(t)$, которое через блок аналоговой обработки сигналов передается в устройство контроля и управления. В результате анализа кривой давления происходит настройка входных параметров обнаружения (амплитуда полезного сигнала as, дисперсия σ^2 и среднее значения шума $a0$) для реализации модели обработки сигнала с целью своевременного распознавания дыхательной активности и обеспечения высокой степени синхронизации дыхания и комплекса.

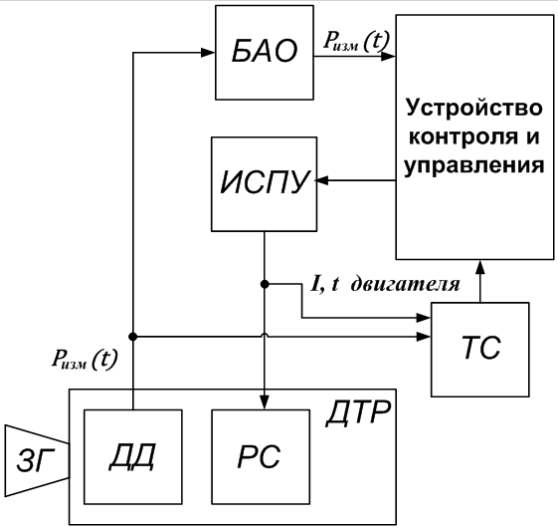


Рис. 1. Обобщенная структурно-функциональная схема комплексов корректирующего воздействия на дыхательную систему: ЗГ – загубник, ДД – система датчиков давления; РС – регулируемое сопротивление, задаваемое изменением площади сечения; ДТР – дыхательная трубка; БАО – блок аналоговой обработки сигнала; ИСПУ – исполнительное устройство; ТС – блок технического самодиагностирования

С использованием блока диагностирования состояния дыхательной системы [2], использующего методы параметрического анализа, происходит формирование сигнала управления на исполнительное устройство, осуществляющее изменение и адаптацию нагрузки (сопротивление/давления переключения) в дыхательном контуре по заданному закону с учетом индивидуального состояния пациента и его изменения. Также для длительного прогнозирования и формирования ограничений на воздействие производится математическое моделирование процессов в дыхательной системе.

В ККВДС должен обязательно включаться контур технического самодиагностирования, который необходим для обеспечения своевременной оценки и корректировки работы основных составляющих блоков комплекса [3].

В данной структуре контур самодиагностики реализует защиту исполнительного устройства от перегрузки, анализируя температуру t и ток I электродвигателя в его составе, и позволяет экстраполировать отказ, осуществляя корректировку управляющего воздействия. Одновременно происходит анализ давления в дыхательной трубке при функционировании как в дроссельном режиме, так и в пиковом, что предотвращает возможность появления баротравмы [4,5]. Блок оценки питания опережающего оповещения позволяет спрогнозировать снижение или сбой уровня питающего напряжения, своевременно сохранить текущие данные и обеспечить перезапуск и восстановление системы [3].

Одной из проблем создания адаптивных комплексов корректирующего воздействия на дыхательную систему человека для проведения лечебно-профилактических, физкультурно-оздоровительных и реабилитационных мероприятий является обнаружение начала/окончания инспираторной активности, от своевременности которого зависит как правильность параметрического анализа функциональной характеристики давления, так и задание управляющего воздействия [1, 2].

Адаптация в ККВДС проводится по двум контурам: 1-й контур обеспечивает работу обнаружителя вдоха-выдоха и основан на поиске параметров полезного сигнала и шума при ожидании начала инспираторной/экспираторной активности (рис.2), 2-й контур обеспечивает задание начальной нагрузки и выбор значения, при котором достигается наименьшее отклонение от эталонной характеристики [2, 3].

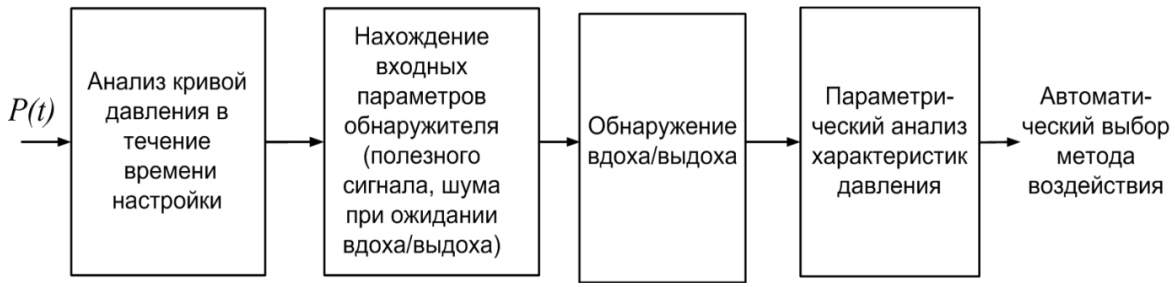


Рис. 2. Схема работы алгоритма адаптации (1-й контур)

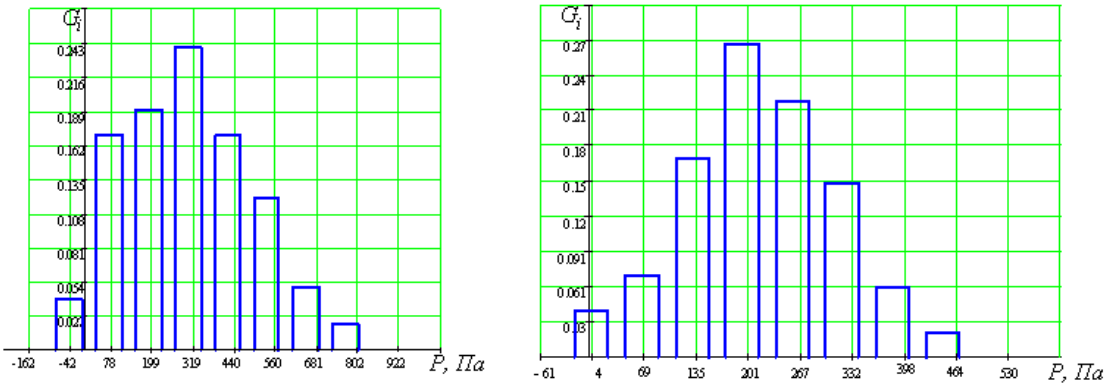
Для получения математической модели обработки сигнала при ожидании инспираторной/экспираторной активности проведены экспериментальные исследования дыхания различных пациентов с целью определения закона распределения шума (рис.3). На основе полученных эмпирических данных построены гистограммы, выдвинута гипотеза о нормальном законе распределения шума при ожидании вдоха/выдоха, которая получила подтверждение при проверке правдоподобия по критерию согласия Пирсона.

Согласно исследованиям, проведенным в [1], установлена математическая модель процесса обнаружения, при которой на каждом шаге наблюдения составляется отношение правдоподобия:

$$\ln \Lambda^{(m)} = \rho_0 \left(\frac{1}{a} \sum_{i=1}^{m} z_i - \frac{m}{2}\right), \qquad (1)$$

где $\rho_0 = \frac{a^2}{\sigma^2}$ – соотношение сигнал/шум, m – номер отсчета, $z_i = y_i - a0$, $a = as - a0$, as – амплитуда входного сигнала, $\sigma^2, a0$ – дисперсия и среднее значение аддитивной некоррелированной помехи, y_i – измеренное значение давления в дыхательном контуре [2]. Величина $\ln \Lambda^{(m)}$ сравни-

вается с двумя постоянными пороговыми значениями A и B (A>B), которые находятся, исходя из заданных условных вероятностей α^* и β^* обнаружения раньше времени (ложная тревога) и запаздывания регистрации вдоха/выдоха (пропуск сигнала) [1, 2].



а ***б***

Рис. 3. Примеры гистограмм распределения шума при ожидании начала инспираторной активности (а), экспираторной активности (б)

При принятии решения об отсутствии сигнала проводится повторный анализ до регистрации начала вдоха/выдоха в соответствии с интервалом ограничения.

Для имитационного моделирования, а затем и реализации разработанной модели регистрации начала инспираторной/экспираторной активности вероятность пропуска сигнала была получена, исходя из анализа частоты дыхания и эффективности проведения процедуры корректирующего воздействия $\alpha^* = 0.01$, вероятность ложной тревоги задана $\beta^* = 10^{-6}$. В таком случае $\ln A = 4{,}605$, $\ln B = -13{,}805$ [1].

Согласно полученной формуле (1) в комплекс корректирующего воздействия, содержащий блок измерения давления (на основе датчика дифференциального или относительного давления), введены дополнительные элементы, позволяющие реализовать адаптивный метод обнаружения начала вдоха/выдоха с учетом сторонних случайных возмущений, характерных для каждого пациента [4,5].

Учитывая данные, полученные при проведении экспериментальных исследований, установлено время настройки параметров, которое составляет 1-1,5 минуты, определяемое исходя из заданной доверительной вероятности, величины дисперсии [2,3], необходимой точности определения дисперсии.

Автоматическая настройка параметров позволяет обеспечить работу математической модели обработки сигнала при регистрации начала вдоха/выдоха. При этом, работу алгоритма можно представить в виде структурной схемы (приведена для нулевого среднего значения шума, $a = as$) (рис. 3).

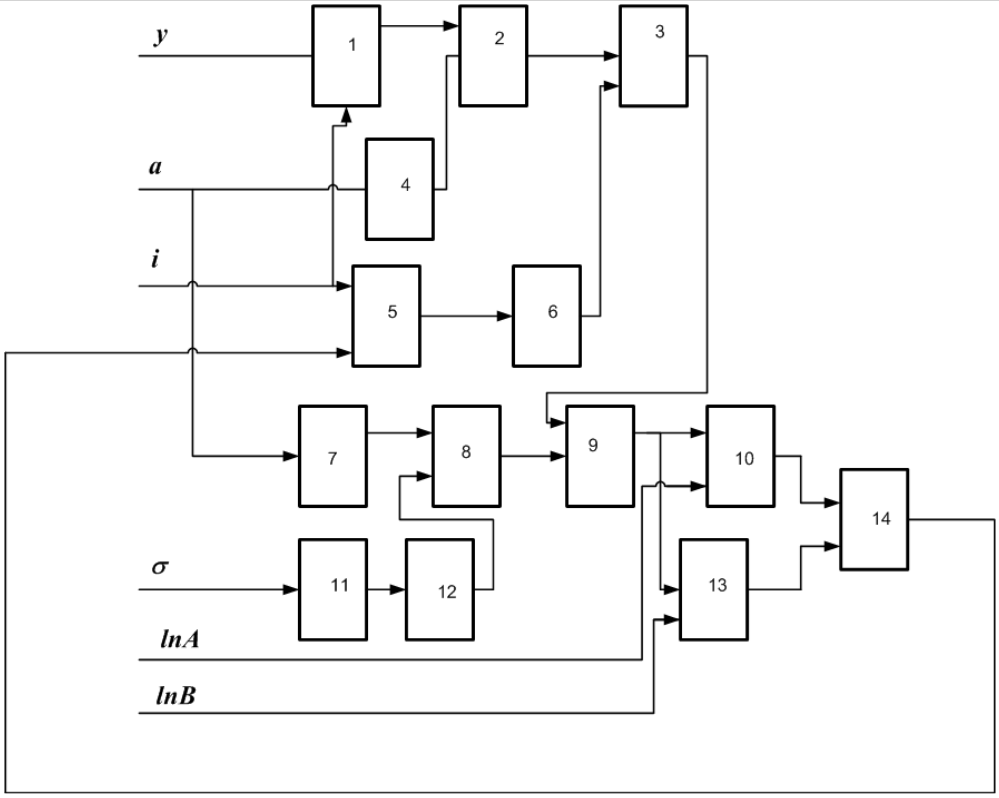


Рис. 4. Структурная схема системы обнаружения начала вдоха/выдоха

Исходными параметрами для работы этой схемы являются:

величины *lnA* и *lnB,* являющиеся постоянными для различных категорий пациентов.

σ – среднее квадратичное отклонение гауссовой аддитивной некоррелированной помехи (находится во время автоматической настройки параметров при самостоятельном дыхании пациента);

$a = as$ – значение полезного сигнала (находится во время автоматической настройки параметров и составляет 0.1 от максимального значения сигнала при вдохе/выдохе).

Устройство для регистрации начала вдоха/выдоха пациента работает следующим образом:

Дискретный сигнал Y поступает с датчика давления на накапливающий сумматор 1, выход которого соединен с умножителем 2, на другой его вход подана величина с выхода делителя 4. В тоже время происходит подсчет количества наблюдений с помощью счетчика 5. Сигнал с выхода 1 поступает одновременно с величиной $\frac{1}{a}$ (сформированной делителем 4) на двухвходовый умножитель, выход которого соединен с сумматором 3, на другой вход которого подается величина $(-\frac{m}{2})$, сформированная счетчиком наблюдений 5 и преобразователем 6. Умножитель 7 и умножитель 11 служат для формирования квадрата значения полезного сигнала *a* и

дисперсии шума σ^2. Делитель 12 формирует величину $\frac{1}{\sigma^2}$, выход которого соединен со входом двухвходового умножителя 8, на другой вход которого подана величина a^2 с выхода умножителя 7. Сигнал с выхода 8 поступает на двухвходовый умножитель 9, на который подается величина с выхода сумматора 3. Полученный сигнал поступает на устройства сравнения 10 и 13, на другие входы которых поступают пороговые значения *lnA* и *lnB*. В результате, с выхода устройств сравнения формируются сигналы, поступающие на устройство, осуществляющее логическое сложение этих сигналов. При получении на одном из входов логической единицы, формируется сигнал с выхода 14 либо продолжения наблюдения, либо его остановка [1,3].

Результаты экспериментальных исследований по вычислению значения отношения правдоподобия представлены на рис. 5.

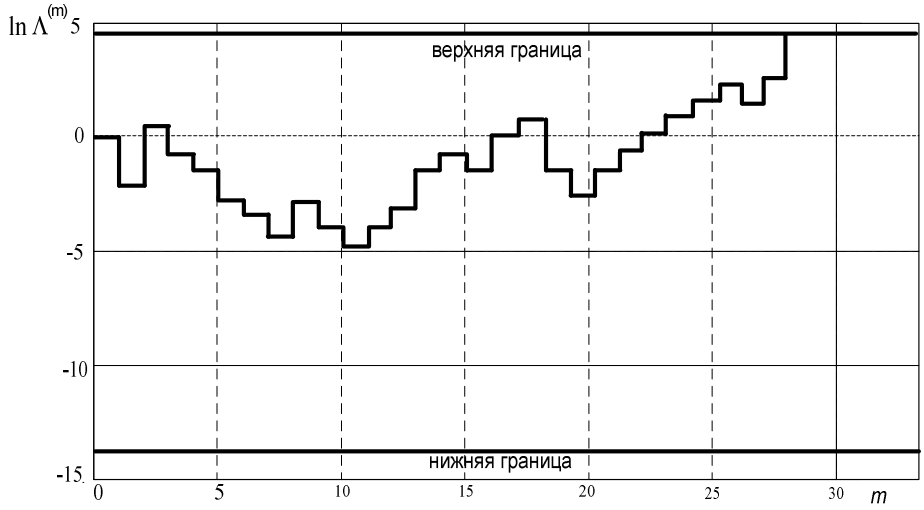


Рис. 5. Значения отношения правдоподобия на каждом шаге наблюдения по отношению к границам принятия решений (регистрация начала появления выдоха на 28 отсчете)

Экспериментальные исследования работы пациента с ККВДС показывают, что при соотношении сигнал/шум = 0.8 регистрация начала выдоха с помощью разработанной математической модели и алгоритма обработки сигнала происходит в среднем на 31 отсчете, что составляет 0.062 секунды (при частоте дискретизации 500 Гц), вдоха – на 23 отсчете – 0,046 с.

Разработанный метод и алгоритм распознавания инспираторной/экспираторной активности на базе математической модели процесса обработки сигналов, отличающийся учетом статистических параметров дыхательной системы, определяемых при предварительной настройке функционирования комплекса для каждого человека, с вычислением зна-

чения правдоподобия на каждом этапе наблюдения, уменьшает время обнаружения в 2-3 раза, что позволяет обеспечить высокую степень синхронизации с дыханием.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Администрации Тульской области в рамках научного проекта № 15-48-03247 « р_центр_а».

Список литературы

1. Ивахно Н.В., Федоров С.С. Принцип построения математической модели процесса обработки сигналов при распознавании дыхательной активности в системах интеллектуального тренажерного воздействия. //Биотехносфера, 2014. №5 (35). С.19-22.

2. Ивахно Н.В. Формирование общей совокупности информативных признаков для идентификации состояния дыхательной системы. // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2015. Вып. 8. Ч. 1. С. 106-111.

3. Ивахно Н.В. Оптимальный информационный алгоритм поиска места отказа в интеллектуальных тренажерах дыхательной мускулатуры // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. Вып. 2. 2015. С. 5-15

4. Ивахно Н.В., Чуков А.Н. Структурно-алгоритмический метод повышения надежности комплексов тренажерного воздействия на дыхательную систему // Труды международного симпозиума «Надежность и качество» в 2-х т./ под редакцией Н.К. Юркова. Том 2. Издательство: Пензенский государственный университет. Пенза, 2015. С. 254-256

5. Ивахно Н. В. Структура и алгоритм контура самодиагностики интеллектуальных тренажеров дыхательной мускулатуры // Биотехносфера, 2015. № 3 (39). С. 40 - 44.

Ивахно Наталия Валериевна, канд. техн. наук, доц., natalia_iv@list.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Федоров Сергей Сергеевич, асс., fedorovpulm@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Чуков Александр Николаевич, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой, chukov.aleksandr@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

RECOGNITION ALGORITHM INHALATION/EXHALATION START IN THE STRUCTURE OF THE COMPLEX CORRECTIVE ACTION ON THE RESPIRATORY SYSTEM OF HUMAN

N.V. Ivakhno, S.S. Fedorov, A.N. Chukov

The structure of the automated systems of corrective action on the respiratory system of a person, in which the adjustment of the load to the changing of the human respiratory system. The application of the method of detecting the start of the inspiratory / expiratory activity on the basis of statistical decision theory.

Key words: characteristics of pressure, adjustable resistance, load adjustment, detection of inspiration, the statistical parameters.

Ivakhno Natalia Valerievna, candidat of technical science, docent, natalia_iv@list.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Fedorov Sergey Sergeevich, assistant, fedorovpulm@rambler.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Chukov Aleksandr Nikolaevich, doctor of technical sciences, professor, head of chair, chukov.aleksandr@rambler.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 541.64:539.2:532.64

ЦВЕТ И ПРОЗРАЧНОСТЬ МНОГОСЛОЙНЫХ ПЛЕНОК ПОЛИЭТИЛЕНА В ПОЛЯРИЗОВАННОМ СВЕТЕ

И.Н. Ермакова

Дублированные пленочные материалы из прозрачных полимеров используются в упаковке продуктов питания, лекарственных средств и косметике, нуждающихся в защитной маркировке. Дублированные и многослойные пленки полиэтилена имеют в поляризованном свете различную окраску определяющуюся числом и толщиной слоев. Координаты цвета в цветовом пространстве (окраска в проходящем и отраженном поляризованном свете) существенно изменяются при термообработке. Показано влияние способа и температуры термообработки на цвет и прозрачность многослойной пленки полиэтилена низкой плотности.

Ключевые слова: пленочные упаковочные материалы, дублирование пленок, окраска, поляризация света, оптическая термомаркировка.

Упаковка товаров массового спроса выбираемых потребителями в торговых залах не редко определяется окраской и яркостью цвета, используемых материалов. Применяемые для изготовления гибкой упаковки товаров массового спроса пленки полиолефинов окрашиваются и маркируются на полиграфическом оборудовании с одновременной печатью текста и иных информационных символов (товарных знаков, логотипов и т.п.). Для защиты товаров от подделки используют различные способы печати и упаковочные материалы с особыми оптическими и механическими свойствами [1]. Для придания особых свойств пленкам из крупнотоннажных полимеров без существенного повышения их стоимости пленки модифицируют локальной термообработкой [2] или воздействием растворителей

на запечатываемую поверхность [3]. Наиболее экологичный и экономичной является локальная термообработка полиолефиновых пленок существенно изменяющая их оптические характеристики. Чувствительность к термообработке структур и оптических свойств пленок промышленного изготовления может быть обусловлена несколькими причинами, главными из которых являются фильерная ориентация макромолекул и неравновесность их кристаллизации при охлаждении в напряженно деформированном состоянии после экструзии расплава.

Известно, что пленки полиэтилена промышленного производства рассматриваются как неравновесно-напряженные гетерофазные системы. Показано [4], что плавление пленок из аморфно-кристаллических полимеров, а в том числе из полиэтилена, происходит не при строго определенной температуре, а в некотором интервале температур. Принято [5, 6] исходить из того, что причина этого феномена кроется в наличии у таких полимеров набора кристаллитов различных размеров, соединенных проходными цепями макромолекул. Одновременное появление фракций кристаллитов с разными температурами плавления отражает существование в кристаллизующимся полимере в определенном интервале температуры дискретного распределения проходных цепей по длине и/или их количеству в единице объема расплава. При термообработке ТО происходит перераспределение напряжений в проходных молекулах цепей и изменение габаритов кристаллитов [4].

Объекты и методы исследования. Исследовали полиэтиленовые пленки двух марок:

полиэтилен низкого давления толщиной 48,1±0,3мкм, $T_{пл}$ = 107,1ºС (ПЭ-1);

полиэтилен толщиной 51,9±0,6мкм, $T_{пл}$ = 108,5 и 121,4ºС (ПЭ-2);

линейные Полимерные поляроиды производства Загорского оптико-механического завода.

Методы исследования:

сборка пакета для изучения цветных эффектов в многослойных полимерных материалах осуществлялась по методике, описанной в [7];

измерение цветовых координат с помощью спектрофотометра СФ-2000 в проходящем поляризованном свете;

термообработка в камере хроматографа ЦВЕТ-800;

дифференциальная сканирующая калориметрия с помощью DSC Phoenix;

снимки поверхности материалов получены с помощью сканирующей электронной микроскопии на приборе JEOL JSM-7500F.

Результаты и обсуждение. Возникновение яркой окраски бесцветных прозрачные пленок из аморфно-кристаллических полимеров при прохождении поляризованного света (плеохроизм) обнаружено и предложено использовать [8, 9] при изготовлении многоцветных цветовых панелей и

световых экранов. Эффект плеохроизма связывали с внутренним напряженным состоянием и особой кристаллической структурой предельно ориентированного полипропилена [10]. Систематическое изучение оптических свойств разных пленок из полиэтиленов и полипропилена различных марок, позволило установить общий характер цветных эффектов. Разные пленки полиэтилена и полипропилена в той или иной степени дают цветные эффекты в проходящем и отраженном потоках поляризованного света. Изменение цвета полимерных полиэтиленовых пленок в поляризовонном свете в результате термообработки описано ранее [11]. Пленки полиэтилена ПЭ-1 и ПЭ-2 прозрачные и не имеющие оттенка в дневном свете, при рассмотрении в поляризованном свете обнаруживают различное окрашивание в исходном не термообработанном состоянии (рис. 1).

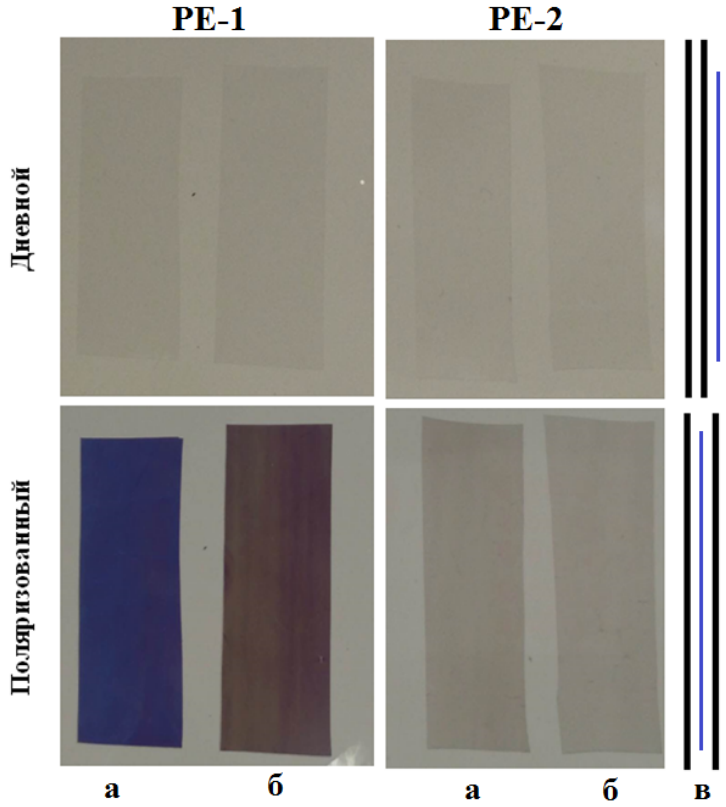


Рис. 1. Пленки полиэтилена двух марок (PE-1 и PE-2) в дневном и поляризованном свете, в исходном (а) и термообработанном (б) состоянии; в – схематичное изображение многослойного материала

Многослойная система, состоящая из двух линейных полимерных поляризаторов, направленных параллельно относительно оси поляризации, и одного слоя пленки полиэтилена ПЭ-1 между ними, имеет ярко синий цвет, в то время как пленка ПЭ-2 не дает видимого цвета в тех же условиях, т.е. практически бесцветна. Это может указывать как на различия степени вытяжки и разности величины внутренних напряжений [9], так и на

различия в аморфно-кристаллической структуре двух пленок. Механические свойства пленки исследовали с помощью разрывной машины РМ-50. Исследование показало, что пленка ПЭ-2 более анизотропна по прочностным и деформационным характеристикам и имеет большее значение предела прочности и модуля упругости, чем пленка ПЭ-1 (таблице), хотя в поляризованном свете окрашена не так интенсивно.

Механические свойства пленок полиэтилена

Тип пленки	h, мкм	Тпл., °С	Степень кристаллич. %	Модуль упругости Е, МПа		Предел прочности σ, МПа		Относительное удлинение ε, %		Анизотропия		
				∥	⊥	∥	⊥	∥	⊥	$E^{\perp}/E^{\parallel}$	$\sigma^{\perp}/\sigma^{\parallel}$	$\varepsilon^{\perp}/\varepsilon^{\parallel}$
ПЭ-1	48,1± 0,3	107.1	36	50	63	9,75	10,30	425	520	1,26	1.06	1,22
ПЭ-1 ТО	48,4± 0,5	108.8	31	53	58	10	10,75	475	590	1,1	1,07	1,24
ПЭ-2	51,9± 0,6	108,5; 121,4	37	100	105	15,75	12,2	200	775	1,05	1.3	3,9
ПЭ-2 ТО	53,0± 1.4	107.5; 120.6	36	120	105	16,3	11,3	220	750	1,15	1,44	3,4

Зависимость цвета многослойной полимерной системы в поляризованном свете, состоящей из двух слоев линейных поляризаторов и нескольких слоев пленок полиэтилена между ними, от толщины пленки определяли по методике [7]. Цвет пакета полимерных пленок измеряли с помощью спектрофотометра СФ-2000 в режиме «на просвет» в диапазоне длин волн видимого света от 380 до 730 нм. График зависимости светлоты L в составе цифровых координат цвета L*a*b от толщины пленки полиэтилена представлен на рис. 2.

Из данных представленных на рис. 2, можно сделать вывод о том, что с увеличением числа слоев, а, следовательно, и толщины полиэтиленовых пленок в составе многослойного пакета, цвет и светлота меняется для двух пленок различным образом.

Цвет монопленки ПЭ-1 (темно-синий) соответствующий минимальной светлоте пакета (рис. 1) назовем исходным, а цвет 2 пленок ПЭ-1 – желтый соответствующий максимуму светлоты пакета – противоположным. По мере увеличения числа слоев пленок ПЭ-1 в пакете и соответственно их суммарной толщины происходит периодическая смена исходного цвета на противоположный с монотонным уменьшением амплитуды светлоты, обусловленным повышением мутности [X]. Эти циклические изменения оптических характеристик пленок в поляризованном свете предлагается называть «цветовыми колебаниями» и характеризовать амплитудой изменения светлоты и «цветовым периодом» соответствующим конкрет-

ной полимерной пленки. ПЭ-1 с увеличением толщины пленки на 1 слой равный 50 мкм, меняет цвет пакета циклично на противоположный, с постепенным угасанием «цветовых колебаний», связанным с увеличением мутности пленки с увеличением числа слоев. Для параллельного положения поляризаторов видимый цвет циклично меняется с темно-синего на желтый. «Цветовой период» составляет 2 слоя или 50 мкм. Пленка ПЭ-2 показывает интенсивную видимую темно-синюю окраску в поляризованном свете только при трех слоях пленки толщиной 150 мкм, а интенсивную желтую окраску при 6 слоях равных 300 мкм, возвращаясь при этом к сине-фиолетовому цвету через оттенки при 9 слоях равных 450 мкм. Для этой пленки «цветовой период» составляет 6 слоев или 300мкм. Это наглядно показывает цикличность цвета многослойного пакета с увеличением числа слоев пленки полиэтилена в его составе. Для пленок разных марок равной толщины обнаруживается закономерная последовательность смены цветов, но с разными периодами. Исследования этих двух материалов с помощью ИК-Фурье спектрометра с целью выяснения различий в составе пленок и наличия возможных наполнителей в их составе показали, что пленки с одинаковой долей вероятности имеют идентичный химический состав.

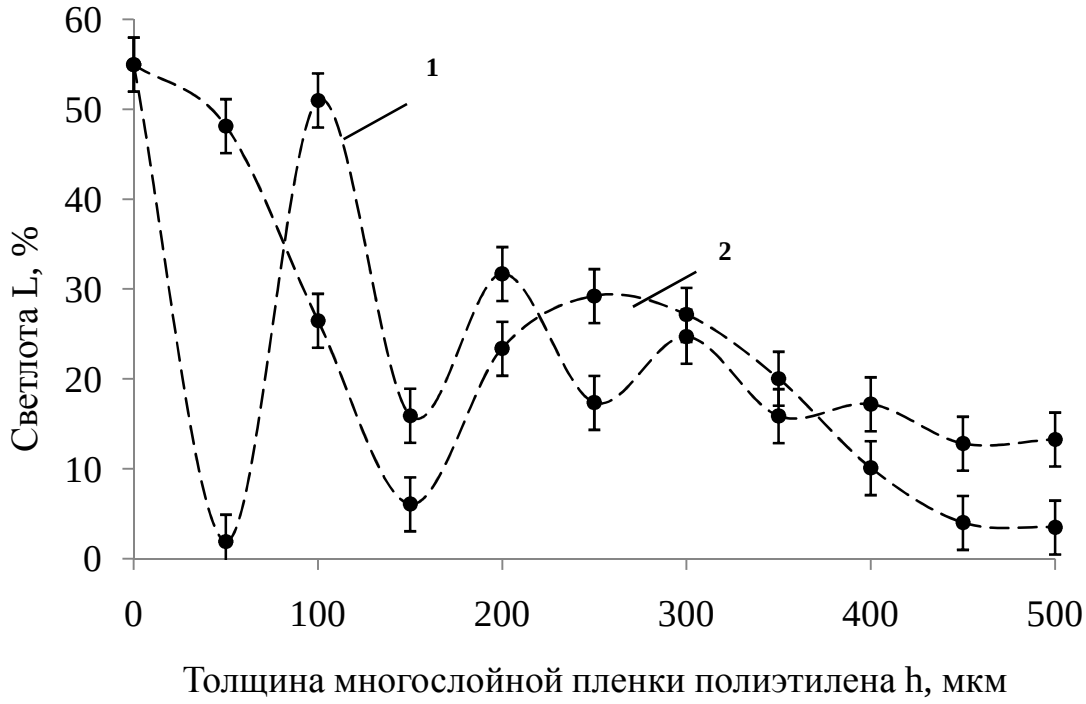


Рис. 2. График зависимости светлоты многослойного пакета от суммарной толщины пленок полиэтилена, 1 – ПЭ-1, 2 –ПЭ-2

Для того, чтобы выяснить, как влияют условия термообработки на цвет многослойной системы, решено было провести нагрев пленок с высокой точностью до 0,1^{o}C в камере хроматографа ЦВЕТ-800. Нагревание

проводили в диапазоне температур от 20 до 90ºС с шагом в 10ºС в течение 10 минут без давления, после чего цвет фиксировали визуально и инструментально с помощью спектрофотометра СФ-2000 на просвет. По результатам измерения координат цвета рассчитывали цветовое различие цвета термообработанной пленки от цвета исходной пленки при комнатной температуре 20 °С (рис. 3).

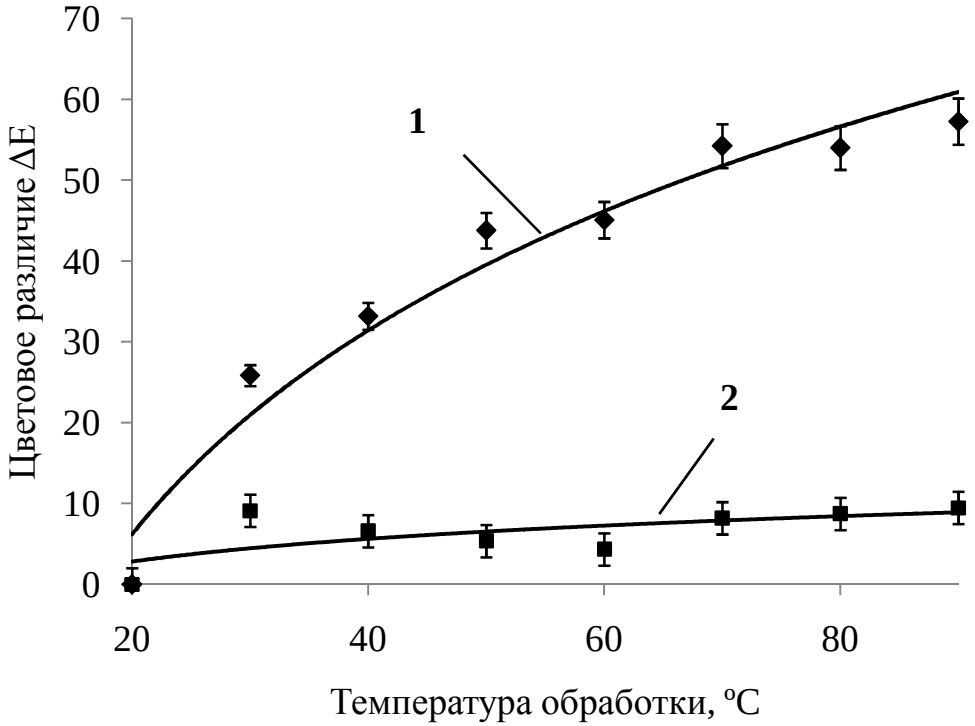


Рис. 3. Цветовое различие исходной и термообработанной пленки полиэтилена в зависимости от температуры обработки: 1 – ПЭ-1, 2 –ПЭ-2

Пленка ПЭ-1, имеющая изначально сине-фиолетовый цвет в поляризованном свете с увеличением температуры термообработки теряет интенсивность окраски и постепенно обесцвечивается, становясь светло-коричневого цвета (зафиксированный цвет после обработки температурой 90ºС). Цветовое различие при дальнейшем увеличении температуры термообработки пленки вплоть до температуры плавления увеличивается значительно. Пленка ПЭ-2, не имеющая интенсивной окраски при комнатной температуре, при термообработке также незначительно обесцвечивается, о чем говорит небольшое возрастание цветового различия при увеличении температуры термообработки.

Наглядно оценить изменение цвета многослойного пакета при увеличении температуры термообработки можно нанеся значения цветности на соответствующую систему координат цветности (рис. 4).

Для выявления различий теплофизических свойств пленок полиэтилена, а также возможных различий в аморфно-кристаллической структуре, решено было провести испытания методом дифференциальной сканирующей калориметрии. Пленка ПЭ-1 до термообработки имеет стандартную кривую плавления с пиком в области температуры плавления полиэтилена низкой плотности равному 107,1ºС. Пленка ПЭ-2 Имеет два пика плавления 108,5 и 121,4ºС. Расчетная степень кристалличности двух пленок близка по значениям: 36 и 37% соответственно (табл. 1).

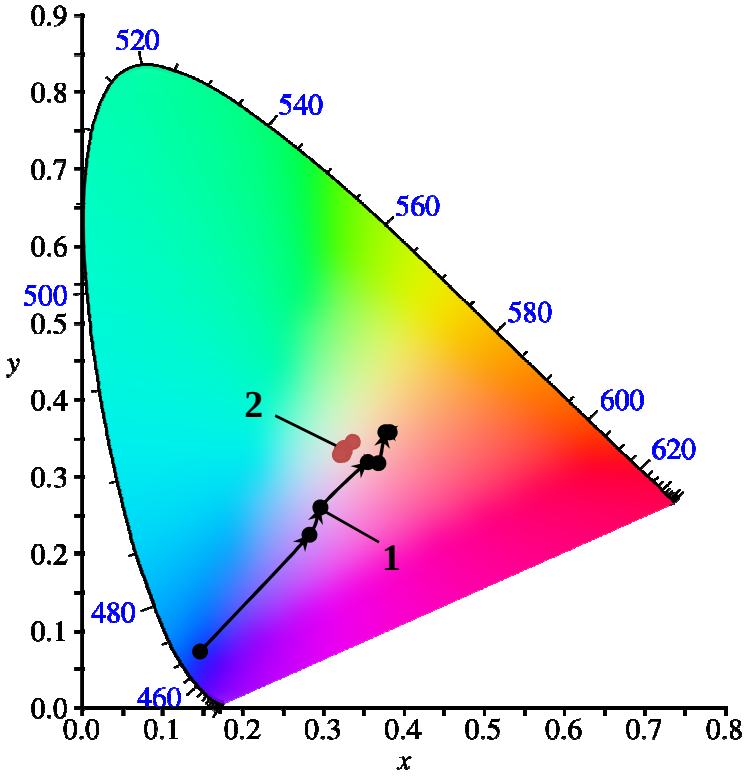


Рис. 4. Траектория изменения цвета многослойного пакета в поляризованном свете по мере увеличения температуры обработки: 1 – ПЭ-1, 2 –ПЭ-2

На снимках СЭМ видно, что пленка ПЭ-1 имеет волокнообразную «волосатую» структуру (рис. 5 (1)), которая сглаживается после термообработки (рис. 5 (2)). На поверхности пленки ПЭ-2 обнаружены плоские толщиной около 15...20 нм ламеллярные структуры, которые также исчезают после термообработки при температуре значительно меньшей, чем температура плавления полиэтилена.

Известно, что глаз человека способен воспринимать и разделать оттенки цвета, если их численное цветовое различие $\Delta E > 3$ [12]. Изменение цвета многослойного пакета при термообработке одного или нескольких слоев пленки полиэтилена, входящих в него, дает возможность наносить на материал не только символы различимые глазом, но и всевозможные информативные знаки и штриховые коды, считываемые аппаратно с помощью сканеров и мобильных устройств.

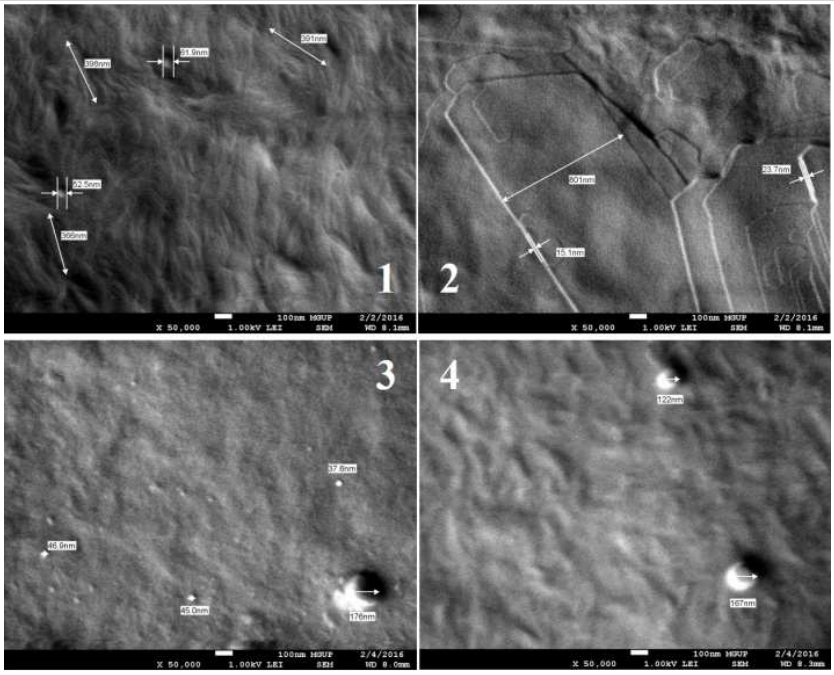


Рис. 5. Снимки СЭМ поверхности полиэтилена двух марок в исходном состоянии (1,2) и после термообработки при 60°С (3,4)

Для надежного считывания информации штриховых кодов всех систем главным критерием является величина цветового различия между фоном и печатным элементом, что рассмотрено ранее [13]. Достигаемое при термообработке изменение цвета некоторых материалов говорит о их пригодности для изготовления защитных элементов упаковки, содержащих штриховое кодирование [12] и хранения цифровых данных [14]. Пленки, меняющие цвет незначительно или с большим цветовым периодом могут быть применены в качестве вспомогательных (дополнительных) слоев материала позволяющих достигать необходимых оттенков цвета в составе многослойной упаковки.

Список литературы

1. Кондратов А.П. Новые полимерные пленки для печати защищенной от подделки этикетки и упаковки // Известия высших учебных заведений. Проблемы полиграфии и издательского дела, 2011. № 2. С. 83-94.

2. Кондратов А.П., Дрыга М.А. Управление прозрачностью наномодифицированной полипропиленовой пленки при защитной маркировке деталей упаковки Известия высших учебных заведений. Проблемы полиграфии и издательского дела, №1, 2012. С. 62-67.

3. Журавлева Г.Н., Комарова Л.Ю., Кондратов А.П. Активация запечатываемой поверхности гибкой упаковки из полипропилена обработкой растворителями // Известия высших учебных заведений. Проблемы полиграфии и издательского дела. №1, 2015. С. 20-26.

4. Почивалов К.В., Рожкова О.В., Вялова А.Н., Голованов Р.Ю., Баранников В.П., Мизеровский Л.Н. Исследование процесса аморфизации частично кристаллических полимеров методом гидростатического взвешивания в инертной жидкости // Химические волокна, 2009. № 3. С. 28 - 31.

5. Jinrong W., McKenna, Gregory B. Anomalous melting behavior of cyclo- hexane and cyclooctane in poly(dimethylsiloxane) precursors and networks // J. Of polymer Sci. Part B: Polymer physics, 2008. Vol. 46. Issue 24. P. 2779-2791.

6. Мизеровский Л.Н., Почивалов К.В. Фазовое равновесие в системах линейный полимер - жидкость и структурно-термодинамические особенности полимерной фазы // Химические волокна, 2009. № 3. С. 3 - 11.

7. Ермакова И.Н., Нагорнова И.В., Кондратов А.П. Методики приготовления образцов и оценки оптических свойств многослойных полимерных пленок с эффектом плеохроизма // Известия высших учебных заведений. Проблемы полиграфии и издательского дела, №2, 2015. С. 3 - 12.

8. Kondratov A.P. New Materials for Light Strain-optical Panels // Light & Engineering, 2014, № 3. Т. 22. С. 74 - 77.

9. Кондратов А.П. Новые материалы для световых механооптических панелей. Светотехника, 2015. № 1. С. 59-62.

10. Кондратов А.П., Утехин А.Н., Боровиков П.С. Термомодифицированные пленки полипропилена с оптимальной кристалличностью для защитных элементов упаковки // Известия высших учебных заведений. Проблемы полиграфии и издательского дела, 2013. № 4. С. 34-44.

11. Kondratov A.P., Varepo L.G., Nagornova I.V., Ermakova I.N. Transparent layered materials based on variable color polyolefins // Procedia Engineering 113, 2015. P. 423-428.

12. Ермакова И.Н., Кондратов А.П. Обеспечение оптимального сигнала контраста термопечати «водяных знаков» и скрытых штриховых кодов на слоистых пленках полиэтилена // Известия высших учебных заведений. Проблемы полиграфии и издательского дела. 2015. № 4. С. 83 - 91.

13. Кондратов А.П., Ермакова И.Н. Оценка возможности варьирования цвета прозрачных многослойных полимерных материалов с эффектом плеохроизма // Известия высших учебных заведений. Проблемы полиграфии и издательского дела, 2013. № 4. С. 3-11.

14. Некрасов А.Д., Кондратов А.П. Способ представления и хранения цифровых данных в виде отпечатков многоцветных двумерных кодов // Известия высших учебных заведений. Проблемы полиграфии и издательского дела. №1, 2014. С. 37-43.

Ермакова Ирина Николаевна, канд. техн. наук, мл. научный сотрудник, i.n.ermakova@gmail.com, Россия, Москва, НТЦ «Полиграфические и инновационные материалы»

THE COLOR AND TRANSPARENCY OF MULTILAYER FILMS OF POLYETHYLENE IN POLARIZED LIGHT

I.N. Ermakova

*Multilayer film materials with optical effects are used in protective packaging of food, pharmaceuticals and cosmetics. It is shown that multilayer films containing polyethylene have different colors and transparency by passing polarized light. It is found that the color of the multilayer package, measured in the coordinates of color space La*b*, varies due to the heat treatment of polyethylene layers. The effect of heat treatment temperature on the color of the multilayer system as an example polyethylene films of the same thickness of the two brands.*

Key words: multilayer polymer films, packaging, color effects, polarization, termomodification, labeling.

Ermakova Irina Nikolaevna, candidate of technical science, junior researcher, i.n.ermakova@gmail.com, Russia, Moscow, Center of Polygraphic and Innovation Technologies

УДК 681.2-5

МОДЕЛИРОВАНИЕ МАНИПУЛЯТОРА КИСТИ АНДРОИДА

А.Д. Михед, Е.Е. Смирнова, Ю.В. Липатова

В статье описано проектирование автономной роботизированной кисти андроида с использования методологии SADT. Построена функциональная модель манипулятора кисти робота и её декомпозиция. По разработанной 3D модели робота собран макетный образец и записан алгоритм, реализующий его работу.

Ключевые слова: мобильный робот, информационная система, моделирование, трехмерная модель, алгоритм.

В настоящее время человек не может обойтись без высокотехнологичного оборудования, электронных и механических систем. Робототехнические системы являются одним из новых видов производственной техники. Их применение требует новой организации технологического процесса. Робототехнические системы, особенно с адаптивными и интеллектуальными роботами, нуждаются в микропроцессорном управлении.

Использование плат с микроконтроллером Arduino позволяет в короткие сроки создать готовое электронное устройство. Одной из областей применения платы стали миниатюрные роботы, количество вариантов конструкций которых, сегодня составляет сотни, если не тысячи. Создание робота - процесс многоэтапный, включающий в себя проектирование, сборку, программирование. Знания робототехники граничат с математикой, физикой, механикой, алгоритмизацией.

В робототехнике широкое распространение получили клешни для захвата различных предметов. Клешня состоит из двух направляющих, при сближении которых и происходит удержание предмета. Движения направляющих происходит с помощью сервоприводов [3].

На сегодняшний день большое распространение получили роботы-андроиды. Но практическое применение может иметь и рука (кисть руки) робота отдельно - в качестве протеза для инвалидов. Кисть используют в медицинской технике, в частности области медицинских средств реабилитации двигательного аппарата человека. Цель - повышение степени приспосабливания при захвате предметов [4]. Пальца кисти андроида могут быть использованы для жестикуляции в развлекательных целях и для рекламы.

Построение функциональной модели предметной области манипулятора кисти робота проводилось с использования методологии SADT, которая представляет собой совокупность методов, правил и процедур, предназначенных для формирования функциональной модели предметной области, которая отображает функциональную структуру производимые функции и действия, а также связи между ними.

Манипулятор кисти робота предназначен для захвата твердотельных предметов и жестикуляции пальцами кисти, в следствии чего исходными данными (входами) данной системы будут только предметы для захвата. Управление системы будет программным и независимым от человека (автономным), в процессе работы робота. В качестве механизмов воздействия на систему будет использоваться программная среда Arduino, в которой будет записываться программный код (скетч) на языке C++, а так же система автоматизированного проектирования (САПР) SolidWorks для разработки конструкции робота. Выходом (результатом) системы будет захваченный предмет и манипуляции пальцами кисти робота. На рис. 1 показана структура функциональной модели манипулятора кисти робота с программным управлением, построенная с помощью программы Ramus Educational**.**

Раскроем структуру функциональной модели манипулятора кисти робота. Для этого необходимо описать основные блоки, входящие в модель, и соответствующие связи между этими блоками. Входную информацию, в виде предмета для захвата, будет принимать двигательная система (блок A2) и после захвата пальцами кисти на выходе захваченный предмет. Программное управление будет воздействовать на плату микроконтроллера Arduino (блок A1), которая с помощью механизмов программной среды Arduino и языка C++ будет подавать логический сигнал на сервоприводы (блок A3). Для точной компоновки деталей робота и установки движителей на основании робота требуется спроектировать его твердотельную 3D модель с помощью САПР SolidWorks. На рис. 2 показана декомпозиция диаграммы функциональной модели информационной робототехнической системы.

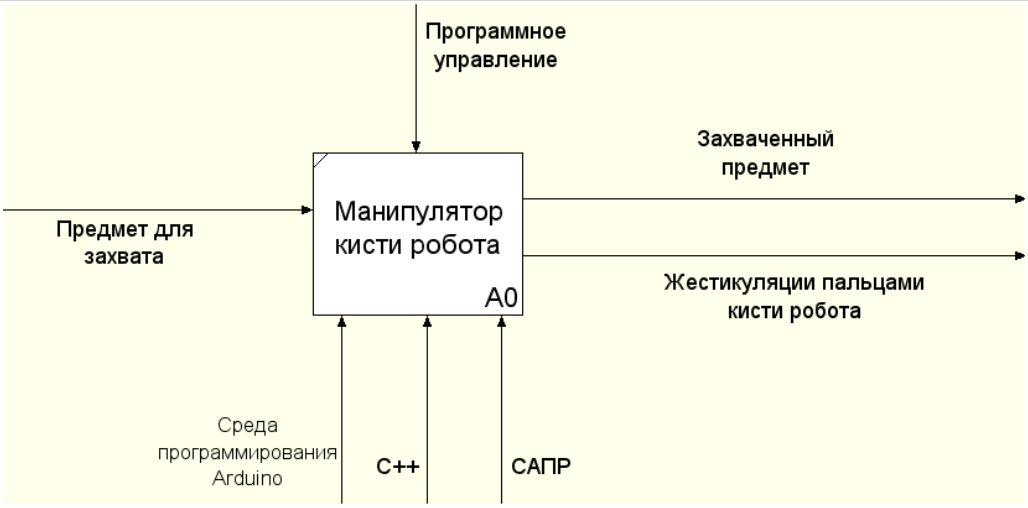


Рис. 1. Функциональная модель манипулятора кисти робота

Для реализации жестикуляции пальцев кисти робота необходимо записать программу (скетч) на языке C++ и загрузить его в плату Arduino. В этом случае входная информация на систему поступать не будет. Так как жестикуляция будет на прямую зависеть записанного скетча.

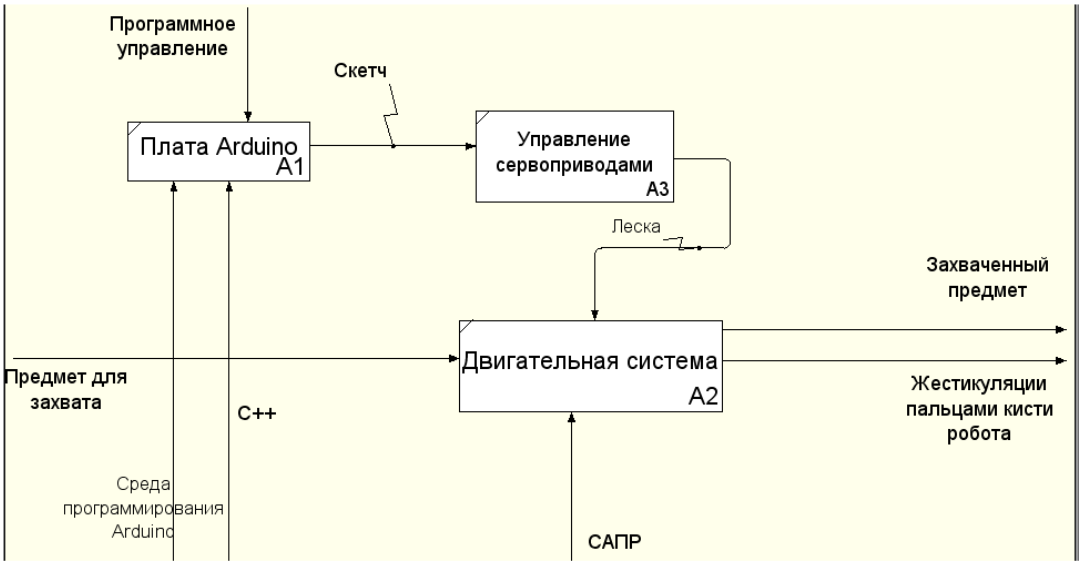


Рис. 2. Декомпозиция диаграммы функциональной модели информационной робототехнической системы

Таким образом, при проектировании роботехнической системы кисти андроида с программным управлением необходима реализация представленных блоков A1-A3, входящих в состав функциональной модели робота.

Макетный образец кисти робота используется на ровной поверхности. Для правильной сборки кисти целесообразно предварительно спроектировать его основные детали и построить твердотельную 3D модель. Для

решения данной задачи была использована система автоматизированного проектирования (САПР) SolidWorks 2015 [1,2]. Применение САПР позволило уточнить геометрические и массовые характеристики кисти робота. Так масса робота составила 440 грамм.

На основании спроектированной 3D модели робота был собран и испытан макетный образец автономной кисти андроида, предназначенный для захвата твердотельных предметов и жестикуляции пальцами данной кисти. На рис. 3 представлен макетный образец, который подключен к ноутбуку.

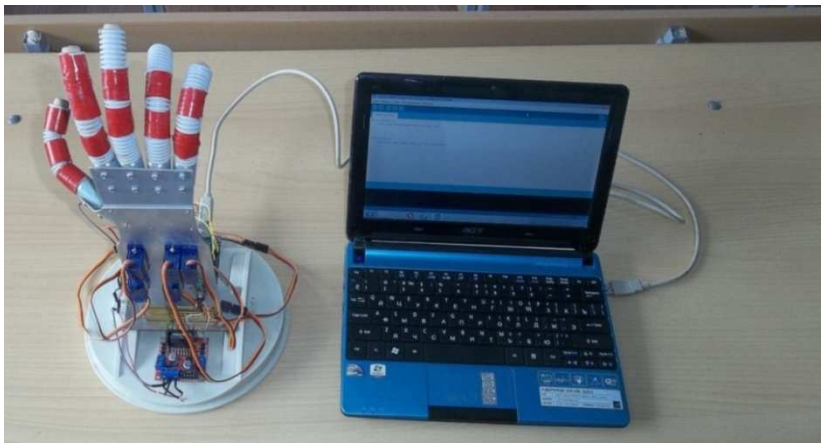


Рис. 3. Макетный образец автономной кисти андроида

Работу робота отражает алгоритм, показанный на рис. 4. При записи скетча (программного кода) необходимо присвоить управляющему контакту сервопривода цифровой порт платы ArduinoUNO.

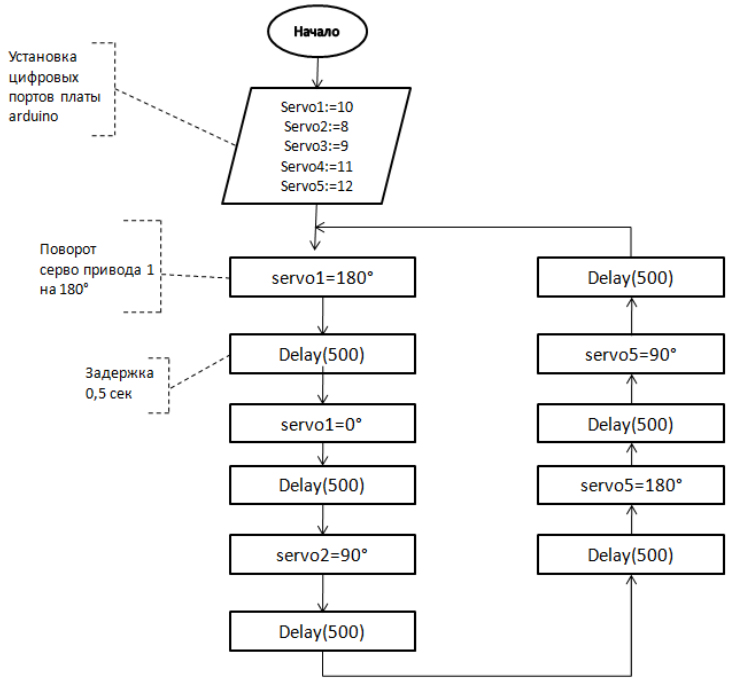


Рис. 4. Алгоритм работы робота

Далее необходимо указать требуемые углы поворота качалок сервоприводов, причем начиная с первого сервопривода (первого пальца) и заканчивая пятым сервоприводом (пятым пальцем). Временной промежуток между загибанием и разгибанием был выбран 0.5 секунд, для этого на языке программирования C++ используется команда delay().

Таким образом, комбинируя скетч можно добиться различных жестикуляций пальцев, а так же заставить загибать робот все пять пальцев одновременно, тем самым, осуществив захват твердого предмета.

Список литературы

1. Кожеуров М.А., Михед А.Д., Родионов В.А. Применение автоматического проектирования и синтеза для исследования информационно-измерительной системы наземного мобильного робота / Актуальные вопросы науки: Материалы XXII Международной научно-практической конференции (10.11.2015). –М.: Издательство «Спутник +», 2015. С. 26-31.

2. Михед А.Д., Киселев П.В., Подлевских А.П. Информационная робототехническая система с программным управлением для фиксации изображения // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2016. Вып. 4. С. 23-28.

3. Смирнов А.Б. Мехатроника и робототехника. Системы микроперемещений с пьезоэлектрическими приводами. СПбГПУ, 2013. 160 с.

4. Юревич Е.И. Основы робототехники. 2-е изд. перераб. и доп. СПб.: БХВ-Петербург, 2010. 416 с.

Михед Антон Дмитриевич, канд. техн. наук, доц., anton11588@yandex.ru, Россия, Москва, Московский технологический институт,

Смирнова Елена Евгеньевна, канд. пед. наук, доц., зав. кафедрой, eesmirn@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский университет,

Липатова Юлия Вячеславовна, асп., lemonic@mail.ru, Россия, Тула, Тульский университет

MODELING OF THE MANIPULATOR OF THE BRUSH ANDROID

A.D. Mikhed, E.E. Smirnova, J.V. Lipatova

This article describes the design of Autonomous robotic brushes Android using SADT methodology. Built functional mo del of the manipulator of the brush of the robot and its decomposition. According to the designed 3D model of the robot is assembled breadboard and recorded the algorithm for his work.

Key words: mobile robot, information system, modeling, model, algorithm.

Mikhed Anton Dmitrievich, candidate of technical science, docent, anton11588@yandex.ru, Russia, Moscow, Moscow technological institute,

Smirnova Elena Evgenievna, candidate of pedagogical sciences, docent, manager of department, eesmirn@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Lipatova Yuliya Vyacheslavovna, postgraduate, lemonic@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 621.78

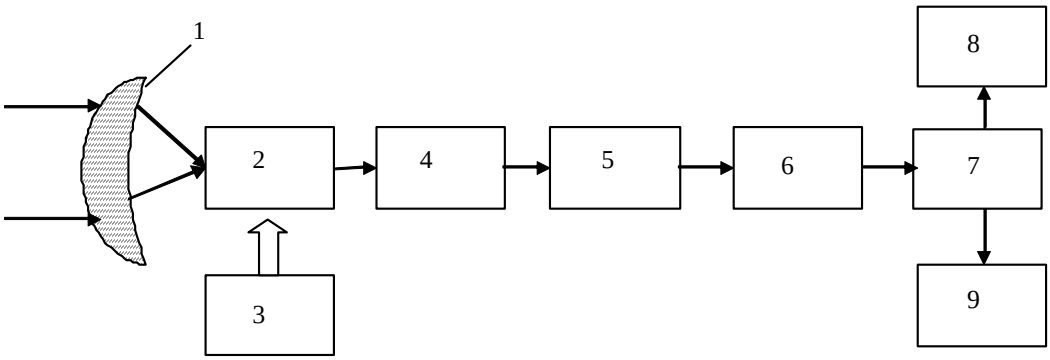
ОБЩАЯ СТРУКТУРА ТЕПЛОВИЗОРОВ И ВАРИАНТЫ ИХ КЛАССИФИКАЦИЙ

Е.В. Филиппова

Излагается общий принцип функционирования тепловизионных систем наблюдения, приводится классификация инфракрасных систем по различным признакам.

Ключевые слова: инфракрасная система, тепловизор, сканирующая система, инфракрасное излучение, приемник излучения.

По общему принципу функционирования тепловизоров (см. рисунок) инфракрасное излучение концентрируется системой специальных линз и попадает на фотоприёмник, который избирательно чувствителен к определённой длине волны инфракрасного спектра. Попадающее на него излучение приводит к изменению электрических свойств фотоприёмника, что регистрируется и усиливается электронной схемой. Полученный сигнал подвергается цифровой обработке, и это значение передаётся на блок отображения информации. Блок отображения информации имеет цветовую палитру, в которой каждому значению сигнала присваивается определённый цвет. После этого на мониторе появляется точка, цвет которой соответствует численному значению инфракрасного излучения, которое попало на фотоприёмник. Сканирующая система (зеркала или полупроводниковая матрица) проводит последовательный обход всех точек в пределах поля зрения прибора, и в результате получается видимая картина инфракрасного излучения объекта. Таким образом, на мониторе тепловизора мы видим значения мощности инфракрасного излучения в каждой точке поля зрения тепловизора, отображённые согласно заданной цветовой палитре (черно-белой или цветной).



Обобщенная функциональная схема тепловизора: 1 – оптическая система; 2 – фотоприемник; 3 – система охлаждения; 4 – усилитель; 5 – аналого-цифровой преобразователь; 6 – формирователь изображения; 7 – формирователь изображения; 8 – дисплей; 9 – цифровой выход

Вышеописанной обобщенной схеме может соответствовать много технических решений. Целесообразно сделать классификацию средств получения теплового изображения по различным признакам (см. таблюцу).

Как уже отмечалось в таблице п.5, тепловизионные системы от первого до третьего поколения являются сканирующими системами. Сканирующие системы тепловидения используют различные типы сканирования: одноэлементное, параллельное, последовательное. Различаются типы сканирования по траекториям сканирования, закону сканирования и другим признакам.

Оптическая система тепловизора сканирующего типа собирает излучение картины и осуществляет спектральную и пространственную фильтрацию и фокусировку излучения, создавая изображение картины в фокальной плоскости, где расположен небольшой чувствительный элемент одноэлементного приемника излучения. Оптико-механическая система сканирования, состоящая из двух зеркал, одно из которых качается вокруг вертикальной оси, а другое – вокруг горизонтальной оси, расположена между объективом и приемником излучения. Пучок лучей от объекта, падающий на приемник, перемещается при покачивании зеркал, образуя в пространстве объектов растр телевизионного типа [3].

Поступающее от наблюдаемой картины электромагнитное излучение оказывает на приемник возмущающее воздействие, которое обычно пропорционально энергии излучения. Характер возмущения зависит от типа приемника (см. таблицу п.7) и может проявляться в разделении носителей заряда, появлении фотопотока или изменении сопротивления. Приемник инфракрасного излучения в определенной совокупности рабочих условий характеризуется параметрами – чувствительностью R и удельной обнаружительной способностью D.

Классификация средств получения теплового изображения

<table>
<tr><td>1</td><td>Назначение и область применения</td><td colspan="3">Визуализация (тепловизионные системы)</td><td colspan="2">Радиометрия (измерение температур объектов, их яркости и других параметров)</td></tr>
<tr><td rowspan="2">2</td><td rowspan="2">Сферы использования</td><td colspan="4">Гражданского назначения</td><td rowspan="2">Военного назначения</td></tr>
<tr><td>профессиональная и любительская аппаратура</td><td colspan="2">технического (машинного) зрения</td><td>научные исследования</td></tr>
<tr><td>3</td><td>Метод работы</td><td colspan="2">Пассивный метод – по собственному отражённому излучению наблюдаемых или контролируемых объектов и/или по отраженному от них излучению, создаваемому естественными источниками (без подсветки)</td><td colspan="2">Активный метод – по отраженному или рассеиваемому объектом излучению, искусственно создаваемому специальным источником (с подсветкой)</td><td>Полуактивный метод – облучение (подсвечивание) сравнительно широкого углового поля, в котором находится не один, а несколько объектов.</td></tr>
<tr><td>4</td><td>Спектральные поддиапазоны работы</td><td>Ближний
0,76..1,1</td><td>Коротковолновый
1,1..2,5</td><td>Средневолновой
3,0..5,0</td><td>Длинноволновой
8,0..14,0</td><td>Дальний
15,0..1000</td></tr>
<tr><td rowspan="4">5</td><td rowspan="4">Способ анализа наблюдаемого и контролируемого пространства</td><td colspan="3">Сканирующие (многоэлементный приёмник излучения в виде линейки отдельных чувствительных элементов)</td><td colspan="2">«Смотрящие» (многоэлементный матричный приёмник оптического излучения - FPA)</td></tr>
<tr><td>одноэлементное</td><td>параллельное</td><td>последовательное</td><td colspan="2" rowspan="3"></td></tr>
<tr><td colspan="3">по траектории сканирования</td></tr>
<tr><td colspan="3">по закону сканирования</td></tr>
<tr><td>6</td><td>Способ обработки информации</td><td colspan="2">Аналоговый</td><td>Цифровой</td><td colspan="2">Смешанный</td></tr>
<tr><td>7</td><td>Тип приемника-преобразователя оптического сигнала</td><td colspan="2">Электронно-оптические преобразователи</td><td>Фотоэлектровакуумные передающие телевизионные трубки с накоплением или без накопления сигналов</td><td colspan="2">Многоэлементные твердотельные приёмники оптического излучения
тепловые и фотонные
охлаждаемые и неохлаждаемые
болометрические
фотодиодные
фоторезисторные</td></tr>
<tr><td>8</td><td>Вид выходного устройства (системы отображения)</td><td colspan="2">Телевизионная трубка</td><td>Дисплей</td><td colspan="2">ЭВМ, компьютер</td></tr>
<tr><td rowspan="2">9</td><td rowspan="2">Технико-экономические, конструктивные параметры и характеристики</td><td colspan="3">Охлаждаемые</td><td colspan="2">Неохлаждаемые</td></tr>
<tr><td colspan="5">Габариты, масса, энергопотребление срок непрерывной работы, время выхода на рабочий режим после включения, стоимость</td></tr>
<tr><td>10</td><td>По поколениям</td><td>ИКС с одноэлементным приёмником излучения и оптико-механическим мультиплексированием выходного сигнала</td><td colspan="2">ИКС с оптико-механическим сканированием, приёмником в виде линейки чувствительных элементов и оптико-электронным мультиплексированием выходного сигнала</td><td>ИКС «смотрящего типа»</td><td>ИКС «смотрящего» типа с матричным приёмником, работающим в нескольких спектральных диапазонах</td></tr>
</table>

Входной аналоговый оптический сигнал тепловизора четвертого поколения или «смотрящего» типа (таблица п. 5) с матричным приемником излучения (МПИ) преобразуется оптической системой (объективом) в двумерное распределение освещенности на чувствительном слое МПИ. После дискретизации изображения путем выборки отдельных его элементов и осреднения амплитуд сигналов по площади каждого элемента чувствительного слоя МПИ, производящего пространственную выборку, эти сигналы поступают на аналогово-цифровой преобразователь (АЦП), квантующий их по уровню. Затем образованное таким образом цифровое изображение фильтруется. На заключительном этапе преобразований выходной сигнал реконструируется, т.е. возвращается к аналоговой форме, и отображается на дисплее или каком-либо другом устройстве [4].

Возможны различные варианты классификаций по различным признакам, что и отражено в таблице.

Сама по себе классификация – не цель, а одно из средств обобщения системного методологического подхода к созданию новых и модернизации имеющихся средств контроля систем получения тепловых изображений.

Список литературы

1. Алеев Р.М., Иванов В.П., Овсянников В.А. Основы теории анализа и синтеза воздушной тепловизионной аапаратуры. Казань: Казан. ун-т, 2000. 252 с.

2. Госсорг Ж. Инфракрасная термография. Основы, техника, применение: пер. с франц. М.: Мир, 1988. 416 с.

3. Ллойд Дж. Системы тепловидения: пер. с англ. М.: Мир, 1978. 414 с.

4. Тарасов В.В., Якушенков Ю.Г. Инфракрасные системы «смотрящего» типа. М.: Логос, 2004. 444 с.

Филиппова Екатерина Вячеславовна, лаборант, kisskin@bk.ru Россия, Тула, Тульский государственный университет

THE GENERAL STRUCTURE OF THERMAL IMAGERS AND OPTIONS FOR THEIR CLASSIFICATIONS

E.V. Filippova

We present a general principle of the thermal imaging surveillance systems, a classification of infrared systems on various grounds.

Key words: infrared system, a thermal imager, scanner system, infrared radiation, detector.

Filippova Ekaterina Vyacheslavovna, laboratory assistant, kisskin@bk.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 536.21:27.35:25

УПРАВЛЕНИЕ БЕСПИЛОТНЫМ САМОЛЕТОМ МЕТОДОМ ДИНАМИЧЕСКОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ В ТЕОРИИ ГРАФОВ

Е.А. Пегачкова, Е.Л. Кузнецова, Ю.А. Горбунова

Рассматривается задача управления беспилотным самолетом, которому необходимо выполнить заданный маневр с минимальными затратами топлива. Используя математическую модель полета, описывающую движение самолета в канале тангажа, был составлен орграф, в котором в качестве длины дуги выступают затраты топлива на выполнение одного из двух маневров: увеличение скорости при постоянной высоте или набор высоты при фиксированной скорости. К рассматриваемой задаче применяется обобщение классического принципа оптимальности и метода динамического программирования в терминах теории графов, то есть минимальный расход топлива является кратчайшим путем на ориентированном графе.

Ключевые слова: оптимальное управление, ориентированный граф, динамическое программирование.

Рассматриваемая задача полета летательного аппарата в вертикальной плоскости с минимальным расходом топлива носит прикладной характер. Предлагается упрощенный способ решения поставленной задачи, дающий приемлемый результат с минимальной погрешностью.Составлена упрощенная модель полета самолета в вертикальной плоскости, а также предполагается, что для набора требуемых значений по высоте и скорости, беспилотный летательный аппарат совершает ряд последовательных шагов, причем на каждом этапе происходит только увеличение высоты или только увеличение скорости. Решение задачи рассматривается в классе непрерывно-дискретных систем. Используя математическую модель полета строится орграф, в котором в качестве длины дуги выступают затраты топлива на выполнение одного из двух маневров: увеличение скорости при постоянной высоте или набор высоты при фиксированной скорости. Вершины графа определяются парой координат, равных количеству шагов от вершины, отвечающей начальным значениям, по осям скорости и высоты до рассматриваемой вершины. Обобщением сформулированной задачи является одновременное увеличение скорости беспилотного самолета и набора им высоты, что приближает задачу к реальному полету, тогда перемещение по графу происходит по восходящей диагонали графа. К рассматриваемой задаче применяется обобщение классического принципа оптимальности и метода динамического программирования в терминах теории графов, то есть минимальный расход топлива является кратчайшим путем на ориентированном графе.Полученную на орграфе серию наборов высоты и увеличения скорости далее необходимо подставить в соответствующие системы дифференциальных уравнений, перейдя при этом к непрерывной системе. Моделирование полета производится с помощью программного

комплекса, позволяющего строить траектории движения самолета и вычислять расход топлива на выполнение заданного маневра для различных моделей и параметров беспилотных самолетов.

Постановка задачи. Рассматривается задача поиска оптимального управления беспилотным самолетом (Aerosonde). Необходимо осуществить набор скорости и высоты полета до требуемых значений с минимальными затратами топлива. Задача рассматривается в классе непрерывно-дискретных систем. Ограничимся движениями самолета с приращением высоты на постоянной скорости и ускорениями на постоянной высоте.

Движение летательного аппарата описывается системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \dfrac{dV}{dt} = \dfrac{P-\left(c_{x0}+\frac{(c_{y\alpha}\cdot\alpha)^2 S}{\pi\cdot e\cdot l^2}\right)S\rho(h)\frac{V^2}{2}}{m} - g\sin\theta; \\ \dfrac{d\theta}{dt} = 57{,}3\left(\dfrac{\frac{P\cdot\alpha}{57{,}3}+(c_{y0}+c_{y\alpha}\cdot\alpha)S\rho(h)\frac{V^2}{2}}{mV} - \dfrac{g}{V}\cos\theta\right); \\ \dfrac{dH}{dt} = V\sin\theta; \\ \dfrac{dx}{dt} = V\cos\theta; \\ \dfrac{dm}{dt} = -m_{сек}; \\ \vartheta = \theta + \alpha, \end{cases} \quad (1)$$

где V– скорость; H– высота; t – время; α – угол атаки; ϑ– угол тангажа; θ– траекторный угол; c_{y0}– коэффициент подъемной силы при $\vartheta = 0$; $c_{y\alpha}$– коэффициент производной первого порядка по углу атаки; c_{x0}– коэффициент минимального лобового сопротивления; P– тяга двигателя; $m_{сек}$– секундный расход топлива при максимальной тяге; $\rho(h)$– плотность воздуха; S– плотность крыла; l– размах крыла; e– коэффициент Освальда.

Приведем некоторые технические характеристикиAerosonde: размах крыла – 2,8956 м; площадь крыла – 0,55 м^2; коэффициент минимального лобового сопротивления – 0,0434; коэффициент подъемной силы при нулевом угле тангажа – 0,23; коэффициент подъемной силы производной первого порядка по углу атаки – 5,6106; масса самолета при полных баках – 13,5 кг; масса самолета при пустых баках – 8,5 кг.

Граничные условия:

$V(t_0) = 20$ м/с; $H(t_0) = 50$ *м*; $V(T) = 50$ м/с; $H(T) = 1000$ *м*.

Требуется найти оптимальное управление, позволяющее выполнить заданный маневр с минимальным расходом топлива:

$$I(P) = \int_{t_0}^{T} \frac{P_{тек}}{P_{max}} m_{сек_{max}} dt \to min.$$

Алгоритм решения задачи. Будем рассматривать задачу в классе дискретных систем, в плоскости обобщенных координат высота – скорость. Задавая интервалы изменения скорости $\Delta V = \frac{V(T)-V(t_0)}{M}$; и высоты $\Delta H = \frac{H(T)-H(t_0)}{N}$, разбиваем полученные интервалы на M и N шагов, соответственно. На рис. 1 представлена схема такого разбиения.

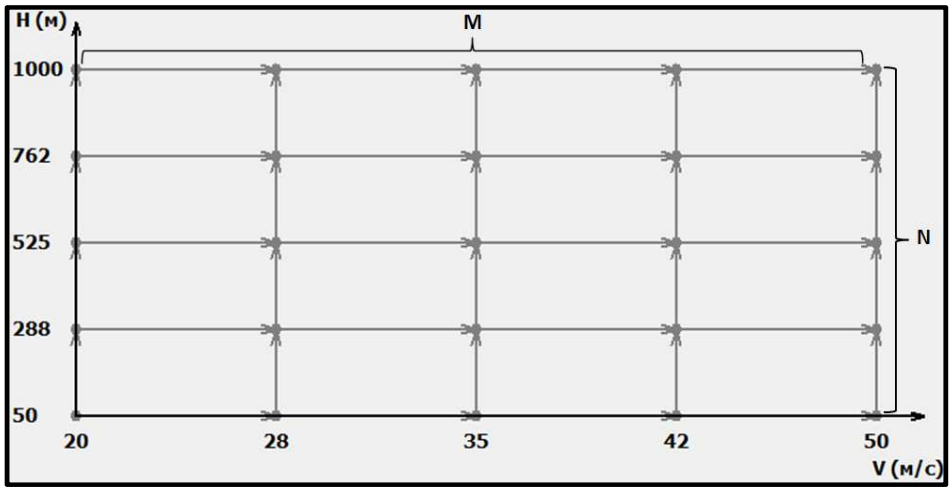


Рис. 1. Схема разбиения

Далее строим взвешенный орграф(X, Γ), каждая вершина которого однозначно определяется парой координат, равных числу шагов от вершины, отвечающей начальным значениям, по осям скорости V и высоты H к рассматриваемой вершине. Вес дуги – затраты топлива на выполнение самолетом элементарных операций по увеличению скорости на постоянной высоте и по набору высоты при постоянной скорости. Расход топлива определяется из решения двух отельных систем, учитывая допущение о том, что расход топлива считается от полного бака, т.к. изначально нет информации о количестве топлива при попадании в заданную точку на графе.Рассмотрим отдельно каждый маневр.

Набор высоты (вычисление весов вертикальных дуг графа): самолет находится одинаково ориентированным в пространстве и скорость и угол тангажа постоянны, т.е. $V = const$, $\frac{dV}{dt} = 0$, $\vartheta = const$. Поэтому система (1) преобразуется к виду:

$$\begin{cases} P = \left(c_{x0} + \frac{\left(c_{y\alpha}(\vartheta-\theta)\right)^2 S}{\pi \cdot e \cdot l^2}\right) S \cdot \rho(h) \frac{V^2}{2} + mg \sin\theta; \\ \frac{d\theta}{dt} = \frac{P(\vartheta-\theta) + \left(c_{y0} + c_{y\alpha}(\vartheta-\theta)\right) S \cdot \rho(h) \frac{V^2}{2}}{mV} - \frac{g}{V}\cos\theta; \\ \frac{dH}{dt} = V \sin\theta; \\ \frac{dm}{dt} = -m_{сек}, \end{cases} \quad (2)$$

где в качестве состояния выступает четверка $(\vartheta, \theta, H, m)$, а управление производится тягой P.

Набор скорости (вычисление весов горизонтальных дуг графа): самолет летит на постоянной высоте с неизменным траекторным углом, т.е. $H = const$, $\theta = 0$, а значит система (1) принимает вид:

$$\begin{cases} \alpha = \dfrac{m \cdot g - c_{y0} \cdot S \cdot \rho(h) \cdot \frac{V^2}{2}}{c_{y\alpha} \cdot S \cdot \rho(h) \cdot \frac{V^2}{2} + P}; \\ \dfrac{dV}{dt} = \dfrac{1}{m}\left(P - \left(c_{x0} + \dfrac{\left(c_{y\alpha} \cdot \alpha\right)^2 \cdot S}{\pi \cdot e \cdot l^2}\right) \cdot S \cdot \rho(h) \cdot \dfrac{V^2}{2}\right); \\ \dfrac{dx}{dt} = V; \\ \dfrac{dm}{dt} = -m_{сек}, \end{cases} \quad (3)$$

где вектором состояния является (V, x, m), а управление производится углом атаки α.

Таким образом, получили взвешенный орграф специального вида, правый верхний угол, которого представлен на рис. 2. В соответствии с методом динамического программирования определим функцию$L(V, H)$, аналогичную функции Беллмана, как длину кратчайшего пути (минимальный расход топлива) от предпоследней вершины до конечной вершины, при этом $L_K(V_M, H_N) = 0$.

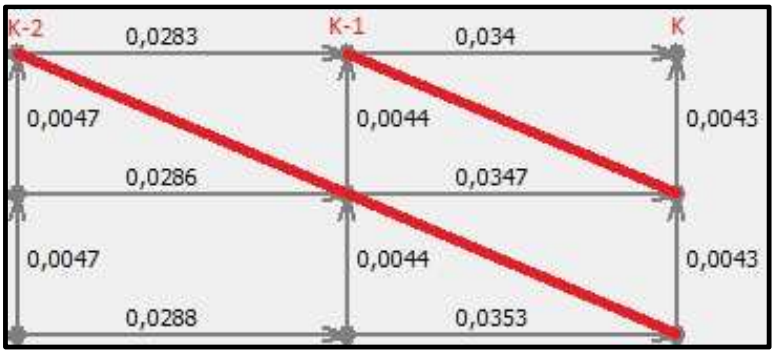


Рис. 2. Взвешенный орграф специального вида

Выпишем несколько начальных шагов решения. Если из данной вершины путь единственный, то сразу вычисляем функцию $L(V, H)$как сумму веса дуги при переходе от предыдущей вершины к следующей и ранее вычисленного расхода топлива:

$$L_{K-1}(V_{M-1}, H_N) = d\big((V_{M-1}, H_N) \to (V_M, H_N)\big) + L_K(V_M, H_N);$$
$$L_{K-1}(V_M, H_{N-1}) = d\big((V_M, H_{N-1}) \to (V_M, H_N)\big) + L_K(V_M, H_N);$$
$$L_{K-2}(V_{M-2}, H_N) = d\big((V_{M-2}, H_N) \to (V_M, H_{N-1})\big) + L_{K-1}(V_M, H_{N-1});$$
$$L_{K-2}(V_M, H_{N-2}) = d\big((V_M, H_{N-2}) \to (V_M, H_{N-1})\big) + L_{K-1}(V_M, H_{N-1}).$$

Если существует несколько путей, то выбирается тот, при котором суммарный расход топлива будет минимальным.

$$L_{K-2}(V_{M-1}, H_{N-1}) = min\{d\big((V_{M-1}, H_{N-1}) \to (V_M, H_{N-1})\big) + L_{K-1}(V_M, H_{N-1});$$
$$d\big((V_{M-1}, H_{N-1}) \to (V_{M-1}, H_N)\big) + L_{K-1}(V_{M-1}, H_N)\}.$$

Аналогичным образом последовательно вычисляем значения функции во всех вершинах орграфа, при этом расчеты ведутся, переходя от указанной выше «диагонали» к следующим нижестоящим. Последней вершиной, в которой будет вычислено значение функции, является начальная вершина $(V_0(t_0); H_0(t_0))$.Оптимальное управление строится, начиная с вершины $(V_0(t_0); H_0(t_0))$, с использованием условно-оптимальных траекторий, полученных на предыдущем шаге.

Полученную на орграфе серию наборов высоты и увеличения скорости подставляем в соответствующие системы дифференциальных уравнений, перейдя при этом к непрерывной системе. Построив траектории движения самолета, вычисляем расход топлива на выполнение заданного маневра.

Численное решение. Рассмотрим решение задачи с помощью программного комплекса, позволяющего задавать параметры летательного аппарата, граничные значения скорости и высоты, а также выбирать количество интервалов разбиения. Для наглядности приведем разбиение плоскости обобщенных координат 4х4.Числа между вершинами графа указывают затраты топлива в килограммах на выполнение операций по увеличению скорости или набору высоты. При этом считается, что при выполнении заданного маневра самолету не разрешается снижать скорость и высоту полета, т.е. изменение параметров полета должно проводиться на графе по стрелкам, направленным вправо при ускорении или вверх при подъеме. На рис. 3 красным цветом выделены условно-оптимальные управления, а синим – представлен оптимальный путь, вычисленный по приведенному выше алгоритму при следующих параметрах: угол тангажа $\vartheta = 10°$, начальная скорость $V(t_0) = 20\,м/с$, конечная скорость $V(t_0) = 20\,м/с$, текущая высота $H(t_0) = 50\,м$, конечная высота$H(T) = 100\,м$, максимальное значение тяги двигателя $P_{max} = 70\,Н$, секундный расход топлива при максимальной тяге $m_{сек} = 0{,}0002\,кг/с$.

Расход топлива при таком режиме составляет 0,1301 кг. После построения полученной траектории в классе непрерывных систем расход в силу введенного допущения незначительно сокращается до 0,1299 кг. Ниже на рис. 4-7 приведены графики, полученных траекторий.

На рис. 6-7 “скачки” отражают, что переключение с режима набора высоты на набор скорости не происходят мгновенно и естественно такая схема полета является субоптимальной и не отражает реальный полет, но полученный таким образом расход топлива является верхней границей, т.е. минимальные затраты топлива на выполнение требуемого маневра должны получиться заведомо меньшими значения, полученного при решении в классе дискретных систем.

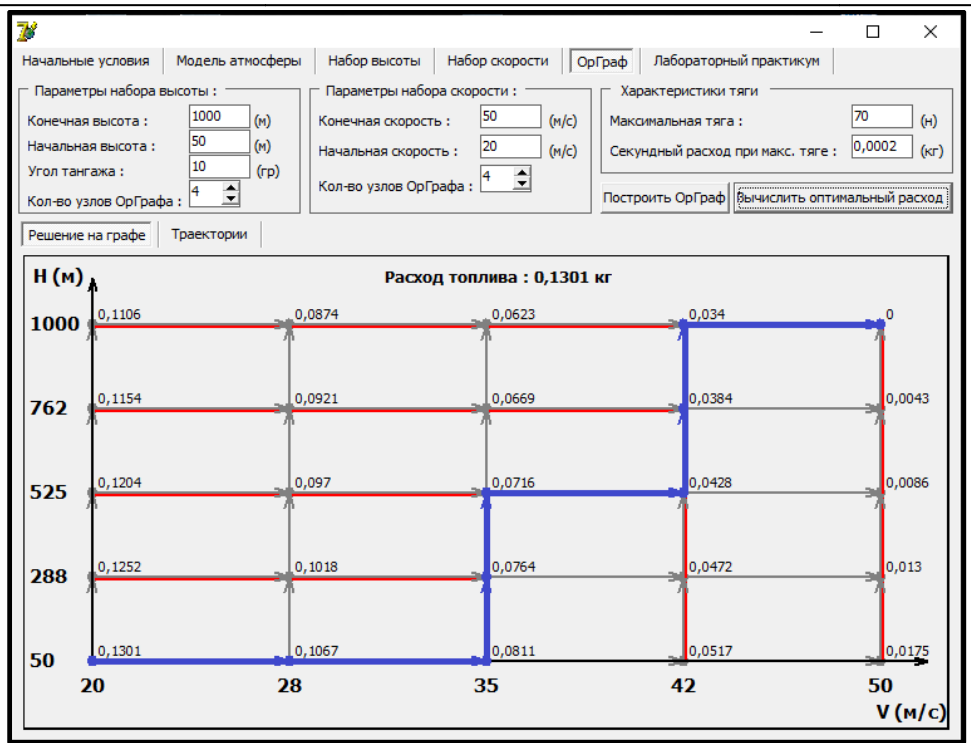


Рис. 3. Интерфейс программы

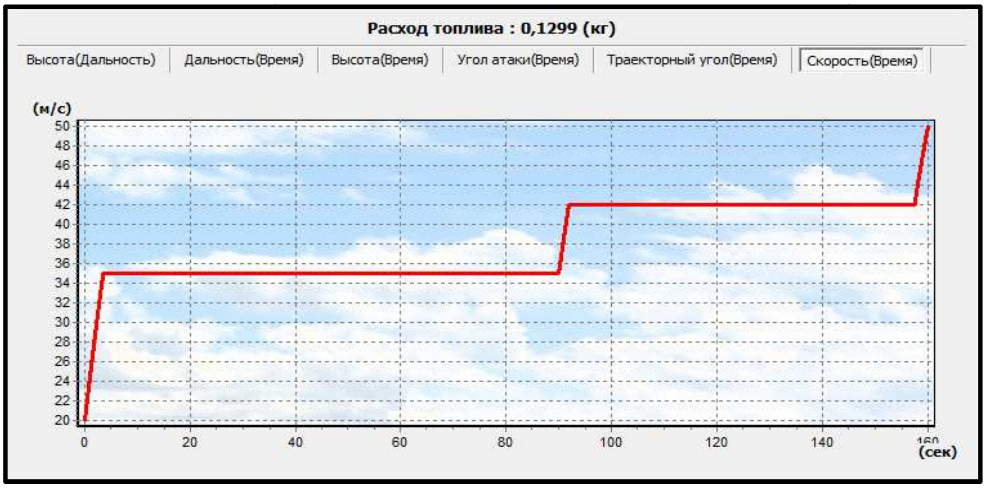


Рис. 4. Зависимость скорости от времени

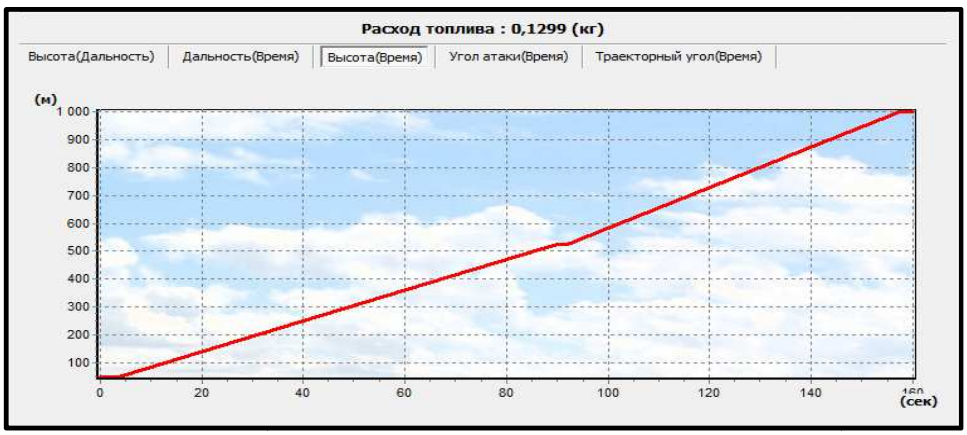


Рис. 5. Зависимость высоты от времени

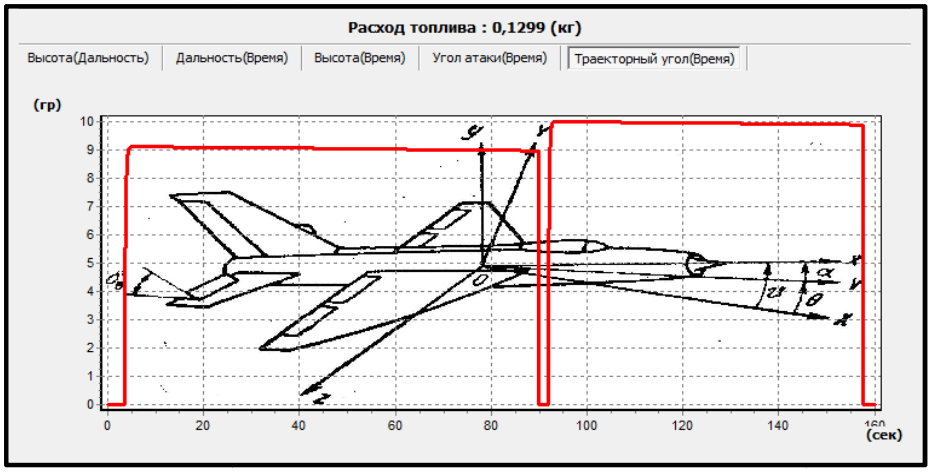


Рис. 6. Зависимость траекторного угла от времени

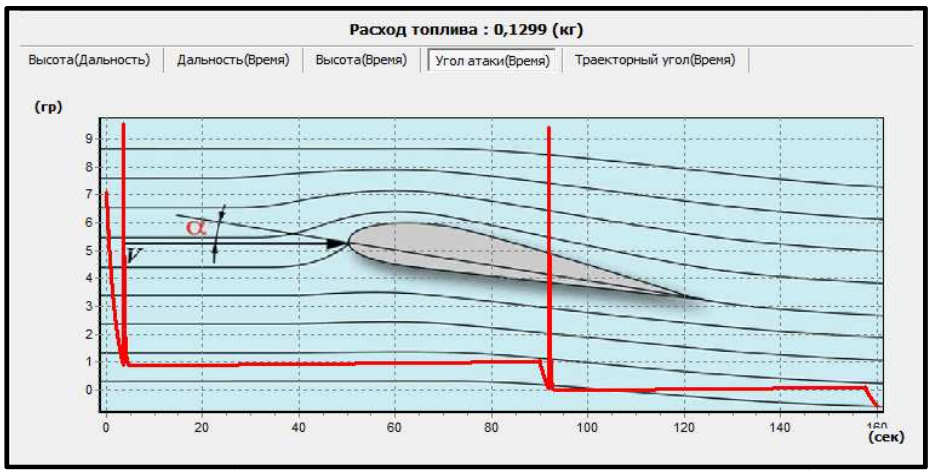


Рис. 7. Зависимость угла атаки от времени

Заключение. Рассмотренная задача управления полетом беспилотного самолета в вертикальной плоскости до достижения заданных конечных условий с учетом минимизации расхода топлива решается в классе непрерывно-дискретных систем, с учетом определенных допущений обоснован переход к дискретной системе. Полет самолета в работе разбивается на отдельные маневры: увеличение скорости или набор высоты полета до требуемых значений, расход топлива выступает в качестве длины дуги орграфа и требуется найти кратчайший путь.Для решения задачи была разработана программа, позволяющая рассчитывать оптимальный расход топлива как для дискретной, так и для непрерывной системы.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ16-38-00079 мол_а, гранта Президента Российской Федерации МД-4560.2015.8.

Список литературы

1. Горбунова Ю.А., Пегачкова Е.А. Задача управления беспилотным самолётом методом динамического программирования в теории графов // XLII Международная молодёжная научная конференция «Гагаринские

чтения – 2016». Сборник тезисов докладов: В 4 т. М.: Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 2016. Том 1. С. 467-468.

2. Вентцель Е.С. Элементы динамического программирования. М.: Наука, 1964. 175 с.

3. Беллман Р., Дрейфус С. Прикладные задачи динамического программирования. М.: Наука, 1965. 458 с.

4. Лебедев А.А., Чернобровкин Л.С. Динамика полета беспилотных летательных аппаратов. М.: Оборонгиз, 1973. 615 с.

Пегачкова Елена Александровна, канд. физ.-мат. наук, доц., pegachkova@mail.ru, Россия, Москва, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),

Кузнецова Екатерина Львовна, д-р физ.-мат. наук, проф., lareyna@mail.ru, Россия, Москва, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),

Горбунова Юлия Антоновна, студент, julia_gorbunova@list.ru, Россия, Москва, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)

CONTROL OF THE PILOTLESS AIRCRAFT BY METHOD OF DYNAMIC PROGRAMMING IN THE THEORY OF COUNTS

E.A. Pegachkova, E.L. Kuznetsova, Yu.A. Gorbunov

The task of control of the pilotless aircraft which needs to execute the set maneuver with the minimum costs of fuel is considered. Using the mathematical flight model describing movement of the plane in the channel of pitch the orgraf in which fuel costs for accomplishment of one of two maneuvers act as length of an arch was constituted: increase in speed with a fixed height or ascent at the fixed speed. Generalization of the classical principle of an optimality and method of dynamic programming in terms of the theory of counts is applied to the considered task, that is the minimum consumption of fuel is in the shortest way on the oriented count.

Key words: optimum control, the oriented count, dynamic programming.

Pegachkova Elena Aleksandrovna, candidate of physical and mathematical sciences, docent, pegachkova@mail.ru, Russia, Moscow, Moscow Aviation Institute (National research university),

Kuznetsova Ekaterina Lvovna, doctor of physical and mathematical sciences, professor, lareyna@mail.ru, Russia, Moscow, Moscow Aviation Institute (National research university),

Gorbunov Yulija Antonovna, student, julia_gorbunova@list.ru, Russia, Moscow, Moscow Aviation Institute (National research university)

УДК 678.074:54.02

ОЦЕНКА РЕЛАКСАЦИИ ЛОКАЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ УСАДКИ В ИНТЕРВАЛЬНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ ПЛЁНКАХ

А.В. Ерофеева, А.П. Кондратов

С целью защиты товаров массового спроса от подделки и для людей с ослабленным зрением, владеющих навыками распознавания тактильной маркировки (чтения текста Брайля) на упаковку товаров наносятся рельефные надписи и условные знаки. Эта маркировка основана на особенностях обратимой деформации и релаксации напряжений в анизотропных стеклообразных полимерах и технологии получения интервальных материалов путем их локальной изометрической термообработки под давлением.

Ключевые слова: внутренние напряжения, термоусадочные пленки, релаксация, термообработка полимеров, этикетка, тара, текст Брайля.

В различных вариантах технологии термоформования изделий из пленок и листов для изменения формы полимерного тела используются следующие действия в определенной последовательности. Нагревание заготовки или ее части до температуры, превышающей температуру стеклования (размягчения) полимера, механическое деформирование (изгиб или растяжение) и фиксация формы охлаждением или химическим структурированием. Режимы операций определяются теплофизическими характеристиками и реакционной способностью полимера, возможностью одновременного протекания релаксационных и химических процессов в малый промежуток времени. После охлаждения объемное полимерное изделие или тактильный рельеф на пленке обретают окончательный вид. Выполненное таким образом формование применительно к маркировке упаковочного материала называется явной [1] и выполняет исключительно информационную функцию. Явная маркировка может быть скопирована и легко воспроизведена на любом упаковочном материале с целью сокрытия в упаковке контрафактного товара (подделки).

Предложенный нами способ скрытой маркировки термоусадочных материалов является бифункциональным, устойчивым к подделке [2] и имеет иную последовательность операций. Термомеханическое воздействие на полимерную пленку оказывается лишь на некоторую ее часть и осуществляется в изометрических условиях, обеспечиваемых фиксацией габаритных размеров образца и/или высокой жесткостью стеклообразного полимера вокруг зон термообработки. После охлаждения до температуры стеклования пленка с нанесенной латентной (скрытой) маркировкой остается плоской и практически не отличается от исходной. Маркировка проявляется при тотальном нагревании всей пленки с целью усадки до температуры, превышающей температуру стеклования.

Недостаток предшествующих экспериментальных работ в данной области [3-5] заключается в использовании в качестве материала термоусадочных этикеток и защитных элементов упаковки композиций поливи-

нилхлорида. Несмотря на то, что поливинилхлорид относится к термопластичным полимерам он практически непригоден для вторичной переработки и утилизации.

Цель статьи – определение оптимальных условий локальной изометрической обработки пленок из разных полимеров, обеспечивающих достаточную термостимулируемую усадку этикетки на цилиндрической таре с одновременным выявлением рельефной маркировки шрифтом Брайля.

Объекты и методы исследования. Исследованы термоусадочные пленки из полиэтилентерефталата (ПЭТФ), полистирола (ОПС) и поливинилхлорида (ПВХ) толщиной 50 и 70 мкм производства ведущих российских, зарубежных и совместных международных фирм производителей упаковки и этикетки: Мультипак; Bilcare, PET-G film SF T11 G in QS95; ПЭТФ, APS, Alfaterm; ОПС от Мультипак; APS-HS Shrink Film; PVC, Dongil Chemical; PET-G film SF T21 G2 in QS95; Pentalabel, Rigid PETG LF-TG10F12 – T45; PET, Alfaterm.

В качестве основного метода исследования использовали модернизированный лабораторный стенд для термоциклирования термоусадочных этикеток [6].

Образец имеет форму ленты (полосы) размером 120×10 мм и в захватах стенда принимает вид кольца

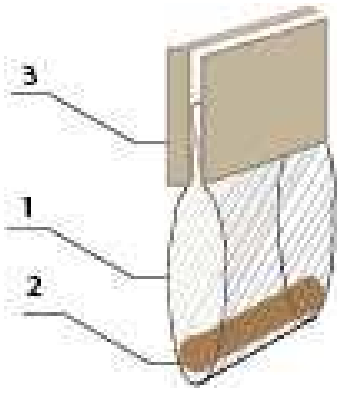


Рис. 1. Вид образца пленки в захватах лабораторного стенда для термомеханических испытаний [6]: 1 - ленточный образец термоусадочной пленки; 2 - цилиндрический деревянный держатель; 3 – зажим для верхней части ленты

Усадку пленок определяли путем нагревания в воздушном термостате, обрезав размером 60×60 мм уложенных между двумя пленками ПТФЭ, зажатыми струбциной.

Толщину пленок до и после термоусадки измеряли толщиномером марки «Константа К6Ц» с точностью ± 0,001 мм.

Плотность полимеров до и после термоусадки контролировали при помощи аналитических весов марки VIBRA AF-R-220 CE с приставкой для гидростатического взвешивания.

Обсуждение результатов. Известно что, степень (коэффициент) усадки различных полимерных пленок вообще и термоусаживаемых полимерных материалов в частности, зависит от температуры (рис. 2) [6 - 7]. Усадка проявляет анизотропные характеристики пленок и зависит от химического состава и технологии получения образцов. Наиболее чувствительной к повышению температуры является пленка ОПС производства фирмы Мультипак (50). Усадка заметна (превышает 5%) уже при температуре 65 ^{o}C. Наименее чувствительной к повышению температуры является пленка ПЭТФ производства фирмы Alfaterm (50). Усадка заметна (превышает 5%) лишь при температуре более 72 ^{o}C.

При температуре превышающей температуру стеклования термопластичных полимеров (85...90 ^{o}C) у большинсва иссследованных образцов пленок проявляется дополнительная усадка в перпендикулярном направлении, которая достигает 6 %.

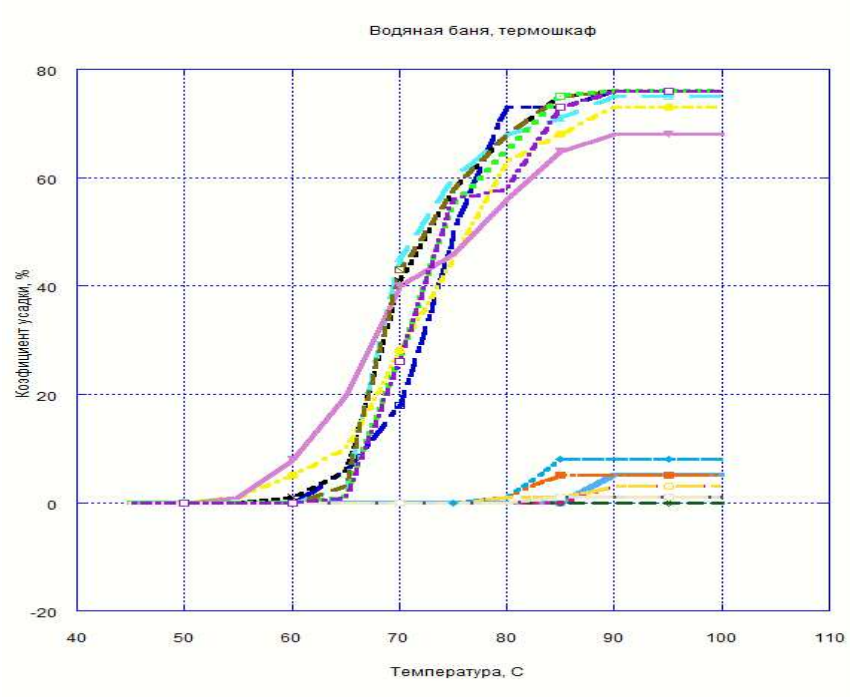


Рис. 2. Зависимости коэффициента термоусадки пленок 9 марок ПВХ, ПЭТФ и ПС промышленного производства (табл.2) от температуры

Нами исследована стереометрия анизотропной усадки этикеток и незапечатанных пленок из поливинилхлорида. Для выявления сущности процессов массопереноса при усадке разрабатывались геометрические модели, позволяющие наглядно представить изменение габаритных размеров

пленки при равномерном нагревании в свободном состоянии (рис. 3) и при локальной термообработке отдельных участков пленки (рис. 3) с целью получения интервальных материалов [6].

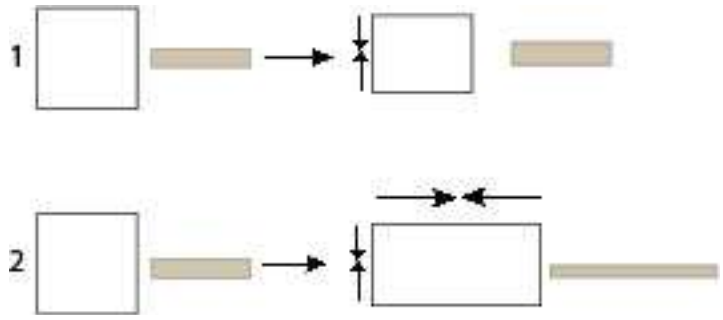


Рис. 3. Геометрия термоусадки пленок при нагревании в свободном состоянии

На рисунке показано как, полимер при односторонней усадке может себя вести. Возможны два крайних случая: в одном случае пленка утолщается, а в другом удлиняется. Однако на практике встречаются промежуточные варианты.

В отличие от геометрических моделей, показанных на рис. 3, исследуемые в данной работе термоусадочные пленки ведут себя по-разному. После термоусадки образцов в свободном состоянии при температуре 110 ^{o}C произошло и удлинение, и утолщение образца одновременно.

После термообработки образцов в свободном состоянии при температуре близкой к температуре стеклования термоусадка пленок из разных полимеров (ОПС; ПЭТФ; ПВХ) приведена в табл. 1.

Таблица 1

Деформация усадки при воздействии горячей воды (80 ^{o}C) в течение 10 с, %

Шифр полимера и производитель	Толщина, мкм	Плотность, г/см^3	Масса 1 м^2, г	Коэффициент термоусадки, %
ОПС Alfaterm	70 ± 10	1,30± 0,02	57,2 ± 10	66 ± 2
ПЭТФ Alfaterm	45 ± 1	1,29 ±0,02	58 ± 5	65 – 73
ПВХ Dongil Chemical	45 ± 10	1,29 ± 0,02	58 ± 5	31 ± 3
ПВХ ООО «Дон-полимер»	90 ± 10	1,32± 0,02	68± 5	32 ± 2
ПВХ ООО «Дон-полимер»	70 ± 10	1,3 ± 0,02	58 ± 5	50 ± 3
ПВХ ООО «Дон-полимер»	60 ± 10	1,3 ± 0,02	57 ± 5	50 ± 3

Количественное сравнение механических показателей и величины термоусадки пленок из разных полимеров при температуре близкой к интервалу плавления полимеров приведено в табл. 2.

Видно, что усадка пленок при температуре близкой к интервалу плавления полимеров привышает усадку при температуре практического использования пленок на 3...6% .

Таблица 2

Термоусадочные свойства полимерных пленок в интервале температур до точки плавления полимера

Полимер, фирма производитель или марка, (калибр пленки), мкм	Толщина ТУ пленки, мкм				Степень обратимой деформации ТУ пленки при нагревании	
	Исходная	После изотермической обработки в термостате		Отклонение от расчетной толщины, %		
	Измеренная		Расчетная		$\lambda_l = l_y / l_o$ вдоль	$\lambda_b = b_y / b_0$ поперек
ПЭТФ, Мультипак (50)	47,3±0,9	315	304,07	2,00	0,93	0,16
ПЭТФ, Bilcare, PET-G film SF T21 G2 in QS95 (50)	49,5±1,1	274	284,21	4,50	0,95	0,18
ПЭТФ, Pentalabel, Rigid PETG LF-TG10F12 – (45)	46,4±1,6	211	266,41	18,30	0,95	0,18
ПЭТФ, Bilcare, PET-G film SF T11 G in QS95 (50)	50,9±2,7	169	194,11	11,40	0,98	0,26
ОПС, Мультипак (50)	50,2±1,4	312	267,33	17,00	0,87	0,21
ПЭТФ, Alfaterm (50)	49,5±1,1	274	284,21	4,50	0,95	0,18
ОПС, APS-HS Shrink Film (40)	41,1±3,4	245	199,40	12,20	0,88	0,23
ПВХ, Dongil Chemical (45)	45,6±1,5	189	193,58	1,06	0,88	0,26
ОПС, Alfaterm (70)	70,1±1,1	262	274,90	4,50	0,85	0,30

Все исследованные термоусадочные материалы условно разделены на две группы: одноосно ориентированные и двуосно-ориентированные.

Преимущественно одноосно ориентированные пленки: ПЭТФ и ОПС производства фирмы Мультипак.

Приемущественно двуосно ориентированные пленки: ПЭТФ производства фирмы Alfaterm, ПВХ производства фирмы Dongil Chemical, ОПС производства фирмы Alfaterm.

Это разделение условно, но позволяет правильно выбрать материал для тактильной маркировки этикетки шрифтом Брайля [8].

Как паказано в работе [3] маркировка этикеток и термоусадочной упаковки шрифтом Брайля возможна при определенном соотношении скорости релаксационных процессов во всем запечатываемом материале и на участках пленки подвергнутых изометрической термообработке.

Для исследования скорости релаксационных процессов был использован модернизированный лабораторный стенд. Исследовали два образца, один образец пленки в исходном состоянии, а второй после изометрической термообработки в прессе. Образец пленки подвергнутый изометрической термообработке в прессе является физической моделью точки Брайля в технологии маркировки описанной в работе [3]

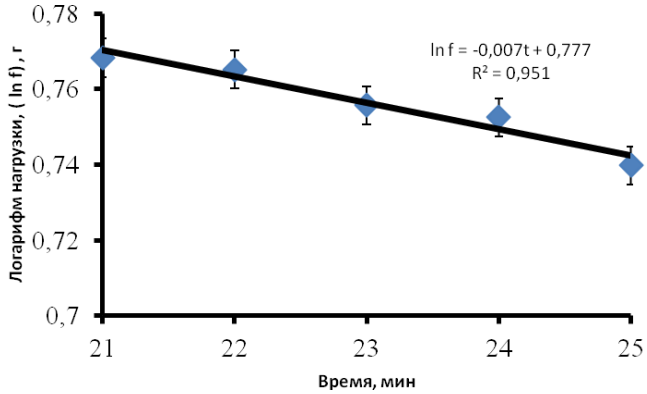


Рис. 4. Логарифмическая зависимость сжимающего напряжения садки от времени изотермической выдержки пленки ПВХ при температуре 100 °С

Образец после изометрической термообработки в пересе помещали в лабораторный стенд [8] и в компьютепрной программе управляющей растяжением образцов назначали начальную нагрузку 100 г. Это делается для устранения возможных зазоров между образцом и держателями. Стенд автоматичекски сам выставляет заданное значение натяжения образца (нагрузку 100 Г). После этого программатор стенда повышает температуру в камере до 100 °С с постоянной скоростью . После достижения температуры испытания в течение 20 минут измерем снижение нагрузки вследствие релаксации напряжений. Те же операции повторяем со вторым образцом без термообработки.

Программа позволяет записать в электронную таблицу и увидеть на монитере график изменения нагрузки во времени, и одновременное изменение температуры во времени. Сохраняем файл формата Excel для дальнейшей работы с графиком. Получив файлы изменения нагрузки во времени и изменения температуры во времени формата Excel производим в этой программе логарифмирование значений нагрузки для перевода функций вида (1)

$$f_{эл} = \sigma_{эл.о} \times e^{-\beta t} \qquad (1)$$

в линейную зависимость (2)

$$\boldsymbol{ln}\ f = \beta\ t + const,$$

в которой структурочувствительный показатель β – характеризует среднюю скорость релаксационных процессов.

По определению [10] среднюю скорость релаксационных процессов

$$\beta = tg\alpha = 1/\tau,$$

$\tau = 1/ tg\alpha$, где τ – это время релаксации пленки.

График зависимости ***ln f*** - логарифма нагрузки от времени (рис.4) , имеет вид прямой. Генерируем средствами программы Excel линию тренда, проходящую с достоверностью аппроксимации $R^2 = 0{,}951$ по экспериментальным точкам, и уравнение

$$\ln f = -0{,}007t + 0{,}777,$$ где 0,007 является β.

Из чего мы можем сделать вывод, что $\tau = \frac{1}{0{,}007}$. Время релаксации равно τ = 142 секунды.

Затем те же вычисления повторяем с результатами измерения релаксации напряжения во втором образце исходной пленки (без термообработки).

Генерируем средствами программы Excel линию тренда, проходящую с достоверностью аппроксимации $R^2 = 0{,}93$ по экспериментальным точкам , и уравнение $\ln f = -0{,}012t + 6{,}210$, где 0,012 является β. Время релаксации равно τ = 83 секунды

Из эксперимента сдедует вывод, время релаксации в термообработанных местах термоусадочных пленок больше и их усадка при формировании точек шрифта Брайля идет со скоростью приблизительно вдвое меньшей, чем во всей пленки. Это различие обусловливает поднятие рельефа в сторону контакта пленки с нагревающим инструментом (печатной формой).

Оценка зависимости высоты точек Брайля от толщины термоусадочной пленки. Для оценки зависимости высоты точек от толщины термоусадочной пленки и температуры ее предварительной термообработки были исследованы образцы пленок поливинихлорида фирмы «ДОН-полимер» различных толщин. Результаты исследований сведены в табл. 8, 9, 10.

Таблица 8

Высота точек Брайля на пленке ПВХ «Дон-полимер» (90 мкм)

Доля свободной усадки пленки до фиксации этикетки на таре	Высота точек Брайля диаметром 3 мм после предварительной ТО 60°С, мм	Высота точек Брайля диаметром 3 мм после предварительной ТО 80°С, мм
0,39	0	0,03
0,43	0	0,58
0,47	0,64	-

Таблица 9

Высота точек Брайля на пленке ПВХ «Дон-полимер» (70 мкм)

Доля свободной усадки пленки до фиксации этикетки на таре	Высота точек Брайля диаметром 3 мм после предварительной ТО 60°С,мм	Высота точек Брайля диаметром 3 мм после предварительной ТО 80°С, мм
0,26	0	0
0,37	0	0,54
0,43	0,62	-

Таблица 10

Высота точек Брайля на пленке ПВХ «Дон-полимер» (60 мкм)

Доля свободной усадки пленки до фиксации этикетки на таре	Высота точек Брайля диаметром 3 мм после предварительной ТО 60°С(мм)	Высота точек Брайля диаметром 3 мм после предварительной ТО 80°С(мм)
0,26	0	0
0,37	0	0,45
0,43	0,49	-
0,44	0,54	-

По данным таблиц можно сделать следующие выводы:

– чем больше толщина термоусадочной пленки, тем выше высота точек Брайля на этикетках после термоусадки;

– высота точек Брайля на этикетках после термоусадки уменьшается при проведении их предварительной термообработки (ТО), являющейся побочным эффектом термопечати [5].

Список литературы

1. Савенкова И.А., Кондратов А.П. Новые комбинированные способы маркировки упаковок и этикеток, изготовленных из полимерных термоусадочных материалов // Известия высших учебных заведений "Проблемы полиграфии и издательского дела". № 5 , 2014. С. 28-34.

2. Коновалова М.В., Кондратов А.П. Маркировка этикеток и групповой упаковки из термоусадочной поливинилхлоридной пленки шрифтом брайля // Известия высших учебных заведений. Проблемы полиграфии и издательского дела. № 3, 2015. С. 53 - 59.

3. Kondratov A.P., Volinsky A.A., Zhang Yi, Nikulchev E.V. Polyvinyl chloride film local isometric heat treatment for hidden 3D printing on polymer packaging // Journal of Applied Polymer Science, 2016. Vol. 133. No. 8. P. 43 - 46.

4. Kondratov P. Thermo shrinking films with interval macrostructure for protection of packaging from falsification. Modern Applied Science, 2015. Vol. 8. №. 6. P. 204-209.

5. Черкасов Е.П., Кондратов А.П. Модернизация штампа для локальной термостабилизации пленки с эффектом «памяти формы // Известия высших учебных заведений. Проблемы полиграфии и издательского дела. №1, 2015. С. 37 - 43.

6. Кондратов А.П. Градиентные и интервальные термоусаживающиеся материалы для защиты полиграфической продукции от фальсификации // Известия высших учебных заведений. Проблемы полиграфии и издательского дела, 2010. № 4. С. 57 - 65.

7. Кондратов А.П. Новые полимерные пленки для печати защищенной от подделки этикетки и упаковки // Известия высших учебных заведений. Проблемы полиграфии и издательского дела, 2011. № 2. С. 83 - 94.

8. Коновалова М.В., Кондратов А.П. Маркировка этикеток и групповой упаковки из термоусадочной поливинилхлоридной пленки шрифтом Брайля // Известия высших учебных заведений. Проблемы полиграфии и издательского дела. № 3, 2015. С. 53 - 59.

9. Кондратов А.П., Зачиняев Г.М. Физическое моделирование процесса фиксации термоусадочных этикеток на цилиндрической таре в автоматах-аппликаторах // Известия высших учебных заведений. Проблемы полиграфии и издательского дела, 2013. № 3. С. 31 - 39.

10. Кондратов А.П., Божко Н.Н. Технология материалов и покрытий // Министерство образования и науки Российской Федерации, Федеральное агентство по образованию. М.: Московский гос. ун-т печати, 2008, 340 с.

Ерофеева Анна Вячеславовна, канд. техн. наук, доц., anna.erofeeva@gmail.com, Россия, Москва, Московский политехнический университет,

Кондатов Александр Петрович, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой, anna.erofeeva@gmail.com, Россия, Москва, Московский политехнический университет

EVALUATION OF STRESS RELAXATION OF INTERVAL POLYMER FILMS

A.V. Erofeeva, A.P. Kondratov

Embossed lettering and symbols are applied to the packaging of goods intended for visually impaired people with skills to recognize tactile marking (read Braille text). Marking of shrink labels is based on the reversible deformation characteristics and anisotropic tension relaxation in glassy polymers and technology of materials interval by their local isometric heat treatment under pressure. By separating the label marking can be carried out in time of operations on the information recording films and their display for visual or tactile reading from mass market to protect against counterfeiting.

Key words: thermo-mechanical tests, internal tensions, shrink films, relaxation, thermal processing of polymers, labels, pack.

Erofeeva Anna Vyacheslavovna, candidate of technical sciences, docent, anna.erofeeva@gmail.com, Russia, Moscow, Moscow Polytechnic University,

Kondratov Alexander Petrovich, doctor of technical sciences, professor, head of the department, apkrezerv@mail.ru, Russia, Moscow, Moscow Polytechnic University

УДК 778.14.02

О СОВРЕМЕННЫХ ПОДХОДАХ К ОРГАНИЗАЦИИ СТРАХОВОГО ХРАНЕНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ ДОКУМЕНТОВ

Е.Е. Евсеев, П.Е. Завалишин, С.Ю. Борзенкова, Б.С. Яковлев

Рассматриваются вопросы разработки единой методологии страховой защиты электронной информации от рисков утраты или недоступности и организации единого гибридного хранилища цифровых документов.

Ключевые слова: защита информации, информационная безопасность, электронная документация, страховой фонд документации, гибридное хранилище цифровой информации.

Интенсивное развитие информационных технологий и стремительный рост использования электронной информации во всем мире являются одним из основных признаков современного этапа развития человеческой цивилизации. Как и любая другая информация, электронные данные подвергаются риску утраты или недоступности при возникновении различных кризисных явлений. Это создает предпосылки для разработки и совершенствования комплекса специальных мер, направленных на правовую, организационную, техническую и физическую защиту электронной информации.

Одним из направлений защиты документированной информации от ее физической утраты является информационное страхование, под которым понимается заблаговременное изготовление аутентичной копии данной информации и закладка ее в страховые резервы. При этом аутентичная страховая копия информации может быть записана на любом типе носителя, отвечающем общим требованиям компактности размещения, надежности хранения и удобства доступа.

Ранее, когда электронных документов не существовало, основной технологией по информационному страхованию особо ценных государственных документов было микрофильмирование. Для решения проблем страхового хранения информации во всех ведущих странах мира осуществлялся перевод документов на микрофильмы. Особые свойства микрофильма как носителя и специальные условия содержания страховых фондов давали возможность гарантированно и надежно хранить информацию многие десятилетия и при необходимости пользоваться ей случае чрезвычайных ситуаций. Микрофильмирование и до настоящего времени является единственной стандартизированной и проверенной технологией , позволяющей хранить информацию в течении 75 лет и более.

Бурное развитие новых электронно-цифровых технологий, практически повсеместное внедрение систем электронного документооборота как внутри предприятий и организаций, так и внутри государства, привело к необходимости обратить пристальное внимание на вопросы системати-

зации электронных документов, их защиты от несанкционированного доступа, обеспечения долговременного хранения, создания единого управления потоками этих документов и их маршрутизации по сети Интернет.

Такие тенденции уже сейчас крайне ощутимы. Так, например, госкорпорация "Ростех" предложила создать единый центр хранения и обработки данных на базе Национального центра информатизации (одна из структур «Ростеха»), предоставляющий операторам услуги по хранению информации абонентов, согласно требованиям так называемого "закона Яровой", который обязывает операторов связи до полугода хранить весь трафик клиентов - звонки, письма, файлы, разговоры, а в течение трех лет - данные об этих фактах передачи информации [1].

По замыслу разработчиков, создание единого оператора услуг хранения данных должно снизить затраты участников рынка на инфраструктуру и предложить отечественные технические решения, а так же способствовать сохранению стоимости услуг связи для конечного потребителя и позволить небольшим провайдерам остаться на рынке. Кроме того, такой оператор мог бы стать единым центром взаимодействия с ФСБ. Но для эффективной работы такого центра необходимо формирование системы взаимодействия с операторами, а для хранения таких огромных объемов данных требуется оборудование, производство которого отсутствует в России.

Согласно поручению Президента РФ по вопросам отдельных мер государственного регулирования в сфере противодействия терроризму и обеспечения общественной безопасности [2], для решения этих проблем в Правительстве России проводятся регулярные совещания, на которых с потенциальными производителями оборудования обсуждаются способы построения системы сбора, хранения и обработки электронной информации [3]. Рабочая группа с участием операторов связи и производителей оборудования должна провести анализ и представить предложения в части возможности, сроков и объемов финансовых затрат на организацию производства отечественной техники и создание отечественного программного обеспечения, необходимого для хранения и обработки голосовой информации, письменного текста, изображений, звуков, видео или иных электронных сообщений пользователей Интернета и информации об этих пользователях, с указанием конкретных производственных площадок в Российской Федерации.

Можно отметить и еще один факт по активизации в нашей стране работ по защищенной передаче и сохранению электронно-цифровой информации. Так в 2014 году, на фоне обострения мировой политической обстановки и опасений по возможному отключению Рунета от глобальной сети, российские чиновники озаботились созданием «резервной копии» Рунета. В конце 2015 года Минкомсвязи России подготовило законопроект, который предполагал создание «государственной информационной

системы обеспечения целостности и безопасности функционирования российской части сети Интернет». По планам авторов законопроекта, такая государственная информационная система должна стать «дублером» всемирной системы – базы IP-адресов, маршрутизации трафика в Сети и системы DNS (которая связывает IP-адреса с буквенными названиями сайтов). Кроме того, она должна помочь оптимизировать маршрутизацию и более эффективнее бороться с DDoS-атаками. К сожалению, пока данный законопроект существует в нескольких версиях и не был вынесен на публичное обсуждение. В настоящее время предполагается, что в конце 2016 года должна появиться так называемая «резервная копия» части инфраструктуры Рунета [4].

Практически одновременно с этим происходят организационные преобразования в Федеральном архивном агентстве (Росархив). Так, 4 апреля 2016 года Президентом В.Путиным подписан Указ «О Федеральном архивном агентстве», согласно которому руководство деятельностью Федерального архивного агентства напрямую осуществляет Президент Российской Федерации. При этом Росархив продолжает развивать современные технологии работы с информационными ресурсами. Начаты мероприятия по образованию органа при Росархиве, который будет заниматься нормативно-правовым регулированием в сфере документооборота и управления документопотоком. Это уже реализовано в архивах КНР и США.

Также в Росархиве внедряется централизованная система управления архивами – комплекс «КАИСА-Архив», который представляет собой ежедневно пополняемую базу данных. Программные модули этого комплекса охватывают все основные направления архивной деятельности: обеспечение сохранности, учёт, комплектование и использование документов любого архивного фонда российских регионов. Комплекс обеспечивает возможность приёма заявок и оказания электронных архивных услуг населению посредством единого портала государственных и муниципальных услуг. В ходе развития комплекса будут решаться задачи интеграции имеющихся информационных ресурсов, обращения к ним граждан и организаций на основе удалённого доступа, предоставления государственных услуг в электронной форме, развития пользовательских сервисов через сеть Интернет. Реализацию проекта осуществляет компании «АльтСофт» на конкурсной основе. Этой компанией проводится автоматизация государственных архивов, обеспечение возможности совершать онлайн-оплату через портал государственных слуг при получении запросов, реализовать возможность использования электронной подписи. Следующим этапом является автоматизация рабочих мест в муниципальных архивах. Цель — создание к 2019 году Единой региональной архивной информационной системы.

Таким образом можно отметить, что в кризисный период 2014-2016 года со стороны государства интерес к сохранению и защите электронных документов, данных и сетевых коммуникаций значительно вырос. Это связано не только со стремлением к укреплению государственной безопасности, но и с желанием обеспечить стабильную работу российского сегмента сети Интернет при возможном отключении его западными странами.

Такую серьезную проблему возможно решить только комплексно, с привлечением профильных специалистов смежных отраслей и с учетом всего опыта, накопленного в мировой и отечественной практике. Здесь понадобятся глубокие знания по идеологии, теории и практике создания и сохранения как архивных фондов, так и единого российского страхового фонда документации, где уже много десятилетий действуют единые стандарты и нормы, регламентирующие порядок работ по информационному страхованию различных видов документации.

Конечно, без современных технологий при решении этих глобальных проблем не обойтись. Ведь еще совсем недавно мы даже не представляли, какие возможности нам может предоставить использование современных информационных технологий в совокупности с Интернетом. А теперь любой человек, предприятие или организация имеет возможность пользоваться так называемыми облачными хранилищами и свободно размещать в них любые копии различных документов, а также редактировать их с помощью любого доступного на любой момент устройства (компьютера, смартфона, планшета и т.п.). Все это доступно для каждого благодаря Интернету и сохраняемой на удаленном сервере (серверах) информации. С каждым годом таких хранилищ становиться все больше и они постепенно завоевывают доверие пользователей. Приведем следующие положительные моменты, возникающие при пользовании облачными хранилищами:

1. Бесплатный ограниченный или небольшой объем на удаленном сервере.
2. Доступ к своим документам везде, где работает Интернет.
3. Быстрый обмен электронными документами и цифровой информацией между пользователями.
4. Доступ с различных электронных устройств (планшет, мобильный телефон, компьютер и т.д).

Однако в реальности хранение электронных документов на компьютере, внутренней локальной сети и в облачных хранилищах небезопасно, особенно в случае наличия у владельца строго конфиденциальной информации. Она может подвергнуться хищениям, несмотря на все предпринимаемые со стороны пользователей и обслуживающих специалистов меры, такие как, например, различные уровни шифрования.

Уже сейчас есть масса примеров, когда строго конфиденциальная информация подвергается утечкам, несмотря на применение самых современных средств и систем безопасности [5]. Это случаи взломов личной почты, незаконного перевода средств на счета в зарубежные страны из банков, кражи электронной технической и организационный документации с серверов и компьютеров институтов и государственных учреждений, кражи средств с кредитных карт и т.д. Эти риски не позволяют говорить от том, что в настоящее время существуют защищенные электронные данные. Они могут быть гарантированно защищены только в том случае, если к ним временно отсутствует доступ, которым может управлять сам пользователь.

Также необходимо отметить, что производство изделий и продукции, особенно оборонного назначения само по себе является высокотехнологичным. Во многих образцах и продукции для улучшения качества их работы и повышения технических характеристик, применяются не только новые механизмы и технологии, которые были заложены при проектировании с использованием систем САПР и расчетных программ, но и собственное программное обеспечение. Для обеспечения наличия полного комплекта технической документации на такие высокотехнологические изделия и продукцию, особенно выпускаемую в рамках гособоронзаказа, необходимо проводить ее информационное страхование в системе ЕР СФД.

Поэтому в качестве одного из оптимальных подходов может быть выбран путь применения большого практического опыта специалистов системы ЕР СФД, накопленного в области информационного страхования технической документации и действующей в настоящее время нормативной базы по страховому хранению. Этот опыт и нормативная база могут быть адаптированы к практике хранения в этой системе электронных документов различных видов. Такой надежный и проверенный временем способ даст возможность пользователю хранить свои электронные документы аналогично тому, как если бы он хранил их в банковской ячейке (сейфе). По входящему запросу система может обеспечить доступ имеющего на это право пользователя к своей информации с помощью любых средств связи и передать ему информационное содержание документа, в том числе и в бумажной форме представления. Такие услуги могут предоставляться, например, через единый портал государственных услуг.

Хранение конфиденциальной электронной информации по методологии, принятой в ЕР СФД, а также размещение открытой информации на отечественных серверах и системах хранения, позволит создать так называемое единое гибридное хранилище под управлением единого оператора. Построение указанной системы на единых принципах и условиях откроет путь к решению практически всех обозначенных проблем и значительно повысит информационную безопасность страны, особенно а сфере защиты конфиденциальных электронных данных закрытого характера.

Кроме того, при передаче данных на хранение в единое гибридное хранилище нужно постепенно отходить от практики перевода информации из одной среды в другую (аналоговою информацию в цифровую и наоборот), так как конверсии формы представления являются очень трудоемкими и затратными операциями, требующими много времени и труда специалистов высокой квалификации. Такой подход в перспективе позволит сэкономить государственные средства и организовать хранение электронной информации именно в том виде, в котором она была создана изначально, причем на отечественных электронных носителях, которые нужно начать производить в Российской Федерации.

При этом необходимо учитывать все возможные риски такого шага, которые должны быть определены на самом начальном этапе проекта. Также потребуется четкая формулировка технического задания на разработку отечественного электронного носителя, который должен обеспечивать хранение любой документации и данных, представленных в электронном виде на весь период жизненного цикла информации, изделия или продукции, но сроком не менее 10-15 лет. Основой реализации указанных планов должна стать соответствующая нормативно-правовая база, в рамках совершенствования которой нужно возобновить разработку проекта профильного Федерального закона, касающегося информационного страхования особо важных государственных документов и включающего в себя вопросы их классификации, систематизации, обеспечения поставок на страховое копирование, надежного хранения и обеспечения выдачи пользователям при утрате или невозможности доступа к оригиналам.

В заключение можно сказать, что решить такую серьезные задачу, как разработка, внедрение и использование единой методологии хранения электронных документов, можно только совместно с федеральными органами исполнительной власти и всеми заинтересованными сторонами как государственного, так и негосударственного сектора экономики. Для коллегиального обсуждения указанных вопросов и выработки единого межведомственного и межотраслевого подхода по реализации планируемых мероприятий может потребоваться создание при Правительстве России объединенной совещательной комиссии с вхождением в ее состав компетентных представителей органов государственной власти, министерств и ведомств, государственных корпораций, промышленных предприятий и коммерческих структур.

Гибридное хранение документов, выполненных в электронном виде, единая государственная политика в части методологии их хранения и использования, помогут обеспечить национальную безопасность страны на самом высоком уровне и надежно защитить информационное пространство России.

Список литературы

1. Закон Яровой может быть на руку госкорпорации «Ростех». [Электронный ресурс] URL: http://www.vedomosti.ru/technology/articles/ 2016/ 08/22/ 653913-million-nadezhnie-ruki (дата обращения: 29.09.2016).

2. Перечень поручений по вопросам отдельных мер государственного регулирования в сфере противодействия терроризму и обеспечения общественной безопасности. [Электронный ресурс]. URL: http://www.kremlin.ru/acts/assignments/orders/52486 (дата обращения: 29.09.2016).

3. В Минпромторге обсудили построение системы сбора, хранения и обработки информации. [Электронный ресурс]. URL: http://minpromtorg.gov.ru /press-centre/news/#!v_minpromtorge_obsudili_postroenie_sistem_sbora_hraneniya_i_obrabotki_informacii (дата обращения: 29.09.2016).

4 «Резервную копию» Рунета создадут к осени. [Электронный ресурс] URL: http://www.rbc.ru/technology_and_media/06/07/2016/577cf1209a7947517f8b3fb4 (дата обращения 29.09.2016).

5. Топ 10 самых крутых компьютерных взломов. [Электронный ресурс]. URL: http://dekatop.com/archives/9801 (дата обращения 29.09.2016).

Евсеев Евгений Евгеньевич, канд. техн. наук, директор по развитию, tula3e@yandex.ru, Россия, Тула, ГК Аурика,

Завалишин Павел Евгеньевич, канд. филос. наук, начальник отдела, zavalishin-p1975@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский филиал Научно-исследовательский институт стандартизации и унификации,

Борзенкова Светлана Юрьевна, канд. техн. наук, доц., tehnol@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Яковлев Борис Сергеевич, канд. техн. наук, доц., bor_yak@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

MODERN APPROACHES TO THE ORGANIZATION OF THE INSURANCE STORAGE OF ELECTRONIC DOCUMENTS

E.E. Evseev, P.E. Zavalishin, S.Y. Borzenkova, B.S. Yakovlev

Discusses the development of a unified methodology of insurance protection of digital information against risks of loss or unavailability, the organization of unified hybrid storage for digital documents

Key words: information security, information security, electronic documentation, insurance documentation, a hybrid storage of digital information

Evseev Evgeniy Evgenievich, candidate of technical sciences, director of development, tula3e@yandex.ru, Russia,Tula, Aurica Ltd,

Zavalishin Pavel Evgenievich, candidate of philosophical sciences, head of department, zavalishin@reprograf.ru, Russia, Tula, Tula branch «NIIR» of Federal State Unitary Enterprise Scientific Research Institute of standardization and unification,

Borzenkova Svetlana Yurievna, candidate of technical sciences, docent, tppzi@tsu.tula.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Yakovlev Boris Sergeevich, candidate of technical sciences, docent, bor_yak@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 655.025

ХАРАКТЕРИСТИКИ И ЭЛЕМЕНТЫ ПОЛИГРАФИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ ИДЕНТИФИКАЦИОННЫХ КАРТ

Л.Д. Порошина, Н.Е. Проскуряков

Рассмотрены основные характеристики идентификационных карт, приведены рекомендации по защите данного полиграфического продукта. Выявлен принцип достижения необходимого уровня защищенности идентификационных карт.

Ключевые слова: идентификационные карты, пластиковые карты, защищенность идентификационных карт.

В современном обществе широкое распространение пластиковые карты получили в конце XX века и быстро обрели свою популярность, став одним из средств совершения платежей, одним из видов документов. Примерами пластиковых карт могут являться банковские карты, сим-карты мобильных операторов, электронные проездные, дисконтные карты и подарочные карты магазинов, подарочные сертификаты, клубные карты, электронные медицинские полисы, водительские удостоверения, свидетельства о регистрации транспортного средства, социальные карты, идентификационные карты и другие виды полиграфической продукции.

Для унификации свойств, определения внешнего вида и методов защиты пластиковых карт существуют международные стандарты, также введенные в действие на территории Российской Федерации.

В рамках данной статьи рассмотрены основные характеристики и особенности идентификационных карт.

Само название «идентификационная карта» говорит за себя, т.е. идентификационная карта представляет собой пластиковую карту, содержащую информацию о своем владельце (держателе) и инициаторе производства данной карты (эмитенте). Также идентификационная карта может содержать иную информацию, определяющую рамки использования данного вида полиграфической продукции: срок действия, номер, фотография, дата выдачи и любые иные персональные данные владельца, условия использования, защитный код и другие защитные технологии.

Геометрия внешнего вида идентификационной карты приведена на рис. 1, расшифровка обозначений представлена в таблице.

Существуют различные предельные размеры идентификационных карт для каждого из форматов (см. в табл.) [1].

В таблице приведены предельные размеры идентификационных карт, предусматривающие допустимые «нижние» и «верхние» границы размеров.

Международные стандарты определяют размеры для идентификационных карт при определенных условиях окружающей среды: температура окружающей среды (воздуха) – от 20 до 26 С; относительная влажность воздуха – от 40 до 60%.

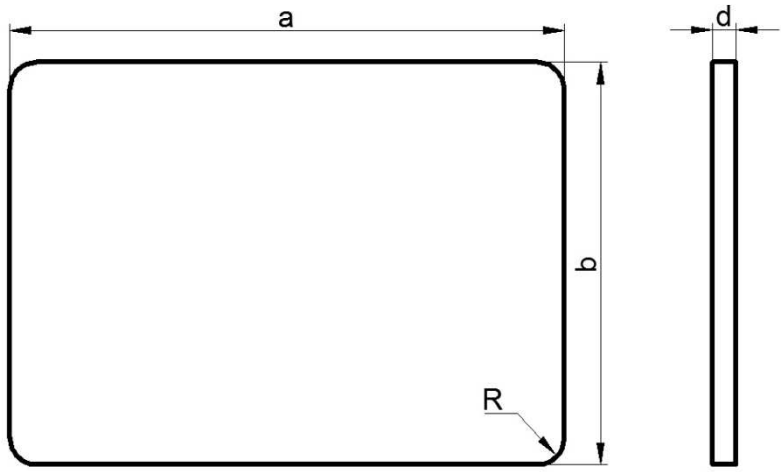


Рис. 1. Геометрические размеры идентификационной карты

Стандартом также предусмотрено изменение размеров идентификационной карты в результате ее эксплуатации (размеры возвращенных карт больше размеров неиспользованных карт).

Лицевая сторона идентификационной карты отличается наличием контактов интегральных схем (рис.2), т.е. технология хранения информации является основополагающей в данном случае; оборотная сторона имеет магнитную полосу (рис.3).

Характеристиками идентификационной карты являются:

- материал, из которого она изготовлена;
- прочность сцепления слоев материала;
- слипаемость;
- жесткость при изгибе карты;
- отклонение от плоскости (коробление) карты;
- стабильность размеров и коробления карт при воздействии влажности и температур;
- искажение поверхности;
- непрозрачность;

- долговечность;
- термостойкость;
- светостойкость;
- химическая стойкость;
- горючесть;
- токсичность;
- взаимодействие и загрязнение компонентов карты.

Соответствие формата и размеров идентификационных карт

Формат	Эксплуатационные характеристики	Длина (a), мм	Ширина (b), мм	Радиус скругления углов (R), мм	Толщина (d), мм
ID-000	Неиспользованная карта	24,90...25,10	14,90...15,10	0,90...1,10	0,68...0,84
ID-1	Неиспользованная карта	85,47...85,72	53,92...54,03	2,88...3,48	
	Возвращенная карта	85,47...85,90	53,92...54,18		
ID-2	Неиспользованная карта	104,80...105,20	73,80...74,20	3,00...5,00	
	Возвращенная карта	104,80...105,30	73,70...74,30		
ID-3	Неиспользованная карта	124,80...125,20	87,80...88,20		
	Возвращенная карта	124,80...125,30	87,70...88,30		



Рис. 2. Лицевая сторона идентификационной карты



Рис. 3. Оборотная сторона идентификационной карты

Рассмотрим основные характеристики карт.

1. Материал, из которого изготовлена идентификационная карта, может быть любым, отвечающим всем другим требованиям к данному виду полиграфической продукции: ламинированным однородным или композиционным. Одной из рекомендаций к выбору материала карты является отсутствие чувствительности к действию пластификаторов – составном компоненте гибких пластмасс, – при взаимодействии с которым ухудшаются физические свойства карты. Одним из лучших материалов для изготовления идентификационных карт является поликарбонат, состоящий из 5-9 слоев, позволяющий достичь необходимого уровня показателей универсальности, надежности и долговечности.

2. Прочность сцепления слоев материала, составляющего структуру идентификационной карты, должна быть более0,35 Н/мм.Положительным результатом проведения испытания на соответствие данного требования является разрыв верхнего слоя, являющийся показателем сцепление слоев наибольшей прочности.

3. Слипаемость готовой идентификационной карты проверяется посредством ее взаимодействия с другими картами. Соблюдение данного требования позволяет исключить возможность появления следующих дефектов: расслаивания; переноса материала на другую карту; изменения цвета или обесцвечивания; изменения в рельефе (отделки поверхности); деформации. Таким образом, отсутствие некоторых дефектов позволит отделить карту вручную от других карт из стопки.

4. Жесткость при сгибании (сильном механическом воздействии, не складке) карты должна быть достаточной, позволяющей избежать нарушения функционирования карты и деформации, не устраняемой печатающим или записывающим устройством, а также позволяющей сохранить неповрежденными внесенную информацию (как в «памяти» карты, так и на по-

верхности). Положительным результатом проведения испытания на положение карты или в положение не более 1,5 мм от исходного по истечении не более 1 минуты, при этом прогиб, возникающий у карты в ходе проведения испытания под нагрузкой, может варьироваться от 13 до 35 мм.

5. Общее отклонение внешней части выпуклой стороны карты без тиснения от плоскости жесткой пластины не должно превышать 1,5 мм.

6. Стабильность размеров и коробления карты при воздействии температур от -35 до +50 градусов по Цельсию характеризуется сохранением первоначальных размеров (см. табл.).

7. Искажение поверхности подразумевает исключение возможности увеличения толщины карты свыше 0,10 мм за счет выступающих зон (исключение – рельефные символы).

8. Непрозрачность машиносчитываемых карт достигается посредством распределения оптической плотности по поверхности (кроме определенных прозрачных зон, представленных на рис. 4): для диапазона длин волн 450…950 нм – более 1,3; для диапазона длин волн 950…1000 нм – более 1,1.

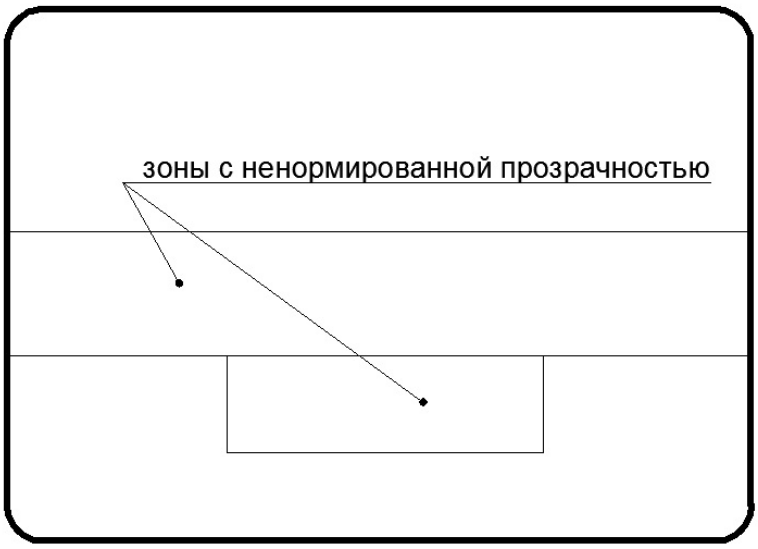


Рис. 4. Распределение оптической плотности по поверхности идентификационной карты

9. Карта обладает необходимым уровнем термостойкости в случае, если в ходе испытаний не были обнаружены расслаивание, прогиб больше 10 мм, обесцвечивание. Испытания проводятся путем зажима ее в устройстве и помещением в климатической камере (относительная влажность менее 60%, температура – 49…51 градус по Цельсию) на 4 часа, через каждые 30 минут измеряется величина максимального прогиба карты.

10. Требование светостойкости соблюдается в случае если качество полиграфического продукта (в том числе и качество нанесенного текста) не ухудшается при нормальных условиях под воздействием света.

11. Требование химической стойкости соблюдается при сохранении картой прежних размеров, коробления, общей единой структуры и соединения с составными частями после кратковременного воздействия (на 1 минуту) и после длительного погружения (на 24 часа) в кислотные и щелочные растворы, имитирующие пот.

12. При нормальном применении карта (в частности и ее компоненты) не должна представлять токсической опасности.

13. Требование взаимодействия компонентов карт удовлетворяется в случае, если установленные характеристики не ухудшаются в результате взаимной диффузии материалов; требование загрязнения компонентов карт – в случае, если материалы, из которых изготовлена карта, не загрязняют устройства, предназначенные для ее сопряжения или обработки.

Кроме того, идентификационные карты с контактными и бесконтактными интегральными схемами, с оптической памятью должны быть устойчивы к электромагнитному излучению, статическому электричеству, являющимися неотделимой частью жизни современного общества.

Наиболее устойчивы ко всем внешним воздействиям (глубокие царапины, перфорация, электромагнитное излучение, статическое электричество, взаимодействия с агрессивной химической средой и т.д.) на данный момент времени являются идентификационные карты с оптической памятью[2].

Допустимыми видами печати на идентификационных картах являются офсетная, дисперсная (сублимационная), скрытая трафаретная и цифровая.

На идентификационных картах могут применяться следующие виды полиграфической защиты: тонирование;эмбоссирование (на всей поверхности карты кроме зоны размещения магнитной полосы);нанесение заводской микропечати, микроизображения,двухмерных дифракционных образов, гильоширных элементов, поля для подписи, штрих-кода (также посредством лазерной гравировки), индивидуального серийного номера (как элемента математической защиты), персонализированной встроенной голограммы, магнитной полосы или оптической ленты, несущих в себе не контролируемую визуально, персональную или иную информацию; горячее тиснение или типирование фольгой, интегрирование голограмм, высечка отверстий, имплантация микросхемы (чипа), сублимация скретч-панели и панели для подписи, ламинирование, нанесение специальной печати по кромке карты.

Также добиться наибольшей защищенности идентификационной карты можно посредством внесения информации между внутренними слоями карты (например, между слоями поликарбоната), т.е. внедряя технологии полиграфической защиты на этапе изготовления продукции.

Применение всего комплекса различных видов полиграфической защиты (приведенных выше), представляющих собой совокупность визуально-, приборно- или машинно-, сенсорно- и лабораторно- контролируемых технологий защиты, а также инновационной технологии внедрения оптической ленты и записи на нее уникальной информации позволит добиться эффективного уровня защищенности данного полиграфического продукта. Подделка идентификационной карты с оптической памятью по сравнению с фальсификацией идентификационных карт с интегральными схемами в большей степени экономически нецелесообразна, так как применяемые инновационные технологии использования оптической памяти дорогостоящие и трудновоспроизводимые.

Вывод: соблюдение требований международных стандартов, контроль свойств изготавливаемой продукции на этапе производства и внедрениезащитных полиграфических технологий позволяют достичь эффективного уровня защищенности идентификационных карт.

Список литературы

1. ГОСТ Р ИСО/МЭК 7810-2015. Карты идентификационные. Физические характеристики / Росстандарт. М.: Стандартинформ, 2016. 12 с.

2. Лазерные оптические карты (LaserOpticalCard)// ФГУП «Предприятие по поставкам продукции Управления делами Президента РФ» [Электронный ресурс]. URL: http://www.certifsecurity.ru/ (X(1)A(r4wau59r0gEkAAAAZWJlOWRlNTktNmI1My00MTNhLWJkNDYtNzY2YWQ2MGZhNGEyU8OhM4ZlExBCHbuJ7uMXpcHQsTM1)S(xagmrhneqppyzkv4y1ufgjpq))/ShowArticle.aspx?ID=30&AspxAutoDetectCookieSupport=1 (дата обращения: 03.10.2016).

Порошина Любовь Дмитриевна, магистрант, amalirr@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Проскуряков Николай Евгеньевич, д-р техн. наук, проф., vippne@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

PROPERTIES AND ELEMENTS PRINTED PROTECTION OF ID CARDS

L.D. Poroshina, N.E. Proskuriakov

The main properties of identification cards are reviewed, recommendations for the protection of this product are printing. The principle of achieving the required level of security ID cards are revealed.

Key words: identification cards, plastic cards, protection of ID cards.

Poroshina Lyubov Dmitrievna, master, amalirr@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Proskuriakov Nikolay Evgenevich, doctor of technical sciences, professor, vippne@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 378.14

АВТОМАТИЗАЦИЯ ВЕДЕНИЯ БАЛЛЬНО-РЕЙТИНГОВОЙ СИСТЕМЫ В ВУЗЕ

П.А. Кулаков, Р.Ф. Назарова, И.С. Якшибаев

В статье рассмотрена проблема создания и ведения балльно-рейтинговой системы в ВУЗе. Предложена математическая модель многомодульной системы, разработаны критерии заполнения балльно-рейтинговой карты. Разработаны UML модели системы. Реализовано программное решение генерации балльно-рейтинговых карт в целях облегчения контроля и оптимизации взаимодействия преподавателей со студентами на протяжении всего семестра.

Ключевые слова: балльно-рейтинговая карта, распределение баллов, автоматизация, информационная система.

Балльно-рейтинговая система – свод правил и положений, в которой количественно, путем накопления условных единиц (баллов), оцениваются результаты учебной деятельности студентов при изучении дисциплины за весь период обучения.

Использование балльно-рейтинговой системы повышает мотивацию студентов к освоению образовательных программ и качество образовательного процесса. Ее применяют и внедряют ведущие ВУЗы, настроенные на качественное построение и совершенствование учебного процесса.

Авторам статьи не удалось найти готовые программные продукты, работающие и самостоятельно и в качестве одного из модулей единой информационной системы ВУЗа или другой организации [1]. Наличие автоматизированной балльно-рейтинговой системы позволяет вести раскрытие информации учебного процесса через общедоступные источники с минимальной трудоемкостью и временными затратами [2].

Одним из главных элементов балльно-рейтинговой системы является балльно-рейтинговая карта (БРК) – это нормативный документ, который предназначен для оценивания различных видов учебной деятельности студентов (работа на лекциях, практических занятиях, успешность защиты лабораторных и расчетно-графических работ). Они включаются в учебный процесс для определения уровня качества и успешности изучения студентом учебных дисциплин через балльные оценки. БРК представляет собой документ, со сложной структурой. Обязательные атрибуты БРК: название дисциплины, название группы, ФИО преподавателя и минимум один модуль, но пользователь может указать любое количество модулей (как правило, 2-3 модуля).

Каждый модуль состоит из текущего и рубежного контроля, также должны быть указаны максимальное и минимальное количество баллов за модуль.

Формами текущего контроля могут быть:

работа на лекции лекций;

выполнение лабораторной работы;

посещение и выполнение практического задания и т.д.

Формы рубежного контроля:

тестирование;

контрольные работы;

опросы.

Математическая модель примет вид:

$$C = S_{\max} = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{k} (w_{ij} \cdot q_{ij}),$$

где C – общее количество баллов; n – количество видов нагрузок $(1 \le i \le n)$; l_i – виды нагрузок (например, лекции, РГР и т.д.) $(i = 1..n)$; j – количество модулей $(j = 1..k)$; l_{ij} – суммарный балл за определенную деятельность в i-ом модуле; w_{ij} – балл за единицу деятельности b_{ij}; q_{ij} – количество единиц деятельности в модуле (например, 7 лекций, 5 лабораторных работ).

$$b_{ij} = \frac{w_{ij}}{q_{ij}},$$

где b_{ijk} – максимальный балл за единицу деятельности; S_{ijk} – балл студента за k единицу в ij деятельности.

Минимальный успешный балл вычисляется по формуле:

$$\min = 0{,}61 \cdot \max,$$

где $\max$ – максимальный балл, $\min$ – минимальный балл.

Критерий успеваемости

все деятельности должны быть начаты и за них должны быть получены баллы

$$\min(S_{ijk}) > 0;$$

общие баллы, набранные студентом по данной дисциплине $(S \ge 0{,}61 \cdot S_{\max})$

$$S = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{k} (S_{ijk} \cdot q_{ij}) \ge 61.$$

Критерий распределения баллов в БРК

1. Жесткий.

Здесь ставятся проценты на каждый модуль и вид деятельности.

Например, на 1-ый модуль ставится 70%, а на 2-ой модуль – 30%; на лабораторные работы – 50% от модуля, на лекции – 10% от модуля, а на опросы – 40% от модуля. Максимальная сумма баллов, которую учащийся ВУЗа может набрать за семестр по какой-либо дисциплине, составляет 100 баллов.

Тогда, на лабораторные работы в 1-ом модуле будет выделено $100 \cdot 0{,}7 \cdot 0{,}5$, т.е. 35 баллов, а во 2-ом модуле – 15; на лекции в 1-ом модуле 7 баллов, а во 2-ом модуле – 3 балла и на опрос в 1-ом модуле – 28, а во 2-ом модуле – 12. Пример распределения баллов представлен в таблице.

Пример распределения баллов

Модуль 1		Модуль 2	
Лекции	7	Лекции	3
Лабораторные работы	35	Лабораторные работы	15
Опрос	28	Опрос	12

Например, в 1-ом модуле 5 лабораторных работ и 4 – во 2-ом. Следовательно, максимальный балл, который можно получить за одну лабораторную работу в 1-ом модуле – 35/5 = 7 баллов, а во 2-ом модуле – 3,75 баллов.

2. Оптимизированный

Здесь устанавливаются проценты на каждый вид деятельности и количество единиц деятельности.

Например, на лекции установили 10% и 11 единиц деятельности, на опрос – 40%, и на лабораторные работы – 50% и 7 единиц деятельности.

Сумма среднеквадратичных ошибок между целочисленными баллами и баллами, полученными согласно заданным процентам, должна быть минимальна:

$$\sum \left(b_{ij} - \left[\frac{w_{ij}}{q_{ij}} \right] \right)^2 \to \min.$$

Отсюда на лекции выделено 11 баллов, вместо 10, а на 1 лекцию – 1 балл (вместо $\frac{10}{11}$ начальных); на лабораторные – 49 баллов, а на 1 лабораторную работу – 7 баллов (вместо $\frac{50}{7}$).

Алгоритм распределения баллов приведен на рис. 1.

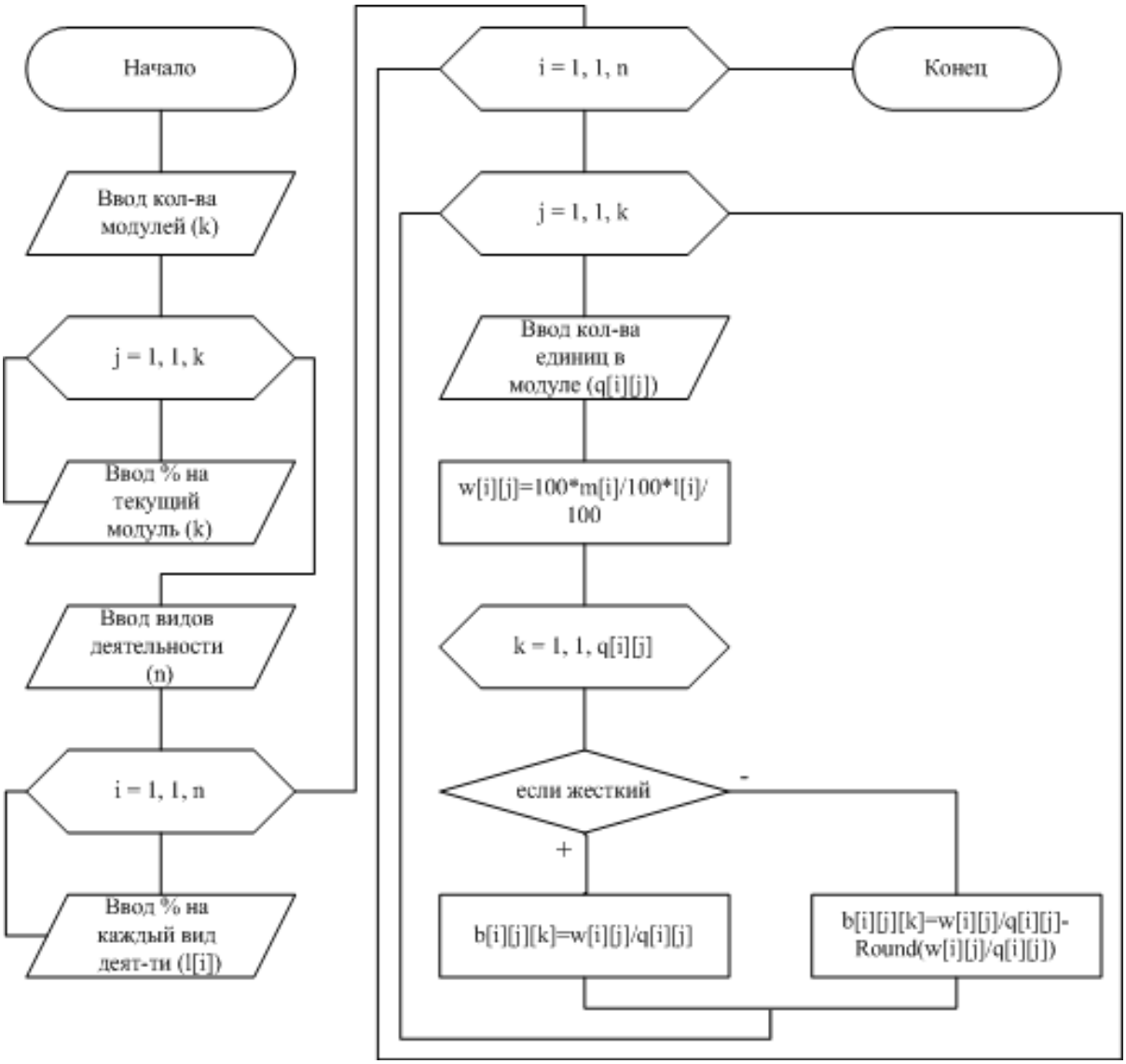


Рис. 1. Алгоритм распределения баллов

На рис. 2 представлена диаграмма вариантов использования программного обеспечения - показаны основные действия при составлении БРК [3, 4]:

выбор дисциплины;

ввод количества модулей;

ввод текущего контроля (ввод количества лекций, практик, лабораторных работ и РГР);

ввод рубежного контроля (ввод тестов, контрольных работ и опросов).

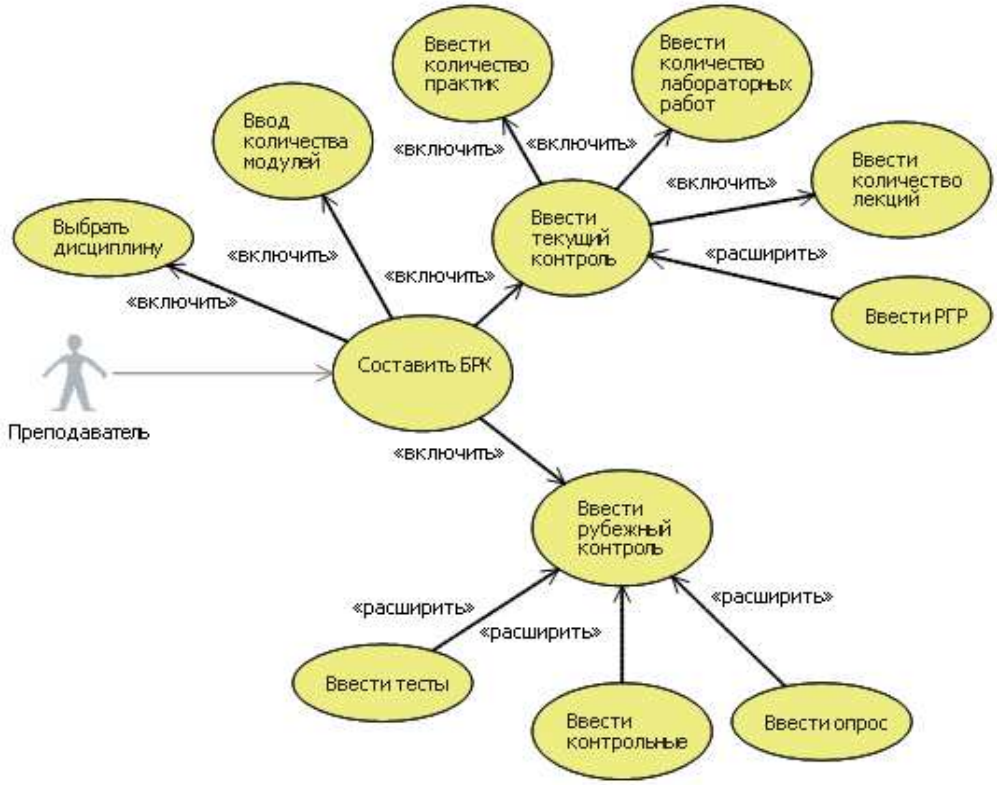


Рис. 2. Диаграмма вариантов использования для составления БРК

Разработанная информационная модель системы представлена на рис. 3 [5, 6].

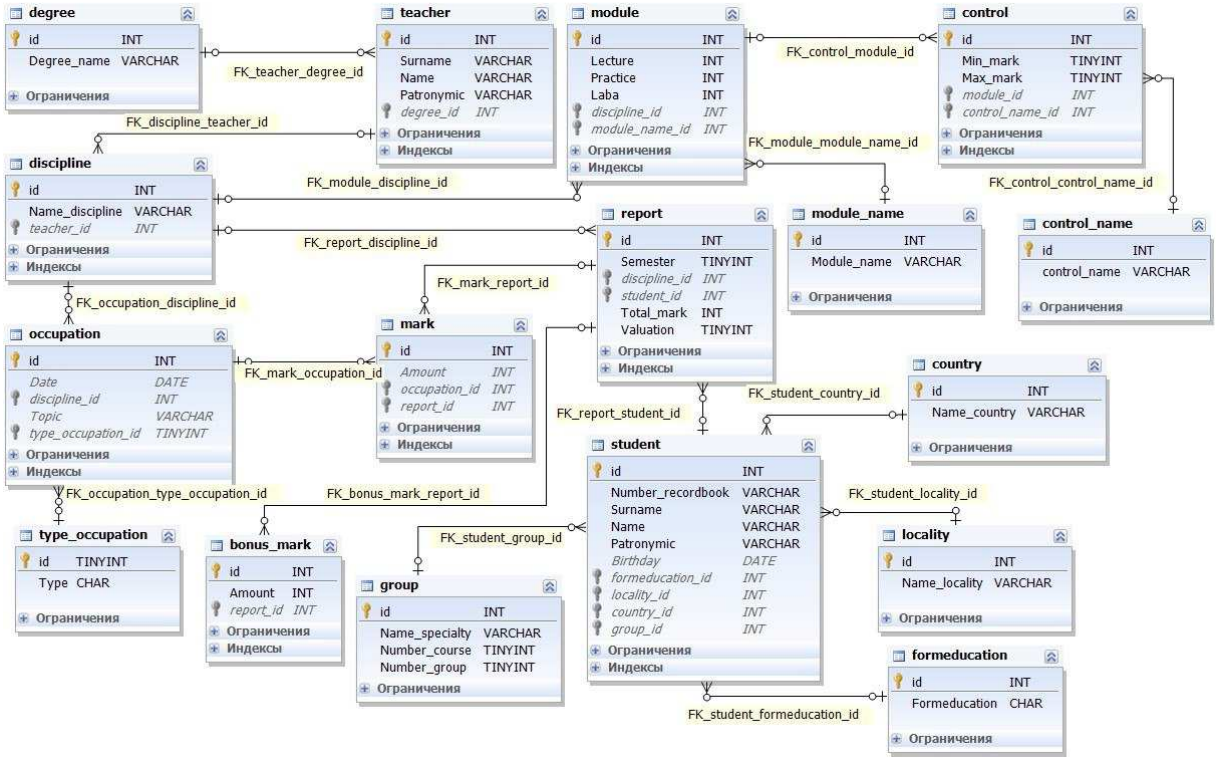


Рис. 3. Информационная модель балльно-рейтинговой системы

На рис. 4–6 представлен пример реализации программы [7].

Для создания БРК для начала необходимо выбрать метод распределения баллов, ввести количество модулей и видов деятельности (рис. 4).

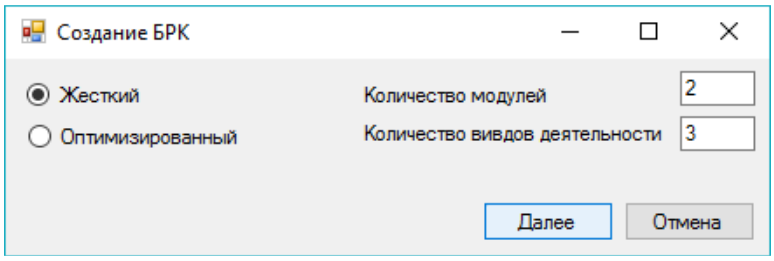


Рис. 4. Создание БРК

Далее необходимо ввести проценты для каждого модуля и вида деятельности, а также его название (рис. 5).

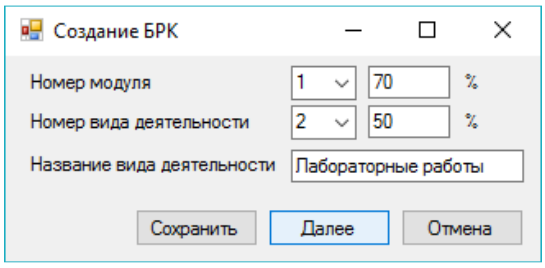


Рис. 5. Ввод данных

Общий балл за каждый вид деятельности рассчитан, следующий шаг – расчет баллов за одно занятие. Для этого необходимо ввести количество занятий в модуле, после чего нажать кнопку «Рассчитать». Если результат удовлетворил пользователя, то необходимо нажать кнопку «Сохранить» (рис. 6).

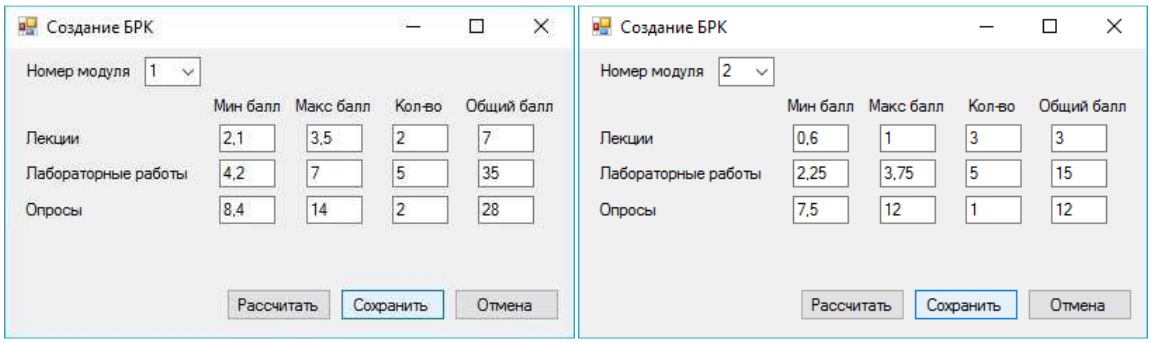


Рис. 6. Результат работы программы при выборе жесткого критерия распределения

Для создания БРК при помощи оптимизированного критерия распределения пользователю необходимо также сделать предыдущие шаги, но выбрать уже оптимизированный метод распределения баллов (рис. 7).

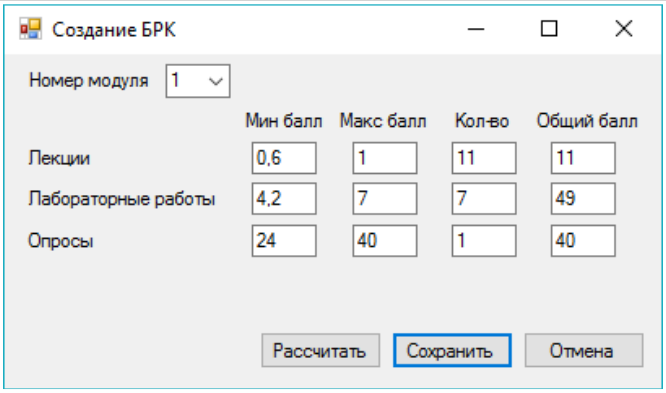


Рис. 7. Результат работы программы при выборе оптимизированного критерия распределения

Для проставления и редактирования баллов (рис. 8), преподаватель должен выбрать необходимые курс, группу и дисциплину, далее проставить баллы и нажать кнопку «Сохранить». Для формирования отчета балльно-рейтинговой системы преподавателю необходимо нажать кнопку «Создать отчет по БРС».

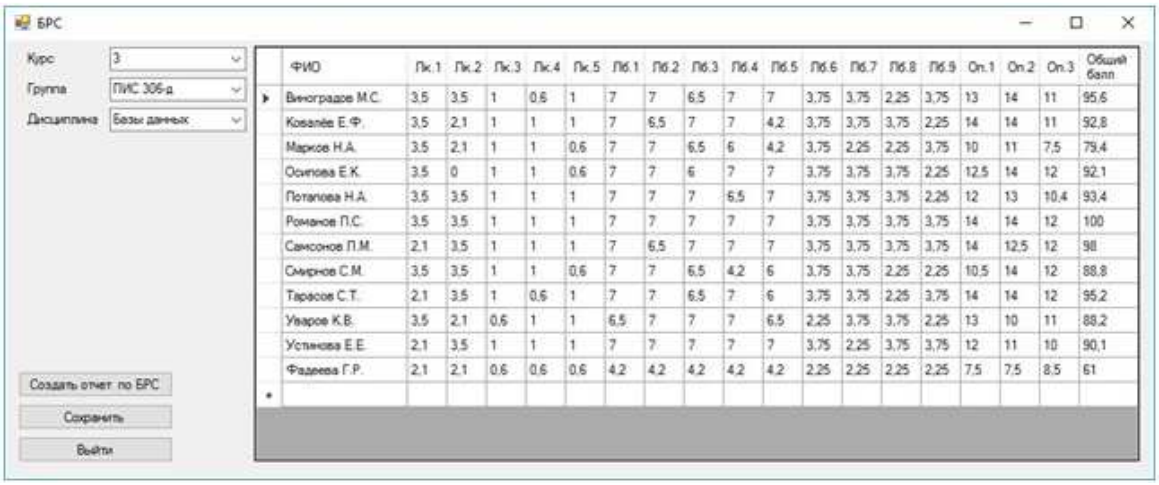


Рис. 8. Форма проставления баллов

Таким образом, решена задача автоматизации составления балльно-рейтинговой карты, предложенная математическая модель позволяет распределять баллы двумя способами. Показана практическая реализация заполнения модулей БРК с использованием жесткого и оптимизированного алгоритма распределения.

Список литературы

1. Карасев Е.М., Кулаков П.А. Функциональная модель единой информационной системы ВУЗа // Современное общество, образование и наука сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции: в 9 частях. Тамбов, 2014. С. 87-89.

2. Прочухан В.В. Сравнительный анализ средств разработки подсистемы сбора информации для мониторинга показателей эффективности ВУЗа // Молодежный научный вестник, 2016. №5. С. 80-84.

3. Лешек А.М. Анализ и проектирование информационных систем с помощью UML / А.М. Лешек – 3-е изд. М.: Инфра-М, 2012. 190 с.

4. Ларман К. Применение UML и шаблонов проектирования / К. Ларман. М.: Вильямс, 2011. 736 с.

5. Киселев Ю.В., Кузнецов И.А. Разработка и тестирование базы данных рекомендательной системы // Теория. Практика. Инновации, 2016. №7. С. 18-25.

6. Кулаков П.А. Разработка информационной модели системы управления материальными потоками // Теория. Практика. Инновации, 2016. № 3 (3). С. 4-20.

7. Речинский А.В., Сергеев С.Ф. Разработка пользовательских интерфейсов. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. 145 с.

Кулаков Петр Алексеевич, канд. техн. наук, доц., petr20071@mail.ru, Россия, Стерлитамак, филиал Уфимского государственного авиационного технического университета,

Назарова Регина Фанировна, студент, nazarova.regina.1996@mail.ru, Россия, Стерлитамак, филиал Уфимского государственного авиационного технического университета,

Якшибаев Ильдар Салаватович, студент, dvyglazz@gmail.com, Россия, Стерлитамак, филиал Уфимского государственного авиационного технического университета

AUTOMATION OF REFERENCE OF SCORE-RATING SYSTEM IN UNIVERSITY

P.A. Kulakov, R.F. Nazarova, I.S. Yakshibaev

The article considers the problem of the creation and maintenance of score-rating system in the university. A mathematical model of a multi system, the criteria developed by filling the score-card rating. Developed UML system model. Implemented software solution generation of score-rating cards in order to facilitate the control and optimization of interaction of teachers with students throughout the semester.

Key words: rating card, score distribution, automation, information system.

Kulakov Petr Alexeevich, candidate of technical science, docent, petr20071@mail.ru, Russia, Sterlitamak, Branch of USATU in the city of Sterlitamak,

Nazarova Regina Fanirovna, student, nazarova.regina.1996@mail.ru, Russia, Sterlitamak, Branch of USATU in the city of Sterlitamak,

Yakshibaev Ildar Salavatovich, student, dvyglazz@gmail.com, Russia, Sterlitamak, Branch of USATU in the city of Sterlitamak

УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ, СТАНДАРТИЗАЦИЯ И СЕРТИФИКАЦИЯ

УДК 658.512.23

НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КООРДИНАТНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ МАШИН

В.Б. Протасьев

Проанализирована ситуация, при которой возможности КИМ используются не полностью из-за ошибок при базировании контролируемых деталей. Показано, что перекос осей систем координат детали и самой КИМ необходимо минимизировать и учитывать возможности сканирования контролируемых поверхностей.

Ключевые слова: координатно-измерительные машины, базирование, сканирование контролированной поверхности.

Координатно-измерительные машины (КИМ) [1] представляют собой современное универсальное средство измерения (СИ), которое использует самые эффективные конструктивные и технологические решения, а также математический аппарат традиционной и булевой алгебры, системы технического зрения, теорию вероятности и принципы технического управления.

Как следствие, интенсивно развивающие тактильные КИМ, использующие контакт измерительных наконечников с поверхностью контролируемой детали и мультисенсорные (бесконтактные), основанные на использовании законов оптики и технического зрения.

Разработчики и изготовители КИМ, в преобладающем количестве зарубежные, в первую очередь решают задачи сбыта своей продукции, а не повышения квалификации российских пользователей и, это при отсутствии учебной литературы по использованию КИМ вынуждает пользователей самостоятельно рассматривать вопросы эксплуатации этой измерительной техники.

Информация о современных отечественных КИМ фирмы «Лапик», которые во многом превосходят зарубежные по своим возможностям, содержится только в рекламных материалах.

Одной из важнейших процедур при измерениях на КИМ является выравнивание. Этот термин не имеет официального толкования, а по физической сути является процедурой определения координат контролируемой с помощью КИМ детали.

В этой процедуре используются как правила базирования деталей, в основном связанные с выполнением правили «шести точек», так и математический аппарат, позволяющий с учетом формы и особенностей контролируемой детали определить ее систему координат.

При этом нельзя нарушать принцип единства конструкторских баз, указанных на чертеже детали и измерительных баз, используемых при контроле.

В отличие от станков с ЧПУ, на которых базированию и закреплению заготовок уделяют особое внимание, при использовании КИМ согласно данным технической литературы [2], совпадение осей систем координат контролируемой детали и самой КИМ не требуется.

На иллюстрациях показывается произвольное положение (рис. 1) контролируемой детали на столе КИМ.

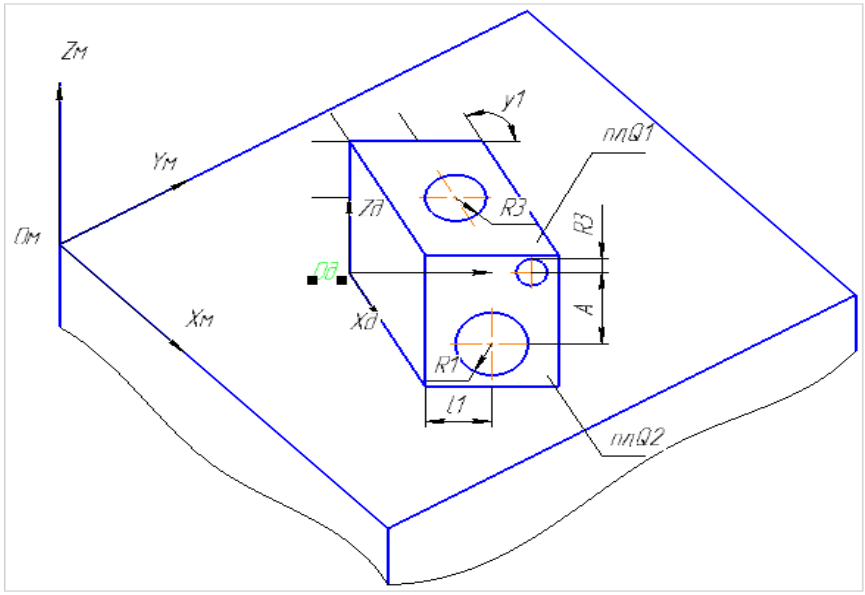


Рис. 1. Установка корпусной детали на столе КИМ в произвольном положении

Проанализируем приведенную информацию, и для этого рассмотрим корпусную деталь (рисунок 1), установленную на столе КИМ с явными φ несовпадениями направлений координатных осей системы координат машины $X_м$ $Y_м$ $Z_м$ и $X_д$ $Y_д$ $Z_д$ измеряемой детали.

Стол КИМ с расположенной на ней деталью условно можно рассматривать как одно целое. Не требующая доказывать, что такие размеры, как радиусы окружностей R_1; R_2; R_3, межосевое расстояние А, координаты

осей l_1, l_2, l_3 и углы пересечения линий и плоскостей γ_1 у этой условной детали будут такими же, как и у отдельно взятой детали, то есть системе координат $X_д$, $Y_д$, $Z_д$.

Это же справедливо при измерениях погрешностей формы, таких как некруглость, непрямолинейность, неплоскостность и всех погрешностей взаимного расположения поверхностей.

Вопрос состоит в том – как измерять все эти параметры.

Допустим, что операция выравнивания для ситуации, соответствующей рисунку 1 выполнена.

Измерение размеров l_1, l_2, l_3; γ_1 трудностей не вызывает поскольку они расположены в плоскости Q_1, параллельной опорной плоскости стола КИМ.

Измерение радиуса R_1 может вызвать трудности. Сканирование отверстий, (это то же что и круговая интерполяция на станках с ЧПУ) возможно только в плоскостях параллельных координатным плоскостям самой КИМ. В плоскости Q_2 (рисунок 1) сканирование отверстия с радиусами R_1 и R_3 выполнить невозможно.

Это приводит к тому, что не удается измерить и погрешности формы этих отверстий.

Можно сформулировать правило – если измеряются параметры в сечениях, параллельных координатным плоскостям КИМ, перекос осей $X_д Y_д$ измеряемой детали относительно осей $X_м$ $Y_м$ можно не регламентировать – если необходимы измерения в плоскостях, не удовлетворяющих этому требованию (плоскость Q_2 на рисунке 1) – необходимо минимизировать перекосы координатных осей.

Если КИМ настолько совершенна, что позволяет выполнять сканирование в произвольно расположенных сечениях, эту информацию необходимо приводить в паспортных данных и инструкциях по пользованию КИМ. Такие данные в указанных документах как правило не приводятся.

Трудно предположить, что КИМ обладают такими возможностями, – это усложнит их конструкцию и программное обеспечение.

На рисунке 2 показано сканирование отверстия, ось которого $Y_д$ не параллельна оси $Y_м$ КИМ.

Отверстие с радиусом R при сканировании в плоскости, принадлежащей $Y_м$ приобретает форму эллипса. Такой контроль обеспечит получение достоверных данных по линейным размерам, но не по оценке некруглости.

Эти параметры можно измерить только при регламентировании углов перекоса φ.

Минимизация перекосов в машиностроении обеспечивается базированием [3], для выполнения которого в комплектах КИМ имеются специальные приспособления, а на столах КИМ смонтированы резьбовые пробки, с помощью которых они могут устанавливаться при выполнении контроля.

После выполнения базирования для автоматизации измерений можно использовать 3D-модели при совмещении их координатных систем с системой координат $X_д$, $Y_д$, $Z_д$ контролируемой детали.

Во всех рекламных материалах у контролируемых деталей измеряются отверстия, оси которых перпендикулярны опорной поверхности стола КИМ.

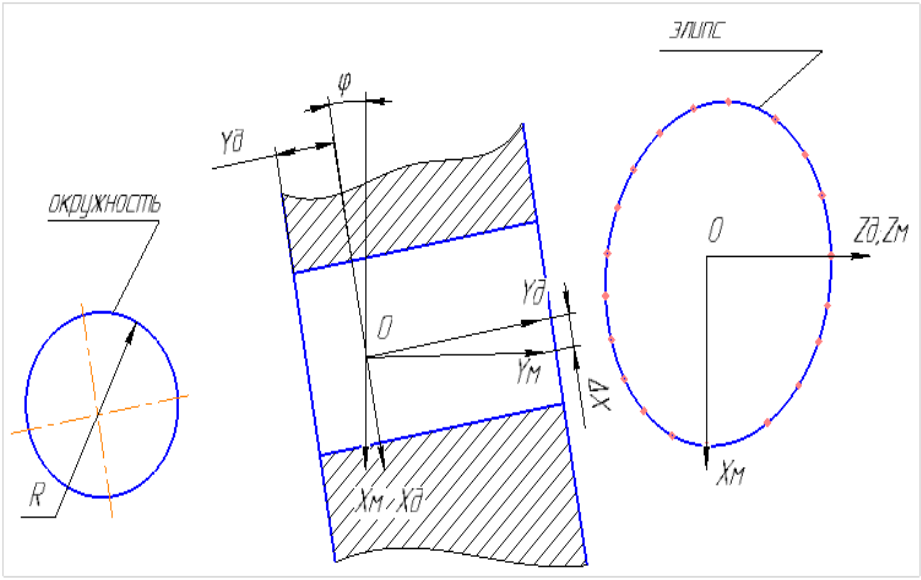


Рис. 2. Сканирование отверстия с осью, не параллельной координатным осям КИМ

В этом случае перекос осей $X_д$ и $Y_д$ относительно $X_м$ и $Y_м$, вызван только погрешностями изготовления контролируемой детали. Они незначительны и практически не влияют на точность контроля размеров и погрешностей формы и расположения.

Возникает необходимость либо устранения несоответствий в технической литературе, либо подробных разъяснений возможностей КИМ. Но в любом случае умышленное произвольное базирование (рисунок 1) нецелесообразно.

Необходимо так же подготовить современный учебник по устройству и эксплуатации КИМ не только с иллюстрацией возможностей КИМ, но и с раскрытием математического аппарата всех процедур, используемых при измерениях.

Такая информация вызовет интерес во всех отраслях машиностроения и позволит эффективно использовать КИМ, например, при решении задач прилегания сопрягаемых поверхностей, очень важных для современного производства.

Не является секретом, что операторы КИМ при измерениях могут получить информацию о топографии прилегаемых поверхностей самой произвольной формы, например, корпуса и дверей автомобиля; затвора и ствольной коробки оружия и т.п.

Определение степени прилегания по массивам точек, координаты которых выдает КИМ, и при контакте реальных поверхностей далеко не одно и то же.

Координатные измерения в таких случаях связаны с так называемой методической ошибкой. Она вызвана тем, что контактирование материальных поверхностей, которое в основном используется при контроле степени прилегания, заменяется на оценку степени соприкосновения поверхностей, представленных массивами точек.

Влияние этой ошибки тоже нуждается в исследовании, результаты которого позволят снизить объемы пригоночных работ.

Неэффективное использование КИМ, отсутствие отечественного программного обеспечения (за исключением фирмы «Лапик») негативно сказывается на всех отраслях производства в России, и, особенно, на высших учебных заведениях машиностроительного профиля.

Список литературы

1. Зубарев Ю.М. Автоматизация координатных измерений: учебное пособие / Зубарев Ю.М., Косаревский С.В., Ревин Н.Н. СПб.: Изд-во ПИМаш, 2011.160 с.

2. Гапшис А.А. Координатно-измерительные машины и их применение / Гапшис А.А., Каснарайтис А.Ю., Модестов М.Б. и др. М. Машиностроение, 2008. 326 с.

3. Балакшин Б.С. Основы технологии машиностроения: учеб. для машиностроит. вузов. М.: Машиностроение, 1969. 559 с.

Протасьев Виктор Борисович, д-р техн. наук, проф., imstulgy@pochta.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

SOME ASPECTS OF THE USE OF COORDINATE-MEASURING MACHINES

V.B. Protasev

Analyzed a situation in which capabilities KIM not fully using because of the errors of basing controlled parts. It is shown that the misalignment of the axes of the coordinate systems and the details of the KIM should be minimized and take into account the possibility of scanning the inspected surfaces.

Key words: coordinate measuring machine, a base, controlled the scanning surface.

Protasev Viktor Borisovich, doctor of technical science, professor, imstulgy@pochta.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 551.501.75

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ВЕТРА БЕЗЗОНДОВЫМ МЕТЕОКОМПЛЕКСОМ

В.М. Калмыков, Д.В. Ермилов, С.И. Соловьев, Д.Б. Белов

Рассмотрена методика оценки точности измерения скорости и направления ветра беззондовым метеокомплексом.

Ключевые слова: параметры ветра, точность измерений, беззондовый метеокомплекс.

Измерение скорости и направления ветра является достаточно актуальной в настоящее время задачей.

В существующей практике для измерения этих параметров ветра на различных уровнях высоты, используются измерительные устройства, основанные на запуске шаров-пилотов и радиозондов, которые отслеживаются с земли с помощью специальных средств измерений. Кроме того, для измерения указанных параметров применяются метеомачты с установленными на них датчиками скорости и направления ветра.

При всех своих достоинствах данные методы имеют и существенные недостатки, к главным из которых можно отнести снос шаров-пилотов и радиозондов на десятки километров от места выпуска, а также их неавтономность, т.е. шары-пилоты и радиозонды могут работать только в паре с установками на земле. Что касается метеомачт, то в силу ограниченности их высоты можно измерять параметры ветра только на высотах от 50 до 300 метров.

Однако следует отметить, что использующиеся на метеомачтах датчики скорости и направления ветра, прошли все метрологически необходимые процедуры аттестации и поверки, а шаропилотные нет в силу невозможности проведения этих процедур применительно к таким установкам. Тем не менее, они широко применяются на практике в различных областях народного хозяйства и зарекомендовали себя как вполне работоспособные устройства.

С целью устранения недостатков, присущих указанным устройствам, а также для повышения эффективности измерения был разработан беззондовый радиолокационный измерительный метеокомплекс для измерения параметров ветра. Принцип работы данного метеокомплекса основан на измерении скорости и направления движения естественных метеообразований в атмосфере, поскольку направление и скорость их движения практически идентичны соответствующим параметрам движения воздуха, который их увлекает своим потоком. Основными достоинствами такого

измерительного устройства являются в его автономности, малом времени подготовки к работе, отсутствии необходимости использования шаров-пилотов и радиозондов, а также в обеспечении требуемой зоны (места) измерения параметров ветра.

Создание такого беззондового метеокомплекса потребовало изучения и установления его точностных характеристик. Для этого были проведены предварительные исследования точностных характеристик метеокомплекса, которые заключались в следующем.

В одном и том же месте (полигон), в одно и тоже время проводились синхронные измерения параметров (скорости и направления) ветра с помощью опытного образца метеокомплекса и шаропилотных средств или датчиков метеомачты, которые в этой ситуации играли роль образцовых средств измерений.

Согласно ГОСТ Р 50779.21-2004 [] проверка гипотезы о совпадении точности измерения эталонным и испытуемым методами проводилась в следующем порядке.

1. Определялись средние значения результатов измерений параметров ветра, полученных испытуемой установкой и шаропилотными средствами измерений, на каждом отдельном уровне высоты:

$$\bar{x}_1 = \frac{\sum_{i=1}^{n_1} x_{1i}}{n_1}; \tag{1}$$

$$\bar{x}_2 = \frac{\sum_{j=1}^{n_2} x_{2j}}{n_2}, \tag{2}$$

где x_{1i}, x_{2j} – результаты отдельных измерений скорости или направления ветра, выполненных испытуемой установкой и шаропилотными средствами измерений соответственно; n_1, n_2 – число результатов измерений скорости или направления ветра, выполненных испытуемой установкой и шаропилотными средствами измерений соответственно.

2. Вычислялись оценки дисперсий результатов измерений на каждом отдельном уровне высоты:

$$S_1^2 = \sum_{i=1}^{n_1} \frac{(x_{1i} - \bar{x}_1)^2}{n_1 - 1}; \tag{3}$$

$$S_2^2 = \sum_{j=1}^{n_2} \frac{(x_{2j} - \bar{x}_2)^2}{n_2 - 1}. \tag{4}$$

3. Определялись квантили распределения Фишера:

$$F_{1-\alpha/2}(\nu_1, \nu_2) \text{ или } F_{1-\alpha/2}(\nu_2, \nu_1),$$

где α – выбранный уровень значимости; ν_1, ν_2 – числа степеней свободы ($\nu_1 = n_1 - 1$; $\nu_2 = n_2 - 1$).

4. Проверялось условие:

$$\frac{S_1^2}{S_2^2} < F_{1-\alpha/2}(\nu_1, \nu_2), \text{ если } S_1^2 > S_2^2 \quad (5)$$

или

$$\frac{S_2^2}{S_1^2} < F_{1-\alpha/2}(\nu_2, \nu_1), \text{ если } S_2^2 > S_1^2 \quad (6)$$

Если данное условие выполняется, то гипотеза о равноточности измерения двух сравниваемых методов измерений принимается с доверительной вероятностью P (уровнем значимости $\alpha = 1 - P$).

В качестве примера в табл. 1 приведены результаты измерений скорости V и направления α ветра на высоте 300 м, полученные датчиками метеомачты и испытуемым метеокомплексом.

Таблица 1

Результаты измерений скорости и на правления ветра на высоте 300 м

№ пп	Датчики		Метеокомплекс	
	Скорость V	Направление α	Скорость V	Направление α
1	11,7	321,72	11,14	314,23
2	10,1	318,24	9,575	324,45
3	10,5	315,72	14,7	342,78
4	9,7	326,76	13,96	342,41
5	9,8	330,66	10,42	329,78
6	9,8	330,66	9,929	327,77
7	10,2	331,74	10,92	331,77
8	13,1	340,2	10,23	341
9	6,7	335,04	8,736	334,45
10	11,2	344,16	19,01	354,37
11	13,9	345,96	14,16	343,69
12	14	358,8	15,27	352,46

Проверим гипотезу о равноточности результатов измерений согласно описанной выше методике.

Сначала определяем оценки дисперсий результатов измерений скорости ветра с помощью датчиков S_1^2 и метеокомплекса S_2^2 (3), (4): $S_1^2 = 4{,}27$; $S_2^2 = 9{,}33$. Поскольку $S_2^2 > S_1^2$, то проверяем условие (6), предварительно определив квантиль распределения Фишера $F_{1-\alpha/2}(\nu_2, \nu_1)$ при уровне значимости $\alpha = 0{,}05$ и числах степеней свободы $\nu_1 = 12 - 1 = 11$

и $\nu_2 = 12-1 = 11$ ($F_{0,975}(11,11) = 2,818$): $\frac{9,33}{4,27} = 2,185 < 2,818$. Следовательно, гипотеза о равноточности результатов измерений скорости ветра метеокомплексом и датчиками на мачте подтверждается с доверительной вероятностью $P = 0,95$ (уровнем значимости $\alpha = 0,05$), что соответствует «очень высокой» равноточности.

Далее определяем оценки дисперсий результатов измерений направления ветра с помощью шаропилотных средств измерений S_1^2 и метеокомплекса S_2^2 (3), (4): $S_1^2 = 155,29$; $S_2^2 = 137,21$. Поскольку $S_1^2 > S_2^2$, то проверяем условие (5) (квантиль распределения Фишера имеет то же значение, что и в предыдущем случае ($F_{0,975}(11,11) = 2,818$)): $\frac{155,29}{137,21} = 1,132 < 2,818$. Следовательно, гипотеза о равноточности результатов измерений направления ветра метеокомплексом и датчиками на мачте подтверждается с доверительной вероятностью $P = 0,95$ (уровнем значимости $\alpha = 0,05$).

Теперь в качестве примера в табл. 2 приведем результаты измерений скорости V и направления α ветра на высоте 900 м, полученные шаропилотными средствами измерений и испытуемым комплексом.

Таблица 2

Результаты измерений скорости и направления ветра на высоте 900 м

№ пп	Шаропилотные средства измерений		Метеокомплекс	
	Скорость V	Направление α	Скорость V	Направление α
1	15,4	335,82	14,90	330,54
2	13,0	331,02	12,35	333,18
3	10,4	323,94	12,39	346,53
4	10,2	327,30	11,51	333,51
5	11,6	340,44	11,48	335,00
6	11,6	340,44	10,30	331,00
7	11,2	340,26	12,38	336,19
8	13,9	353,04	9,762	346,18
9	8,8	343,44	11,77	342,72
10	15,2	354,30	11,95	351,68
11	14,3	356,70	14,29	350,84
12	15,2	348,5	16,56	346,12

Определяем оценки дисперсий результатов измерений скорости ветра с помощью шаропилотных средств измерений S_1^2 и метеокомплекса S_2^2 (3), (4): $S_1^2 = 5,01$; $S_2^2 = 3,70$. Поскольку $S_1^2 > S_2^2$, то проверяем условие

(5) (квантиль распределения Фишера имеет то же значение, что и в предыдущем проверке $F_{0,975}(11,11) = 2,818$): $\frac{5,01}{3,70} = 1,354 < 2,818$. Следовательно, гипотеза о равноточности результатов измерений скорости ветра метеокомплексом и шаропилотными средствами измерений подтверждается с доверительной вероятностью $P = 0,95$ (уровнем значимости $\alpha = 0,05$).

Далее определяем оценки дисперсий результатов измерений направления ветра с помощью шаропилотных средств измерений S_1^2 и метеокомплекса S_2^2 (3), (4): $S_1^2 = 112,37$; $S_2^2 = 61,57$. Поскольку $S_1^2 > S_2^2$, то проверяем условие (5) (квантиль распределения Фишера имеет то же значение, что и в предыдущем случае ($F_{0,975}(11,11) = 2,818$)): $\frac{112,37}{61,57} = 1,825 < 2,818$. Следовательно, гипотеза о равноточности результатов измерений направления ветра метеокомплексом и шаропилотными средствами измерений подтверждается с доверительной вероятностью $P = 0,95$ (уровнем значимости $\alpha = 0,05$), что соответствует «очень высокой» равноточности.

Проведенные предварительные испытания показали, что как минимум новая установка, использующая беззондовый метод, не уступает по точности существующим устройствам.

Список литературы

1. ГОСТ Р 50779.21-2004. Статистические методы. Правила определения и методы расчета статистических характеристик по выборочным данным. Часть 1. Нормальное распределение.

Калмыков Виктор Михайлович, начальник отдела, rts6@cdbae.ru, Россия, Тула, АО Центральное конструкторское бюро аппаратостроения,

Ермилов Дмитрий Владимирович, начальник отдела, rts6@cdbae.ru, Россия, Тула, АО Центральное конструкторское бюро аппаратостроения,

Соловьев Сергей Игоревич, канд. техн. наук, доц, sergei59bk.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Белов Дмитрий Борисович, канд. техн. наук, доц, imsbelov@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

TECHNIQUE OF THE ASSESSMENT OF ACCURACY OF MEASUREMENTS OF PARAMETERS OF THE BEZZONDOV WIND METEOCOMPLEX

V.M. Kalmykov, D.V. Ermilov, S.I. Solovyev, D.B. Belov

The technique of an assessment of accuracy of measurement of speed and the direction of wind is considered by a bezzondovy meteocomplex

Key words: wind parameters, accuracy of measurements, bezzondovy meteocomplex.

Kalmykov Victor Mikhaylovich, head of department, rts6@cdbae.ru, Russia, Tula, Central design bureau of apparatus engineering,

Ermilov Dmitry Vladimirovich, management engineer, rts6@cdbae.ru, Russia, Tula, Central design bureau of apparatus engineering,

Solovyev Sergei Igorevich, candidate of tehnical science, docent, sergei59bk.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Belov Dmitry Borisovich, candidate of tehnical science, docent, imsbelov@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 531.73

МЕТРОЛОГИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ПРИВЕДЕНИЯ ОБЪЕМА ГАЗА К СТАНДАРТНЫМ УСЛОВИЯМ

Д.И. Благовещенский, Д.Б. Белов, С.И. Соловьев

Проведен метрологический анализ долей вкладов неопределенностей измерения параметров, влияющих на общую неопределенность измерения объема газа, приведенного к стандартным условиям.

Ключевые слова: метрологический анализ, неопределенность измерения, объем газа, приведенный к стандартным условиям.

В практике газораспределения реальные условия измерения объемов газа, поставляемого конечным потребителям, всегда отличаются от нормальных (стандартных) условий. В настоящее время процесс приведения объемов газа к стандартным условиям выполняется в соответствии с ГОСТ Р 8.740-2011. Этот нормативный документ приводит методику определения неопределенности (погрешности) результата приведения объемов газа к стандартным условиям, основанную на полном учете неопределенностей (погрешностей) всех влияющих параметров.

Следует учитывать, что используемые для приведения объема газа к стандартным условиям параметры являются случайными величинами, полученными при измерениях объема, давления и температуры газа. Для анализа вкладов неопределенностей измерений параметров, влияющих на общую неопределенность измерения объема газа, приведенного к стандартным условиям, рассмотрим метод pT-пересчета, который регламентирован ГОСТ Р 8.740-2011.

В случае применения данного метода объем газа, приведенный к стандартным условиям, рассчитывают по формулам:

$$V_C = K_{(б)} \cdot V \cdot \frac{p}{T} \quad (1)$$

$$K_{(б)} = \frac{1}{p_C} T_C K_n \quad (2)$$

$$p = p_u + p_a \quad (3)$$

Подставив значение параметра $K_{(б)}$ из выражения (2) в (1), получим формулу для определения объема газа при стандартных условиях:

$$V_C = \frac{T_C \cdot K_n \cdot V \cdot p}{p_C \cdot T} = \frac{T_C \cdot K_n \cdot V \cdot (p_u + p_a)}{p_C \cdot (273{,}15 + t)}, \quad (4)$$

где V_C – объем отпущенного или потребленного газа, приведенный к стандартным условиям, (м^3); T_C – стандартная температура газа, $T_C = 293{,}15$ К; p_C – константа стандартного давления, $p_C = 0{,}101325$ МПа; K_n – коэффициент сжимаемости, рассчитывающийся в зависимости от измеренных значений давления, температуры и состава газа (ввиду малого диапазона изменяемости в расчетах принят за условно постоянную величину $K_n = 1$); V – объем газа, измеряемый счетчиком газа в реальных условиях эксплуатации трубопровода, м^3; t – температура газа в трубопроводе, измеряемая датчиком температуры в реальных условиях эксплуатации трубопровода, °С; p – абсолютное давление газа; p_u – избыточное давление газа, измеряемое датчиком давления в реальных условиях эксплуатации трубопровода; p_a – атмосферное давление, измеряемое датчиком барометрического давления в реальных условиях эксплуатации трубопровода.

Далее необходимо выявить закон распределения вероятности результата измерения объема газа V_C. Для этого предлагается использовать метод имитационного моделирования (метод Монте-Карло). Для этого оценим значения математических ожиданий и средних квадратических отклонений моделируемых параметров. Произведем моделирование ситуации поставок объемов газа при использовании на ГРС следующих измерительных приборов:

– счетчика газа (V) (модель TRZ G1000);

– датчика измерения давления в трубопроводе (p_u) в составе корректора объема газа ЕК-260;

– датчика измерения барометрического давления (p_a) в составе корректора объема газа ЕК-260;

– датчика измерения температуры (t) в составе корректора объема газа ЕК-260.

Сведем значения неопределенностей, оценок математических ожиданий и средних квадратических отклонений (СКО) упомянутых выше приборов в таблицу.

Расчет значений переменных для моделирования закона распределения вероятности методом Монте-Карло

№ п/п	Переменная	Неопределенность		СКО	Размерность
		относительная	абсолютная		
1	$V = 800$	1,0%	8	2,7	м³/час
2	$p_u = 0{,}25$	0,4%	0,0014053	0,00047	кгс/см²
3	$p_a = 0{,}101325$	0,4%	0,0004053	0,00014	кгс/см²
4	$t = 10$	0,1%	0,01	0,0033	°С

Каждая переменная таблицы моделировалась в соответствии с нормальным законом распределения вероятности генератором случайных чисел. Было установлено, что с вероятностью 0,95 закон распределения вероятности результата измерения объема газа V_c соответствует нормальному. Описанная выше проверка соответствия вида закона распределения вероятности результата измерения объема газа V_c нормальному производилась 100 раз по специально разработанной программе, и отрицательный результат (отбрасывание гипотезы) появлялся заметно реже, чем в 5% случаев, т.е. в соответствии с принятым уровнем значимости $\alpha = 1 - 0{,}95 = 0{,}05$. В силу ограниченности объема статьи данная проверка здесь не приводится.

Рассчитаем значение объема газа, отпущенного потребителю, и его неопределенность (погрешность). Используем для этого методику обработки результатов косвенных измерений.

Определим среднее значение объема $\overline{V_c}$, подставив в формулу (4) значения результатов прямых измерений параметров V, p_u, p_a и t, которые использовались в качестве математических ожиданий при выявлении закона распределения вероятности, и значения постоянных величин T_c, p_c, K_n. Значения всех этих величин приведены в расшифровке параметров, используемых в формуле (4).

$$\overline{V_c} = \frac{293{,}15 \cdot 1 \cdot 800 \cdot (0{,}25 + 0{,}101325)}{0{,}101325 \cdot (273{,}15 + 10)} = 2871{,}81 \approx 2872 \text{ м}^3. \qquad (5)$$

Для оценки среднего квадратического отклонения (далее СКО) S_{V_c} необходимо рассчитать частные производные искомой величины объема V_c по всем переменным V, p_u, p_a, и t, а также оценить СКО этих переменных.

Для этого продифференцируем уравнение (4) по указанным выше переменным и подставим их значения и значения постоянных величин в полученные формулы. В каждой формуле переменной величиной является исследуемый параметр, а другие параметры считаются постоянными. В виду простоты вычислений ниже приводится только окончательный результат. Частные производные примут следующий вид:

$$\frac{\partial V_c}{\partial V} = \frac{T_c \cdot K_n \cdot (p_u + p_a)}{p_c \cdot (273{,}15 + t)} = \frac{293{,}15 \cdot 1 \cdot (0{,}25 + 0{,}101325)}{0{,}101325 \cdot (273{,}15 + 10)} = 3{,}589763, \quad (6)$$

$$\frac{\partial V_c}{\partial p_u} = \frac{\partial V_c}{\partial p_a} = \frac{T_c \cdot K_n \cdot V}{p_c \cdot (273{,}15 + t)} =$$

$$= \frac{293{,}15 \cdot 1 \cdot 800}{0{,}101325 \cdot (273{,}15 + 10)} = 8174{,}227 \frac{\text{м}^3}{МПа}, \quad (7)$$

$$\frac{\partial V_c}{\partial t} = -\frac{T_c \cdot K_n \cdot (p_u + p_a) \cdot V}{p_c \cdot (273{,}15 + t)^2} =$$

$$= -\frac{293{,}15 \cdot 1 \cdot 800 \cdot (0{,}25 + 0{,}101325)}{0{,}101325 \cdot (273{,}15 + 10)^2} = -10{,}14236 \frac{\text{м}^3}{^\circ C}. \quad (8)$$

Значения полученных частных производных, которые по физической сути являются весовыми коэффициентами неопределенностей (погрешностей) средств измерений, показывают их различное влияние на общую неопределенность (погрешность) измерений.

Формула для оценки СКО S_{V_c} будет иметь вид:

$$S_{V_c} = \sqrt{\left(\frac{\partial V_c}{\partial V} \cdot S_V\right)^2 + \left(\frac{\partial V_c}{\partial p_u} \cdot S_{p_u}\right)^2 + \left(\frac{\partial V_c}{\partial P_a} \cdot S_{p_a}\right)^2 + \left(\frac{\partial V_c}{\partial t} \cdot S_t\right)^2} =$$

$$= \sqrt{(3{,}589763 \cdot 2{,}7)^2 + (8174{,}227 \cdot 0{,}00033)^2 + (8174{,}227 \cdot 0{,}00014)^2 +}$$

$$\overline{+ (-10{,}14236 \cdot 0{,}0033)^2} = 10{,}01407 \approx 10\ \text{м}^3. \quad (9)$$

Поскольку, как было указано выше, закон распределения вероятности результата измерения является нормальным, что дает возможность записать его с доверительной вероятностью $P = 0{,}9973$ в принятой форме

$$\overline{V_c} - k_p \cdot S_{V_c} \le V_c \le \overline{V_c} + k_p \cdot S_{V_c}. \quad (10)$$

Для нормального закона распределения вероятности результата измерения относительная ширина доверительного интервала k_p будет равна 3, т.е. $k_p = 3$.

Подставив значения всех необходимых параметров в выражение (10), запишем доверительный интервал для искомой величины объема V_c:

$$2873 - 3 \cdot 10 \le V_c \le 2873 + 3 \cdot 10;$$

$$2843\ \text{м}^3 \le V_c \le 2903\ м^3.$$

Максимальная неопределенность (погрешность) объема V_c в этом случае составит:

$$\Delta V_{c\,\max} = k_p \cdot S_{V_c} = 3 \cdot 0 = 30\ \text{м}^3.$$

Относительная погрешность (неопределенность) δV_c от номинальной величины составит:

$$\delta V_c = \frac{\Delta V_{c\,\max}}{\overline{V}} = \frac{30}{2843} \cdot 100\% = 1{,}06\ \%.$$

Для того, чтобы выявить возможность управления (уменьшения) данной погрешностью (неопределенностью) проведем исследование влияния погрешностей (неопределенностей) результатов измерений отдельных параметров на общую погрешность объема газа V_c.

Преобразуем формулу (9), по которой оценивается значение СКО результата косвенного измерения S_{V_c}, поделив на нее обе части данного уравнения. В итоге получим:

$$1 = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \left(\frac{\partial f}{\partial Q_i} \cdot \frac{S_{Q_i}}{S_{V_c}} \right)^2}\ . \qquad (11)$$

Под знаком радикала находится сумма относительных частных дисперсий $\left(\frac{\partial f}{\partial Q_i} \cdot \frac{S_{Q_i}}{S_{V_c}} \right)^2$, формирующих значение СКО S_{V_c}, которое в относительном своем значении становится единицей. Таким образом, правая часть уравнения (11) является балансом частных дисперсий. Анализируя значение этих частных дисперсий, можно выявить измеряемые напрямую параметры газа, неопределенности (погрешности) которых вносят наибольший вклад в формирование погрешности учетного показателя объема V_c.

Проведем необходимые расчеты по анализу неопределенности (погрешности) измерения этого параметра.

Рассчитаем значения частных дисперсий, характеризующих баланс погрешности измерения объема газа V_c. Для этого используем найденные ранее значения частных производных по всем переменным (см. формулы (6-8)), значения оценок средних квадратических отклонений этих переменных (см. таблицу) и значение оценки СКО объема V_c (см. формулу (9)):

$$\left(\frac{\partial f}{\partial V} \cdot \frac{S_V}{S_{V_c}} \right)^2 = \left(3{,}589763 \cdot \frac{2{,}7}{10} \right)^2 = 0{,}9164 = 91{,}64\%;$$

$$\left(\frac{\partial f}{\partial \mathrm{p_и}}\cdot\frac{S_{\mathrm{p_и}}}{S_{V_c}}\right)^2=\left(8174{,}227\cdot\frac{0{,}00033}{10}\right)^2=0{,}0742=7{,}42\%;$$

$$\left(\frac{\partial f}{\partial \mathrm{p_а}}\cdot\frac{S_{\mathrm{p_а}}}{S_{V_c}}\right)^2=\left(8174{,}227\cdot\frac{0{,}00014}{10}\right)^2=0{,}0122=1{,}22\%;$$

$$\left(\frac{\partial f}{\partial t}\cdot\frac{S_t}{S_{V_c}}\right)^2=\left(36{,}04905\cdot\frac{0{,}003333}{10}\right)^2=0{,}00001\approx 0=0\%.$$

Нетрудно заметить выполнение равенства (11):

$$1=0{,}9164+0{,}0742+0{,}0122+0.$$

Как видно из результатов расчета, наибольший вклад в общую неопределенность измерения объема V_c вносит погрешность (неопределенность) измерения объема газа V в реальных условиях эксплуатации (91,64 %).

Такое высокое значение частной погрешности (неопределенности) определяется, прежде всего, наибольшей по сравнению с другими относительной погрешностью (неопределенностью) счетчика газа TRZ G1000. Величина этой погрешности (неопределенности) составляет ± 1%, что превосходит аналогичные погрешности (неопределенности) остальных средств измерений в 2,5 и 10 раз. Такое значение относительной погрешности (неопределенности) измерения объема V при больших его величинах приводит к большому значению СКО S_V, которое существенно превосходит значения СКО остальных параметров.

Список литературы

1. ГОСТ Р 8.740-2011. Расход и количество газа. Методика измерений с помощью турбинных, ротационных и вихревых расходомеров и счетчиков.

Благовещенский Дмитрий Иванович, канд. техн. наук, доц., imstulgu@pochta.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Белов Дмитрий Борисович, канд. техн. наук, доц., imsbelov@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Соловьев Сергей Игоревич, канд. техн. наук, доц., sergei59bk.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

METROLOGICAL APPROACH TO ASSESSMENT OF UNCERTAINTY OF REDUCTION OF VOLUME OF GAS TO STANDARD CONDITIONS

D.I. Blagoveschenskiy, D.B. Belov, S.I. Solovyev

The metrological analysis of shares of deposits of uncertainty of measurement of the parameters influencing the general uncertainty of measurement of volume of the gas given to standard conditions is carried out.

Key words: the metrological analysis, uncertainty of measurement, the gas volume specified to standard conditions.

Blagoveschenskiy Dmitry Ivanovich, candidate of tehnical science, docent, imsbelov@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Belov Dmitry Borisovich, candidate of tehnical science, docent, imsbelov@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Solovyev Sergei Igorevich, candidate of tehnical science, docent, sergei59@bk.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 006.322

НОВАЯ СТРУКТУРА И ТЕРМИНЫ ИСО 9001:2015

М.С. Молчанова

Рассмотрены изменения, внесенные в новую версию стандарта ИСО 9001:2015 по сравнению с версией ИСО 9001:2008, новая структура, отличия в терминологии.

Ключевые слова: система менеджмента качества, понятия и принципы менеджмента качества, процессный подход, термины и определения.

Как и все международные стандарты, ИСО 9001 проходит периодическую проверку на соответствие существующим потребностям различных заинтересованных сторон – государственных структур, предприятий, органов управления, бизнеса. Результатом таких проверок является пересмотр положений действующего стандарта и выход новой версии.

В 2015 году вышла новая версия стандарта менеджмента качества ISO 9001:2015, который находился в разработке с июня 2012 года (ранее были версии 1987, 1994, 2000 и 2008 г).

Самым большим отличием является отход от стандарта как свода правил до стандарта системы менеджмента бизнеса в целом.

В ИСО 9001:2015 основное внимание сосредоточено на аспектах лидерства организации, знаниях организации, планировании и обеспечении процессов, оценке эффективности, совершенствовании, на управлении рисками, и особый акцент делается на достижении удовлетворенности и создании ценности от продуктов/услуг организации для всех заинтересованных сторон.

Структура ИСО 9001:2015 состоит из следующих разделов:

0. Введение, в котором рассматриваются общие сведения , принципы менеджмента качества, процессный подход, цикл PDCA, управление рисками, процессный подход, взаимосвязь с другими стандартами.

1. Область применения стандарта.

2. Нормативные ссылки на связанные стандарты.

3. Термины и определения.

В ИСО 9001:2008 использовался термин «продукция», в новой версии стандарта используется словосочетание «продукция и услуги», т.к. большинство выходов, которые организация поставляет потребителям, или которые им поставляют внешние поставщики включает как продукцию, так и услуги.

Документация, руководство по качеству, документированные процедуры, записи в новой версии относятся к термину «документированная информация» - информация которая должна управляться и поддерживаться организацией и носитель, который ее содержит. Причем документированная информация может быть любого формата и на любом носителе, может быть получена из любого источника, может относиться к системе менеджмента, включая соответствующие процессы, к информации, созданной для функционирования организации (документация), и к свидетельствам достигнутых результатов.

Производственная среда по ИСО 9001:2015 является средой для функционирования процессов, а оборудование для мониторинга и измерений – ресурсами для мониторинга и измерений.

Одной из составляющих организации является еще одно новое понятие – «Заинтересованная сторона» - это лицо или организация которые могут воздействовать на осуществление деятельности или принятие решения, быть подверженными их воздействию или воспринимать себя в качестве последних, т.е. физическое/юридическое лицо, имеющее определенные интересы, связанные с организацией. Это могут быть владельцы, работники в организации, клиенты, поставщики, акционеры, партнеры, государство и другие стороны.

Новый термин «Знания организации» расширяет понятия компетентности и осведомленности персонала, встречающиеся в предыдущих версиях стандарта. Организация должна определить знания, необходимые для функционирования ее процессов и для достижения соответствия продукции и услуг. Эти знания должны поддерживаться на соответствующем уровне и быть доступными в необходимом объеме. Знания могут распределяться между компетентным персоналом и физическими/электронными носителями информации по усмотрению руководства организации.

Ряд терминов и понятий в версии 2015 года отсутствуют или из статуса директивных перешли в статус рекомендательных.

Требование разработки организацией «Руководства по качеству» в новой версии не является обязательным. Более не актуально и требование «Шесть обязательных документированных процедур» для управления качеством. Эти нормы признаны устаревшими, однако организации вправе продолжать применять их на свое усмотрение;

В разделе 4.3, определяющем области применения, больше нет понятия «исключение» – теперь организации самостоятельно могут решить, какие элементы к ним неприменимы, при условии, что качество товаров и услуг не пострадает: Если любое требование настоящего международного стандарта не может быть применено, это не должно влиять на способность организации гарантировать соответствие продукции и услуг.

В версии 2015 упразднен термин «предупреждающие меры» вместе с соответствующим разделом. Предупреждающие процедуры становятся частью процесса управления рисками.

Снимается требование назначать Представителей менеджмента по качеству. Теперь руководство должно быть вовлечено в управление качеством напрямую, каждый высший руководитель лично будет отвечать за результаты своей деятельности в СМК. В новой версии стандарта добавлены требования по ответственности руководителей организации за стратегические вопросы системы качества.

4. Среда организации (введены 2 новых раздела, связанных с контекстом организации: 4.1 – Понимание организации и ее контекста, 4.2 – Понимание потребностей и ожиданий заинтересованных сторон, а также более четко прописана роль процессного подхода).

5. Лидерство (в новой версии усилены и акцентированы требования к лидерству, политике в области качества, документированию ответственности).

6. Планирование (введен новый блок требований: Раздел 6.1 Действия в отношении на рисков и возможностей, согласно которому организации необходимо создать документированный план реагирования на риски).

7. Средства обеспечения (ресурсы, инфраструктура, компетенции, осведомленность персонала, управление взаимодействиями, документированная информация);

8. Деятельность на стадиях жизненного цикла продукции и услуг (планирование и управление процессами, разработка, выпуск, контроль, планирование изменений, внешнее обеспечение, устранение несоответствий);

9. Оценка результатов деятельности (мониторинг, измерение, анализ, оценка деятельности организации и удовлетворенности потребителей, внутренний аудит, анализ со стороны руководства);

10. Улучшение (непрерывное улучшение продуктов/услуг, выявление несоответствий и корректирующие действия).

Для внедрения стандарта ИСО 9001:2015, учитывая возможные сложности, предусмотрен трехлетний срок, но уже сейчас предполагается, что изменения, внесенные в новую версию позволят создать стабильный набор неизменных требований на ближайшие десять лет.

Список литературы

1. ГОСТ Р ИСО 9001-2011. Системы менеджмента качества. Требования. М.: Стандартинформ, 2012. 40 с.

2. ГОСТ Р ИСО 9001-2015. Системы менеджмента качества. Требования. М.: Стандартинформ, 2015. 22 с.

3. Козлов П.М. ИСО 9001:2015. Пояснения. Интерпретация требований. Рекомендации по внедрению. М.: KPMS, 2016. 34 с.

4. Аверьянова И.Э., Плахотникова Е.В., Судаков С.П., Молчанова М.С. ГОСТ Р ИСО 9001:2015 как основа системы менеджмента бизнеса в целом // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2016. Вып. 9. С. 284-290.

Молчанова Мария Сергеевна, магистр, averjnova757@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

NEW STRUCTURE AND TERMS OF ISO 9001:2015

M.S. Molchanova

The changes are considered, which had been put into the new version of ISO 9001:2015 Standard compared to the version of ISO 9001:2008, new structure, differences in terminology.

Key words: Quality Management System, terms and principles of quality management, process approach, terms and definitions.

Molchanova Maria Sergeevna, magister, averjnova757@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 656.078

РАСЧЕТ ПОТЕНЦИАЛА УДОВЛЕТВОРЕННОСТИ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ПРИ ОЦЕНКЕ КАЧЕСТВА СЕРВИСНОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ АВТОТРАНСПОРТА

И.Э. Аверьянова, И.А. Плахотникова, М.С. Молчанова

Приведен опыт реализации метода Н. Кано для оценки потенциала удовлетворенности потребителя и выявления приоритетных направлений повышения качества услуг в рамках ООО «Сервисный центр Полет».

Ключевые слова: качество, удовлетворенность потребителя, метод Кано, конкурентоспособность.

В настоящее время задача обеспечения качества услуг является первоочередной для большинства предприятий автотранспорта. Прежде всего, это связано с заметным снижением спроса на автотранспортные работы в связи с

- повышением уровня качества как западных, так и отечественных автомобилей, обусловленным высокой конкуренцией в данном секторе рынка;

- снижения сроков эксплуатации автомобилей, связанное с лояльностью ценовой политики производителей, стремительным ростом и ежегодной модернизацией данной продукции;

- повышением представленности рассматриваемого типа услуг в рамках дилерских предприятий и т.д.

Все перечисленное ставит перед владельцами и сотрудниками автосервисных предприятий наряду с основной задачей - выполнение работ по техническому обслуживанию автомобилей на высоком уровне, дополнительную задачу - повышение качества услуг с целью удовлетворения потребностей потребителей. При этом в весовом соотношении приоритетности указанных задач практически одинаковы, и только потребитель может дать оценку качества получаемой услуги, мерой которой является его удовлетворенность.

Решить поставленные задачи возможно только комплексным исследованием проблемы с применением методов управления качества, установлением обратной вязи с потребителем и оценкой потенциала удовлетворенности потребителей.

Анализ применимости методов управления качества к сфере сервисного обслуживания автотранспортного предприятия позволил выявить наиболее продуктивный методов анализа удовлетворенности потребителя – метод Н. Кано.

Преимуществом метода является возможность спрогнозировать реакцию потребителя на планируемые мероприятия по улучшению качества еще до предоставления услуги.

Алгоритм реализации метода состоит из следующих этапов:

1. Формирования списка характеристик услуги;

2. Разработка вопросника для потребителей, включающего позитивную и негативную формулировку вопросов по каждой характеристики. (Пример позитивной формулировки: Насколько вам понравится наличие такой характеристики в продукте? Пример негативной формулировки: Как вы отнесетесь к тому, что эта характеристика будет выражена слабо или же будет отсутствовать вообще?).

3. Проведение опроса потенциальных потребителей с использованием ограниченной вариации ответов. В данном случае используется следующий список ответов: «Мне это нравится», «Я ожидаю, что эта характеристика будет», «Я отношусь к ней нейтрально», «Я могу ее терпеть», «Мне это не нравится».

4. Обработка результатов с использованием оценочной таблицы (табл. 1).

Таблица 1

Оценочная таблица Н. Кано

Положительный вопрос	Отрицательный вопрос					
	Ответ	нравиться	ожидаю	нейтрально	могу терпеть	не нравится
	нравиться	-	Тип 1	Тип 1	Тип 1	Тип 2
	ожидаю	Тип 5	Тип 4	Тип 4	Тип 4	Тип 3
	нейтрально	Тип 5	Тип 4	Тип 4	Тип 4	Тип 3
	могу терпеть	Тип 5	Тип 4	Тип 4	Тип 4	Тип 3
	не нравится	Тип 5	Тип 5	Тип 5	Тип 5	-

В соответствующих ячейках оценочной таблицы (табл. 1) указан предполагаемый тип характеристики. Н. Кано предположил, что существуют пять таких типов:

Тип 1 - «Привлекательная» характеристика – неожиданная характеристика, о которой потребитель может только мечтать;

Тип 2 - «Одномерная» характеристика – характеристика вызывающая удовлетворение (если она есть) или неудовлетворение (если ее нет);

Тип 3 - «Обязательная» характеристика – характеристика, которая обязательно должна присутствовать;

Тип 4 - «Неважная» характеристика – потребителю все равно, присутсвует характеристика или нет;

Тип 5 - «Нежелательная» характеристика – сводит на нет положительное влияние «привлекательных» и «одномерных» характеристик.

5. Расчет потенциала удовлетворенности (ПУ) и неудовлетворенности (ПНУ) для каждой из характеристик по формулам:

$$\text{ПУ} = \frac{N_c + N_{T2}}{N_c + N_{T1} + N_{T2} + N_{T3} + N_{T4} + N_{T5}} \cdot 100\% \quad (1)$$

$$\text{ПНУ} = -\frac{N_{T2} + N_{T3} + N_{T4}}{N_{T1} + N_{T2} + N_{T3} + N_{T4} + N_{T5}} \cdot 100\% \quad (2)$$

где N_{T1} – частота отнесения характеристики к типу 1, N_{T2} – частота отнесения характеристики к типу 2, N_{T3} – частота отнесения характеристики к типу 3, N_{T4} – частота отнесения характеристики к типу 4, N_{T5} – частота отнесения характеристики к типу 5, N_c – частота возникновения ситуации, когда идентифицировать тип характеристики невозможно.

6. Оценка приоритетности характеристик, определяющих качество услуги.

Приведенный алгоритм был реализован в рамках автопредприятия ИП «Ильинское».

В качестве базовых характеристик были рассмотрены:

1. Качество технического обслуживания;
2. Квалификация работников автосервиса;
3. Культура обслуживания клиентов;
4. Минимальное время выполнения работ;
5. Удобство местонахождения автосервиса;
6. Наличие дополнительных услуг в период ожидания клиентом выполнения сервисных работ.

В соответствии с приведенным алгоритмом был проведен опрос 70 потенциальных потребителей. Результаты обработки приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты опроса потенциальных потребителей

№ характеристики	N_{T1}	N_{T2}	N_{T3}	N_{T4}	N_{T5}	N_c	ПУ	ПНУ
1	41	11	7	11	-		15	- 42
2	5	34	26	4	-	-	48	- 93
3	20	25	19	6	-	-	36	- 71
4	12	18	23	17	-	-	26	- 83
5	2	45	23	-	-	-	64	- 97
6	17	2	10	41	-		2	- 76

Для визуализации полученных результатов (табл. 2) была построена карта потенциала удовлетворённости (рис. 1), где по оси Y – потенциала удовлетворенности (ПУ), а по оси X – потенциала неудовлетворенности (ПНУ) (рисунок).

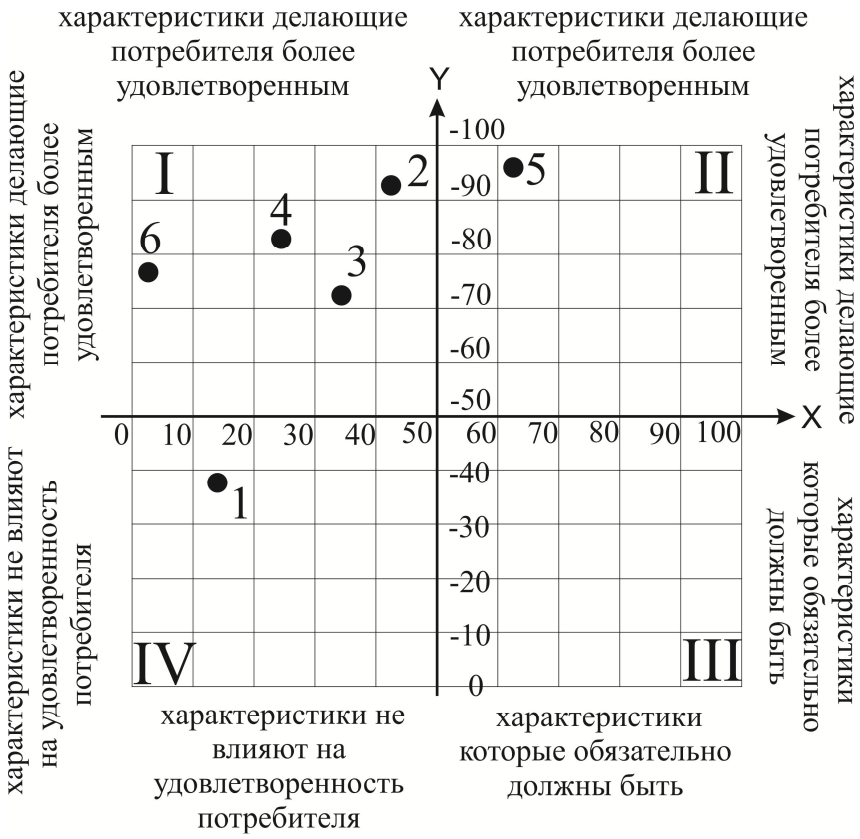
Построение карты удовлетворенности позволяет разбить все характеристики на четыре группы:

I группа - сюда попадают характеристики услуги, которые делают пользователя более удовлетворенным.

II группа – характеристики наличие которых делает потребителя счастливым;

III группа – характеристики не важные для потребителя, но их наличие ему мешают;

IV группа – характеристики которые должны быть обязательно, либо потребитель не будет пользоваться услугой.



Карта потенциала удовлетворенности потребителя

По результатам проведенного анализа видно, какие из характеристик услуги являются привлекательными для потенциального потребителя и требуют дальнейшего развития. Это помогает поставщику услуги лучше понять требования потребителя и разработать долговременные планы в области управления качеством.

Список литературы

1. ГОСТ Р 50691-2013. Услуги населению. Модель системы обеспечения качества услуг. М.: Стандартинформ, 2014. 8 с.

2. ГОСТ Р ИСО 9001-2011. Системы менеджмента качества. Требования. М.: Стандартинформ, 2012. 40 с.

3. Всеобщее управление качеством: учебник для вузов / О.П. Глудкин, Н.М. Горбунов, А.И. Гуров, Ю.В. Зорин; под ред. О.П. Глудкина. М.: Радио и связь, 1999. 600 с.

Аверьянова Инна Эдуардовна, канд. техн. наук, доц., inna160366@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Плахотникова Ирина Алексеевна, магистр, e_plahotnikova@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Молчанова Мария Сергеевна, магистр, averjnova757@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

CALCULATION OF POTENTIAL OF CONSUMERS SATISFACTION AT THE QUALITY ASSESSMENT OF VEHICLES SERVICE

I.Je. Averyanova, I.A. Plaxotnikova, M.S. Molchanova

The present article describes the experience of realizing the method of N.Kano for the calculation of consumers' satisfaction potential and for finding out priority lines of upgrading the services quality within the frameworks of motor company.

Key words: the quality, consumer`s satisfaction, the method of Kano, competitiveness.

Averyanova Inna Jeduardovna, candidate of technical sciences, docent, inna160366@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University.

Plaxotnikova Irina Alekseevna, magister, e_plahotnikova@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Molchanova Marija Sergeevna, magister, averjnova757@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 658.562

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ТРУДА НАЛАДЧИКОВ АВТОМАТИЧЕСКИХ РОТОРНЫХ ЛИНИЙ ПРИ ВНУТРИПРОИЗВОДСТВЕННОМ ХОЗРАСЧЕТЕ

М.А. Носов, А.Л. Сабинина, Н.В. Анцева

Представлена методика оценки качества труда наладчиков автоматических роторных линий по производству спортивно-охотничьих патронов при внутрипроизводственном хозрасчете. Рассмотрен механизм управления параметрами непрерывного приемочного контроля качества продукции по альтернативному признаку.

Ключевые слова: управление качеством, соответствие, план контроля, выборочный контроль, показатели качества.

В современной рыночной экономике огромное внимание уделяется проблемам качества. При наличии на рынке большого количества продукции аналогичного характера именно качество как совокупность характерных свойств, формы, внешнего вида и условий применения, которыми должны быть наделены товары для соответствия своему назначению, становится одним из важнейших преимуществ в условиях неценовой конкуренции. Только качество может привлечь потребителя [1 – 3]. Поэтому на предприятиях организуют процесс мониторинга и измерения продукции, заключающийся в планировании и осуществлении измерения продукции с целью проверки того, что требования к продукции выполнены. Особенно это важно для предприятий, выпускающих продукцию, которая может быть потенциально опасной для человека, например, спортивно-охотничьи патроны.

Спортивно-охотничьи патроны производятся на автоматических роторных линиях (АРЛ), представляющих собой комплекс рабочих машин, транспортных устройств, приборов, объединённых единой системой автоматического управления, в котором одновременно с обработкой заготовки перемещаются по дугам окружностей совместно с воздействующими на них орудиями труда. Настройка автоматических роторных линий на выполнение технологических операций осуществляется наладчиками. Как следствие возникает проблема повышения качества работы наладчиков АРЛ, которую можно решить повышением мотивации персонала к качественному труду. Одним из способов повышения мотивации является установление величины премии в зависимости от качества выпускаемой продукции.

Качество спортивно-охотничьих патронов в процессе производства оценивается в результате выполнения различных видов контроля [4]. Последовательность проведения контроля, периодичность, объём, методы контроля, оформление результатов контроля осуществляются в соответст-

вии с ГОСТ Р 50530-2015 «Патроны к гражданскому и служебному огнестрельному оружию, устройствам производственного и специального назначения. Требования безопасности и методы испытаний на безопасность».

Качество готовых спортивно-охотничьих патронов оценивается по результатам приемо-сдаточных испытаний, относящихся к разрушающим видам контроля. Поэтому, а также из-за значительных объемов выпускаемой продукции, на предприятиях патронного производства широко применяется выборочный контроль. При его организации приходится решать достаточно сложную задачу установления объема выборки и правила отбора патронов для проведения приемо-сдаточных испытаний. Ведь, если размер выборки недостаточен, то можно пропустить брак, если наоборот размер выборки большой, то возникнут дополнительные расходы на выпуск дополнительной партии спортивно-охотничьих патронов. Для решения данной задачи целесообразно применение многостадийных планов непрерывного статистического приемочного контроля по ГОСТ Р 50779.51-95 «Статистические методы. Непрерывный приемочный контроль качества по альтернативному признаку».

Алгоритм проведения проверок по многостадийным планам непрерывного контроля достаточно прост. Сплошной контроль проводят до появления серии из n годных единиц продукции подряд.

После появления серии из n годных единиц продукции переходят к первой стадии выборочного контроля с частотой f_1.

Контролируют n единиц продукции, выбранных с частотой f_1 из предъявленных на контроль. Если среди них нет ни одной несоответствующей единицы продукции по контролируемому признаку, то происходит ослабление контроля (переход к стадии i+1 с частотой f_{i+1}) и т. д.

Если среди n проконтролированных единиц продукции есть несоответствующие требованиям, но их число меньше, чем браковочное число R, то контроль продолжают на этой же стадии с той же частотой, но с новым отсчетом количества проконтролированных и несоответствующих единиц (обнаружение одной несоответствующей единицы продукции для всех планов контроля с браковочным числом R большим единицы).

Если в процессе контроля число несоответствующих единиц продукции стало равным браковочному числу, контроль на этой стадии прекращают и происходит усиление контроля (переход к стадии i-1 с частотой $f_{i\text{-}1}$.

На последней стадии выборочного контроля (с наибольшим номером $i=k$) проверки проводят так же, как и на стадиях выборочного контроля, кроме одного: при числе несоответствий, меньшем R, в серии из n единиц продукции продолжают контроль с той же частотой, но с новым отсчетом проконтролированных и несоответствующих единиц продукции на этой стадии.

Для определения основных показателей выборочного контроля используются параметры n – длина стадии, т. е. число изделий, контролируемых на каждой стадии, d (или $f = 1/d$) – коэффициент ослабления от стадии к стадии $d = \frac{1}{f^i}$ и уровень несоответствий в партии продукции q – показатель качества продукции, выраженный либо в виде процента несоответствующих единиц продукции в партии, либо в виде числа несоответствий на сто единиц продукции в партии. Значение q также называется входным уровнем несоответствия.

Основными показателями в данном случае будут:

– средняя продолжительность фазы стопроцентного контроля – математическое ожидание числа изделий, прошедших фазу сплошного контроля.

$$U(q \mid n) = \frac{1-(1-q)^n}{q \cdot (1-q)^n},$$

где q – уровень несоответствия процесса;

– средняя продолжительность фазы f (выборочного) контроля:

$$V(q \mid d) = \frac{d}{q} = \frac{1}{f \cdot q},$$

где f – частота контроля.

– средняя продолжительность цикла (1 фаза 100 % и 1 фаза 100 %f контролей):

$$Z(q \mid n,d) = \frac{1+(d-1) \cdot (1-q)^n}{q \cdot (1-q)^n},$$

– средняя (-ее) доля (число) проконтролированных за один цикл изделий.

$$AFI(q \mid n,d) = \frac{1}{1+(d-1) \cdot (1-q)^n};$$

– средний выходной уровень несоответствий AOQ – математическое ожидание уровня несоответствий в принятых и забракованных партиях (в которых после сплошного контроля все обнаруженные дефектные единицы продукции заменены годными) или потоке продукции, изготовленных за определенный интервал времени, равный отношению числа прошедших через контроль дефектных изделий к общему числу изготовленных изделий:

$$AOQ(q \mid n,d) = \frac{(d-1) \cdot q \cdot (1-q)^n}{1+(d-1) \cdot (1-q)^n},$$

– средний выходной уровень несоответствий $AOQ*$ – математическое ожидание уровня несоответствий в принятых и забракованных партиях (в которых после сплошного контроля все обнаруженные дефектные единицы продукции изымаются из партии) или в потоке продукции, изготовленных за определенный интервал времени, равный отношению числа прошедших через контроль дефектных изделий к общему числу изготовленных изделий:

$$AOQ*(q \mid n,d) = \frac{(d-1)\cdot q\cdot(1-q)^{n-1}}{1+(d-1)\cdot(1-q)^{n-1}};$$

– оперативная характеристика – вероятность приемки партии с долей брака q:

$$L(q \mid n,d) = \frac{V(q \mid d)}{Z(q \mid n,d)} = \frac{d\cdot(1-q)^{n}}{1+(d-1)\cdot(1-q)^{n}} = \frac{AOQ(q \mid n,d)}{q(1-f)}.$$

Оперативная характеристика становится более крутой (увеличивается мощность критерия), если длина стадии контроля n возрастает и/или уменьшается интервал между выборками d.

На рис. 1 и 2 представлена графическая интерпретация результатов расчетов показателей выборочного контроля качества спортивно-охотничьих патронов по приведенным выше формулам.

Из полученных графиков видно, что выходной уровень несоответствия ($AOQ \approx AOQ*$) максимально составляет примерно 0,0119 или 1,19 %, а при входном уровне несоответствия более 10 % средняя доля проконтролированных изделий $AFI(q) = 99{,}89\ \%$, вероятность принятия партии $L(q) = 0\ \%$ в виду того, что при возрастании q контроль переходит на стадию сплошного. Причем при проведении приемо-сдаточных испытаний спортивно-охотничьих патронов предприятие не может перейти на сплошной контроль, так как испытания являются разрушающими. Поэтому необходимо обеспечить уровень несоответствия $q < 10\ \%$ на ранних стадиях производства. Для этого необходимо мотивировать наладчиков АРЛ на качественный труд.

Правильность настройки роторной линии определяется контролером отдела технического контроля (ОТК) по результатам контроля первой выборки. В течение смены наладчик АРЛ и контролер ОТК осуществляют проверку качества продукции в соответствии с требованиями технологического процесса.

При обнаружении брака прекращается дальнейший прием спортивно-охотничьих патронов до выявления наладчиком причин появления дефектов и их немедленного устранения. В качестве показателей качества труда наладчиков используются процент потерь от брака в общем объеме выпущенной продукции, процент сдаваемой продукции с первого предъ-

явления и количество возвратов партий продукции ОТК. В таблице представлены балльные оценки, выставляемые наладчикам АРЛ по результатам приемки готовой продукции и используемые при определении размера премии.

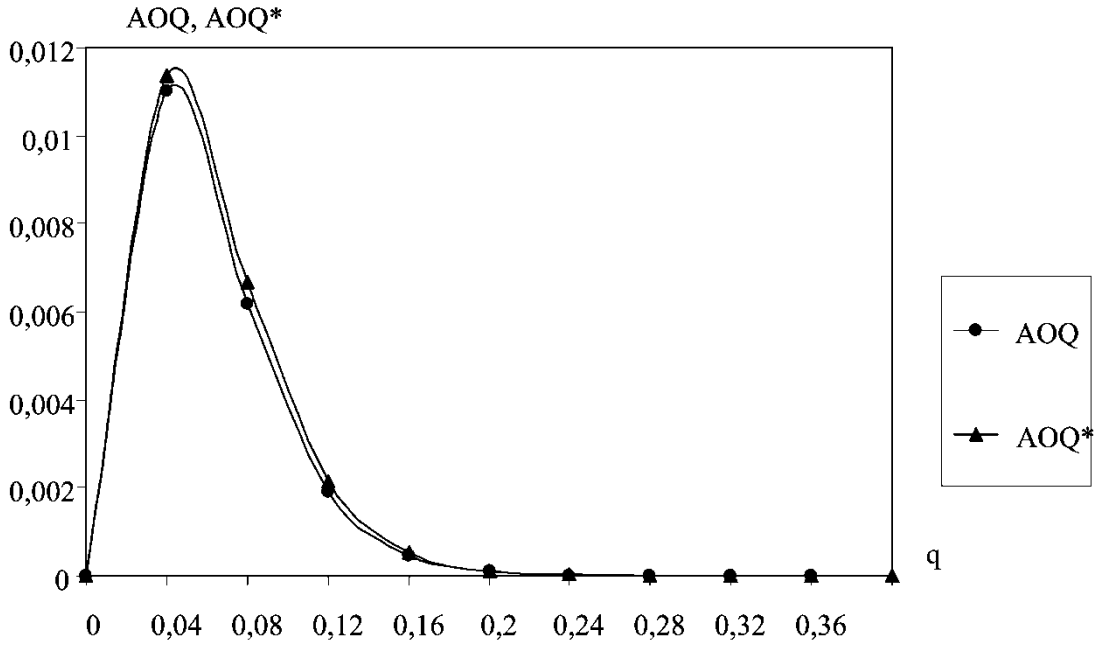


Рис. 1. Графики среднего выходного уровня дефектности: AOQ– средний выходной уровень несоответствий с разбраковкой, AOQ*– средний выходной уровень несоответствий без разбраковки

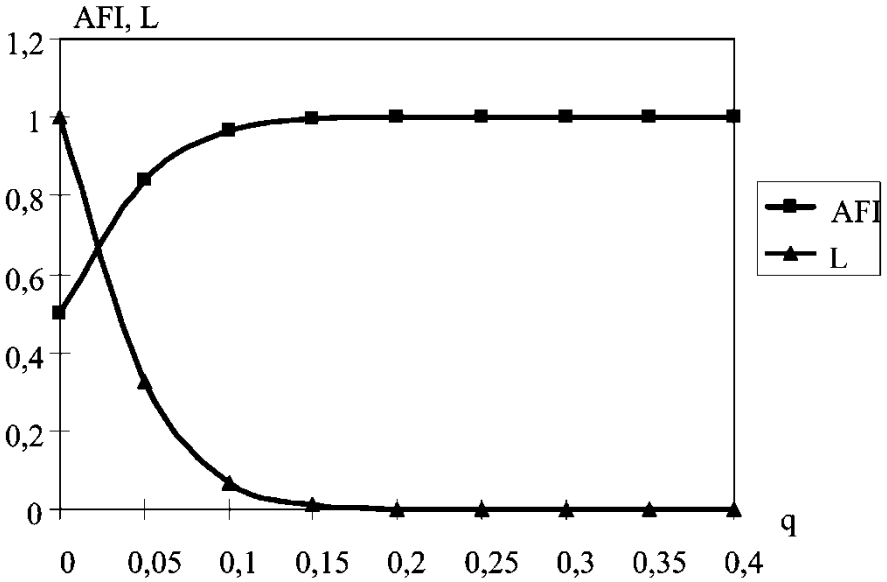


Рис. 2. Оперативная характеристика качества процесса и средняя (-ее) доля (число) проконтролированных за один цикл изделий

Балльные оценки качества труда наладчиков АРЛ по результатам контроля качества спортивно-охотничьих патронов

Наименование показателя	Оценка показателя	Ед. изм.	Значение показателя	Оценка, балл
Процент потерь от брака	$\frac{\text{ПоБ}}{\text{ОВП}} \cdot 100\ \%$	%	0 – 0,3 0,31 – 0,45 0,46 – 0,55 более 0,55	5 4 3 2
Процент сдаваемой продукции с первого предъявления	$\frac{\text{ОПП1П}}{\text{ОВП}} \cdot 100\ \%$	%	100 98 96 менее 96	5 4 3 2
Количество возвратов партий продукции ОТК	К	Шт.	– 2 4 более 4	5 4 3 2

В таблице приняты следующие условные обозначения:

– ПоБ – потери от брака, руб.;

– ОВП – объем выпущенной продукции, руб.;

– ОПП1П – объем продукции, принятой с первого предъявления, руб.;

– К – количество возвратов партий продукции ОТК за отчетный период.

Каждый наладчик АРЛ по результатам работы в отчетном периоде получает соответствующие баллы по представленным показателям качества его труда. Далее считается средний балл, в зависимости от значения которого наладчику определяется размер премии. В случае получения наладчиком среднего балла, равного пяти, размер премии составляет 50 % заработной платы, четырем – 35 %, трем – 20 %. В случае получения минимального среднего балла, равного двум, премия наладчику не выплачивается. При систематическом получении наладчиком минимальных баллов, руководством принимается решение о повышении его квалификации, а также ищутся другие способы повышения мотивации наладчика к качественному труду.

Внедрение представленной методики оценки качества труда наладчиков автоматических роторных линий в систему внутрипроизводственного хозрасчета позволило повысить производительность труда наладчиков на 15 % и на 30 % сократить количество несоответствующей продукции.

Список литературы

1. Аникеева О.В., Золотухина Н.П., Ивахненко А.Г., Олейник А.В., Сторублев М.Л. Управление качеством в системах и процессах машиностроения. Курск: ЗАО «Университетская книга», 2014. 208 с.

2. Анцев В.Ю., Иноземцев А.Н. Всеобщее управление качеством: учеб. пособие для студентов вузов. Тула: Изд-во ТулГУ, 2005. 243 с.

3. Ивахненко А.Г., Пузанов В.Е. Основные положения динамики качества продукции // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2012. № 2-5 (292). С. 122-128.

4. Анцев В.Ю., Иноземцев А.Н., Пасько Н.И. Вероятностно-статистический анализ процесса испытания автоматических технологических машин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2012. Вып. 2. С. 247-254.

Носов Михаил Александрович, генеральный директор, tpz@tulammo.ru, Россия, Тула, Тульский патронный завод,

Сабинина Анна Львовна, д-р экон. наук, проф., зав. кафедрой, fim@tsu.tula.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Анцева Наталья Витальевна, канд. техн. наук, доц., n.anzeva@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

QUALITY ESTIMATION OF A WORK OF AN AUTOMATIC ROTARY LINES' SETUP MAN IN THE CONDITIONS OF INTRAINDUSTRIAL SELF-FINANCING

M.A. Nosov, A.L. Sabinina, N.V. Antseva

The method work's estimation of setup man of automatic rotary lines of sporting and hunting cartridge production in the conditions of intraindustrial self-financing is presented in the article. The control mechanism of parameters of continuous acceptance inspection of production's quality based on alternate criterion is considered.

Key words: quality management, conformity, inspection plan, random inspection, quality factors.

Nosov Mikhail Aleksandrovich, CEO, tpz@tulammo.ru, Russia, Tula, The Tula Cartridge Works,

Sabinina Anna L'vovna, doctor of economic sciences, professor, head of department, fim@tsu.tula.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Antseva Natal'ya Vital'evna, candidate of technical science, docent, n.anzeva@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 681.518.5:681.5.08

МЕТОД ТЕХНИЧЕСКОГО САМОДИАГНОСТИРОВАНИЯ В КОМПЛЕКСАХ КОРРЕКТИРУЮЩЕГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ДЫХАТЕЛЬНУЮ СИСТЕМУ

Н.В. Ивахно, С.С. Федоров, А.Н. Чуков

Рассмотрен структурно-алгоритмический метод самодиагностирования, отличающийся контролем состояния исполнительного устройства и питающего напряжения с возможностью восстановления системы при возникновении возмущающих воздействий за счет своевременного формирования управляющих импульсов на устройство управления, что повышает безопасность состояния пациента, исключая возможность баротравмы дыхательной системы.

Ключевые слова: комплекс корректирующего воздействия, надежность схемы, исполнительное устройство, напряжение питания, компаратор, датчик тока, восстановление параметров.

К гражданским высокотехнологичным видам продукции относится инновационное медицинское оборудование, развитие которого является важнейшим направлением индустриализации. Указанная отрасль демонстрирует высокую степень зависимости от импортного производства. Создание новых методов и технических средств проектирования интеллектуальных комплексов корректирующего воздействия на дыхательную систему человека является актуальной проблемой, решение которой имеет важное социально-экономическое значение.

В результате анализа медицинских и технических требований установлены закономерности построения комплексов корректирующего воздействия на дыхательную систему человека (ККВДС), конструктивные решения которых с учетом взаимодействия компонентов биотехнической системы «дыхательный тренажер – пациент» представлены в виде обобщенной структурно-функциональной схемы [1,2].

При проектировании биотехнических устройств важное значение приобретают вопросы обеспечения надежности и безопасности. Для устранения неблагоприятных последствий возможных отказов широко используются структурно-алгоритмические методы [3,4], которые базируются на разработке дополнительных алгоритмов, использующих для достижения поставленной цели функционирования различные комплексы управляющих воздействий и управляемых переменных системы, а также на процедуре целенаправленного изменения алгоритма управления в процессе накопления нарушений [3].

В процессе дыхания через регулируемое сопротивление в дыхательной трубке (ДТР), соединенной с загубником, датчиками (рис.1), измеряется давление в полости дыхательной трубки *P(t)*, которое через блок аналоговой обработки сигналов передается в устройство контроля и управления (УКИУ).

В результате анализа кривой давления происходит настройка входных параметров обнаружения (амплитуда полезного сигнала *as*, дисперсия σ^2 и среднее значения шума *a0*) для реализации модели обработки сигнала с целью своевременного распознавания дыхательной активности и обеспечения высокой степени синхронизации дыхания и комплекса [5]. С использованием блока диагностирования состояния дыхательной системы, использующего методы параметрического анализа, происходит формирование сигнала управления на исполнительное устройство, осуществляющее изменение и адаптацию нагрузки (сопротивление/давления переключения) в дыхательном контуре по заданному закону с учетом индивидуального состояния пациента и его изменения [2]. Также для длительного прогнозирования и формирования ограничений на воздействие производится математическое моделирование процессов в дыхательной системе (рис.1).

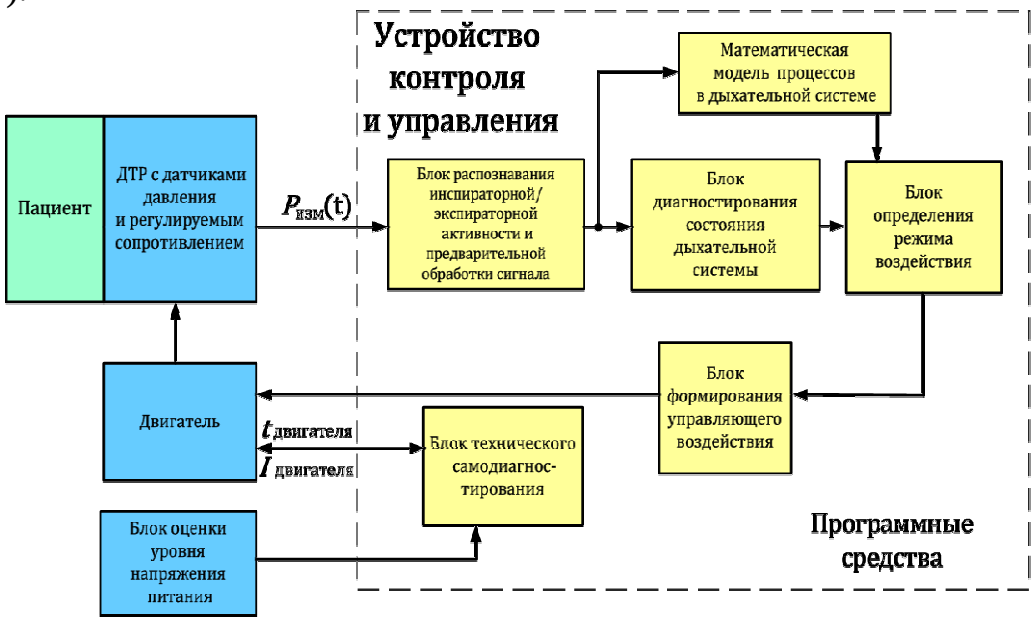


Рис.1. Обобщенная структура ККВДС

В ККВДС должен обязательно включаться контур технического самодиагностирования, который необходим для обеспечения своевременной оценки и корректировки работы основных составляющих блоков комплекса.

В данной структуре контур самодиагностики реализует защиту исполнительного устройства от перегрузки, анализируя температуру t и ток I электродвигателя в его составе, и позволяет экстраполировать отказ, осуществляя корректировку управляющего воздействия. Одновременно происходит анализ давления в дыхательной трубке при функционировании как в дроссельном режиме, так и в пиковом, что предотвращает возможность появления баротравмы. Блок оценки питания опережающего оповещения позволяет спрогнозировать снижение или сбой уровня питающего напряжения, своевременно сохранить текущие данные и обеспечить перезапуск и восстановление системы.

Использование пошагового алгоритма модели, программно реализованного на микроконтроллере с использованием линейного метода, существенно сократит время, затрачиваемое на перебор вариантов проектируемых схем диагностического обеспечения и на проведение расчетов при изменении функциональной структуры подсистем разрабатываемого ККВДС [4].

Как показала практическая реализация процесса выбора диагностических параметров, предложенная математическая модель [3,4], разработанная с учетом причинно-следственных связей между работоспособностью и отказом подсистем проектируемого образца ККВДС, позволяет на этапе разработки установить оптимальное количество информационных параметров, необходимых для определения вида ее технического состояния [3].

Данный подход к формированию математической модели выбора диагностических параметров, необходимых для определения работоспособности подсистем образца или причин ее неисправного состояния, является универсальным и позволяет проектировать наиболее рациональные системы автоматизированного технического диагностирования перспективных ККВДС.

С использованием информационного критерия и учетом структуры тренажерного комплекса выбран ряд точек, обеспечивающих однозначное решение задачи диагностирования: система электропитания, исполнительное устройство, а также отдельный блок контроля, входящий в диагностическую систему и являющийся блоком анализа состояния дыхательной системы человека через измерение давления [4].

Устройство самодиагностики включает в себя источник питания (ИП), рассчитанный на напряжение $U_{П}$ (как правило +12 В), преобразователи напряжения ПН1 и ПН2; компараторы по напряжению КОМП1,

КОМП2. Питание двигателя (Д) осуществляется с ИП через датчик тока и импульсный усилитель (ИУ). Сигналы с датчика температуры (ДТ) и датчика тока подаются на устройство контроля и управления (УКИУ). Часы реального времени (ЧРВ) необходимы для независимой фиксации моментов переключения различных блоков (рис.2).

Работа комплекса корректирующего воздействия с учетом вышеприведенного описания происходит следующим образом.

В ходе тренировки пациент дышит через дыхательную трубку с загубником. Давление в дыхательном контуре $P(t)$ на вдохе и выдохе фиксируется с помощью датчиков давления (ДД) и преобразуется в цифровую форму в устройстве управления, где происходит расчет параметров дыхания пациента и формируется сигнал управления на исполнительное устройство, воздействующее на регулируемое сопротивление или дроссель (РС).

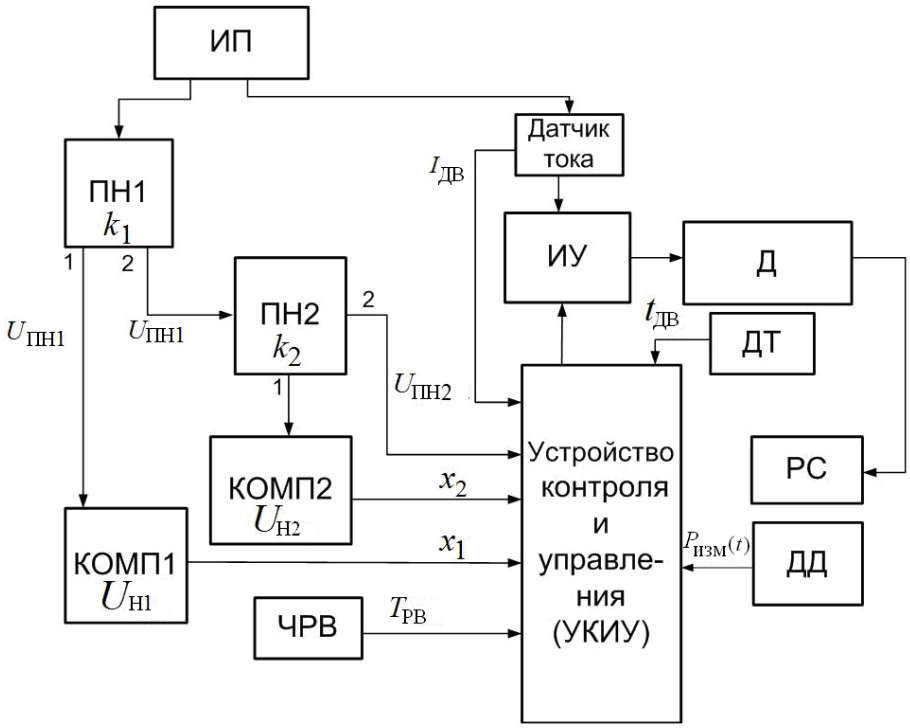


Рис. 2. Обобщенная структура блока самодиагностирования ККВДС

Устройство самодиагностирования осуществляет контроль состояния исполнительного устройства, представленного двигателем (Д), через датчик тока, на вход которого поступает напряжение от источника питания. ДТ, установленный вблизи или на корпусе двигателя, передает сигнал на УКИУ, который, осуществляя анализ значений с датчика тока и ДТ, обеспечивает защиту исполнительного устройства от перегрузки и перегрева и позволяет повысить отказоустойчивость комплекса, своевременно регулируя скорость работы двигателя [4].

Таким образом, основным условием функционирования исполнительного устройства, представленного двигателем, являются критерии

$$I_{ДВ}(t) \le I_{ПР}, \quad t_{ДВ}(t) \le t_{ПР},$$

где $I_{ПР}$, $t_{ПР}$ – предельные значения тока и температуры, формируемые исходя их технических условий на двигатель.

Напряжение с источника питания $U_{П}$ поступает на ПН1 с коэффициентом k_1, осуществляющим преобразование $U_{ПН1} = U_{П} \cdot k_1$.

При подаче напряжения с ПН1 на вход первого КОМП1, настроенного на предельное минимальное питающее напряжение $U_{Н1}$, на его выходе при уровне входного напряжения ниже того, на которое настроен компаратор $U_{Н1}$, формируется сигнал в виде логической единицы, который подается на УКИУ и сигнализирует о сбое первичного электропитания, что позволяет в энергонезависимой памяти УКИУ заблаговременно сохранить текущие данные о положении РС, величине давления в дыхательном контуре, значении энергонезависимых часов реального времени $T_{РВ}$. Второй преобразователь напряжения (ПН2) с коэффициентом преобразования k_2, соединенный с ПН1, преобразует входное напряжение до уровня, необходимого для питания УКИУ:

$$U_{ПН2} = U_{П} \cdot k_1 \cdot k_2 = U_{ПН1} \cdot k_2.$$

Второй КОМП2, на вход которого подано напряжение с ПН2, настроен на предельно допустимое питающее напряжение $U_{Н2}$ УКИУ. При снижении уровня входного напряжения относительно предельно допустимого $U_{Н2}$, КОМП2 на выходе вырабатывает логическую единицу, осуществляющую перезапуск УКИУ.

Фрагмент алгоритма, описывающий обобщенную структуру работы блока самодиагностики, изображен на рис.3.

При автоматическом перезапуске УКИУ, так как сработала схема сигнализации сбоя первичного электропитания, представленного ПН1 и КОМП1, и промежуточные данные были сохранены, происходит восстановление работы всех параметров системы с того момента времени, когда произошел сбой по питанию в том случае, если анализ сохраненного и текущего значений часов реального времени (ЧРВ) показывает разницу менее одной секунды $0 \le T_{РВ} \le 1\ c$. Если разница между этими значениями превышает одну секунду, это указывает на начальное включение дыхательного тренажера и УКИУ начинает работу с исходного состояния [4,5].

В целом, алгоритм формирования управляющих импульсов с блока контроля питания на УКИУ описывается следующими математическими выражениями:

$$x_1 = \begin{cases} 1, & \text{если} \quad sign(U_{H1} - U_{ПН1}) \geq 0, \\ 0, & \text{если} \quad sign(U_{H1} - U_{ПН1}) = -1, \end{cases}$$

$$x_2 = \begin{cases} 1, & \text{если} \quad sign(U_{H2} - U_{ПН2}) \geq 0, \\ 0, & \text{если} \quad sign(U_{H2} - U_{ПН2}) = -1. \end{cases}$$

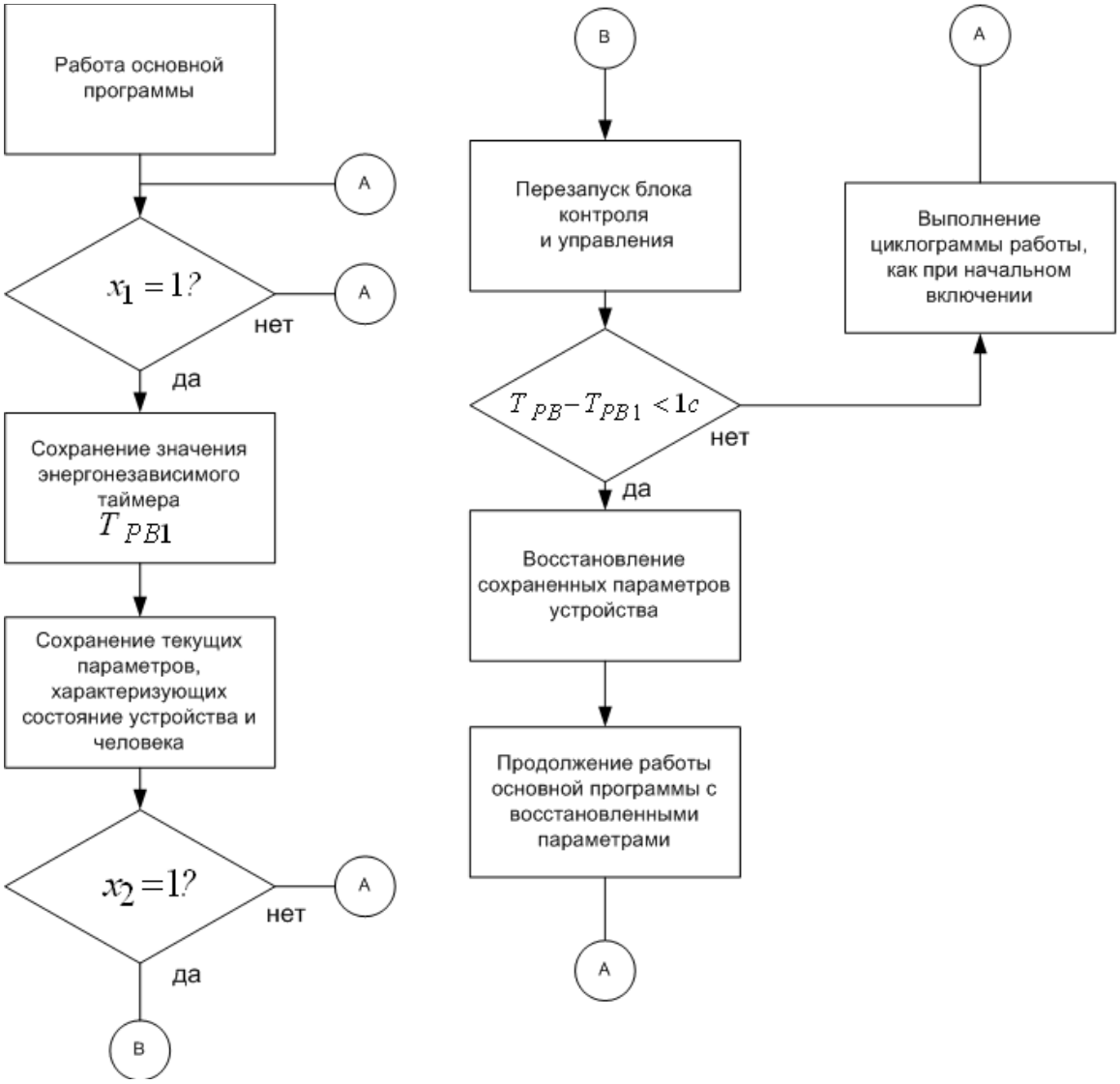


Рис.3. Алгоритм диагностирования и восстановления подсистемы электропитания ККВДС

Применение рассмотренной структуры и алгоритма повышает отказоустойчивость аппаратуры корректирующего воздействия за счет контроля состояния исполнительного устройства, блока питания и быстрого восстановления системы при возникновении кратковременных возмущающих воздействий, что позволяет исключить возможность баротравмы пациента и значительно расширяет возможность применения ККВДС в лечебной и восстановительной медицине.

Введенная в комплексы корректирующего воздействия подсистема диагностирования, реализованная структурно-алгоритмическим методом, обеспечивает повышение надежности функционирования, осуществляя контроль наиболее значимых блоков, оказывающих влияние на состояние пациента.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Администрации Тульской области в рамках научного проекта № 15-48-03247 « р_центр_а».

Список литературы

1. Ивахно Н.В. Обобщенная структура комплексов интеллектуального тренажерного воздействия на дыхательную систему // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2014. Вып. 11. С. 110–114.

2. Ивахно Н.В. Формирование общей совокупности информативных признаков для идентификации состояния дыхательной системы. // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2015. Вып. 8. Ч. 1. С. 106-111.

3. Ивахно Н.В. Оптимальный информационный алгоритм поиска места отказа в интеллектуальных тренажерах дыхательной мускулатуры // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. №2, 2015. С. 5-15.

4. Ивахно Н.В., Чуков А.Н. Структурно-алгоритмический метод повышения надежности комплексов тренажерного воздействия на дыхательную систему // Труды международного симпозиума «Надежность и качество» в 2-х т / под редакцией Н.К. Юркова. Том 2. Пенза: Изд-во: Пензенский государственный университет, 2015. С. 254-256.

5. Ивахно Н.В., Федоров С.С. Принцип построения математической модели процесса обработки сигналов при распознавании дыхательной активности в системах интеллектуального тренажерного воздействия. // Биотехносфера. 2014. №5 (35). С. 19-22.

Ивахно Наталия Валериевна, канд. техн. наук, доц., natalia_iv@list.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Федоров Сергей Сергеевич, асс., fedorovpulm@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Чуков Александр Николаевич, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой, chukov.aleksandr@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

METHOD TECHNICAL SELF-DIAGNOSIS
THE COMPLEXES OF CORRECTIVE ACTION ON THE RESPIRATORY SYSTEM

N.V. Ivakhno, S.S. Fedorov, A.N. Chukov

The structural-algorithmic method of self-diagnosing, wherein the control of the state of the actuator and the power supply with the ability to restore systems in the event of disturbances due to the timely formation of managing pulses to the control unit, which increases the safety of the patient, eliminating the possibility of barotrauma of the respiratory system.

Key words: complex corrective action, the reliability of the circuit, actuator, power supply voltage, the comparator, current sensor, restore parameters.

Ivakhno Natalia Valerievna, candidat of technical science, docent, natalia_iv@list.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Fedorov Sergey Sergeevich, assistant, fedorovpulm@rambler.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Chukov Aleksandr Nikolaevich, doctor of technical sciences, professor, head of chair, chukov.aleksandr@rambler.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 531.383

ОБЩАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДВУХОСНОГО ГИРОСТАБИЛИЗАТОРА

Е.С. Козлова, С.В. Рогов

Приведена система линейных дифференциальных уравнений двухосного гиростабилизатора, описывающая его движение при установке на высокоманевренные объекты. В качестве переменных в уравнениях использованы углы, определяющие динамическую погрешность такого устройства.

Ключевые слова: конечные значения углов, система координат, высокоманевренный объект, гиростабилизатор, проекции угловой скорости, гиростабилизируемая платформа.

Двухосные гироскопические гиростабилизаторы (ГС) нашли широкое применение на подвижных объектах, в частности на летательных аппаратах различного типа. С их помощью решаются задачи, связанные с ориентацией и навигацией таких объектов, а также стабилизации в заданном положении различных измерительных приборов. Оценка работы таких ГС проводится на базе линейных дифференциальных уравнений, полученных из нелинейных за счет введения ряда допущений. Одно из таких

допущений состоит в том, что карданные углы (углы Крылова), определяющие положение гиростабилизируемой платформы (ГСП) относительно ее корпуса, рассматриваются в виде суммы постоянного отклонения и малых приращений к нему. Такое допущение справедливо только для случая, когда пространственное положение летательного аппарата в заданной системе координат характеризуется малыми углами, так как значения карданных углов зависят не только от погрешности ГС, но и отклонений объекта. При установке ГС на высокоманевренные объекты (ВМО) такие отклонения характеризуются уже конечными значениями. Кроме того, управление ГСП осуществляется по сигналам, характеризующим динамическую погрешность такой системы. Таким образом, возникает задача получения математической модели ГС, которая позволяла бы вводить в нее управляющие моменты и оценивать поведение и динамическую погрешность системы при установке на ВМО.

В зависимости от принципа разгрузки осей ГСП существующие типы ГС подразделяются на силовые и индикаторные. В силовых ГС гироскопические моменты участвуют в разгрузке опор ГСП в первоначальный момент стабилизации, поэтому их система уравнений является более общей, чем индикаторных. В силу этого вначале составим математическую модель силовых двухосных ГС, осуществляющих стабилизацию измерительного прибора в плоскости местного горизонта: оси стабилизации ГС совпадают соответственно с продольной осью и бинормалью, а главные оси гироскопов (ГП) в исходном положении параллельны друг другу и нормали ВМО.

Введем в рассмотрение следующие системы координат (рисунок). $o\xi\eta\zeta$ – опорная система координат; $oxyz$ – связанная система координат; $ox_i y_i z_i$ $(i = \acute{\imath},0,1,2)$ – системы координат, соответственно определяющие положение наружной рамки ГС, гироплатформы и гироскопов.

На рисунке обозначено:

ω_x, ω_y, ω_z – проекции угловой скорости ВМО на связанные оси; при этом

$$\omega_x = \dot{\gamma} - \omega_\xi \cos\vartheta \sin\psi + \omega_\eta \cos\vartheta \cos\psi + (\dot{\psi} + \omega_\zeta)\sin\vartheta$$

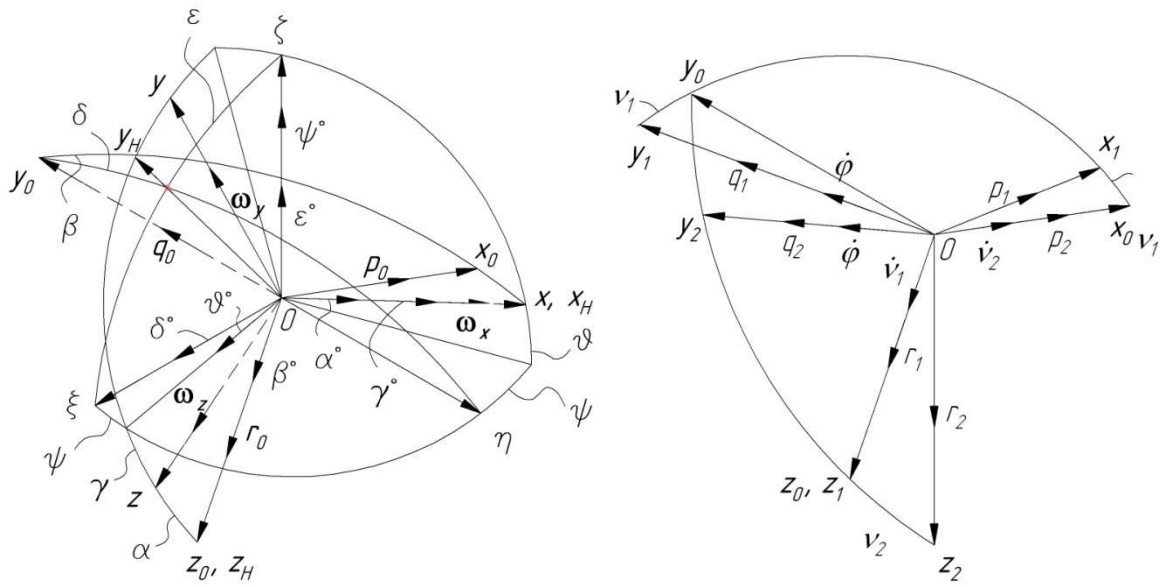
$$\omega_y = \dot{\vartheta}\sin\gamma + \omega_\xi(\sin\gamma\cos\psi + \cos\gamma\sin\vartheta\sin\psi) + \omega_\eta(\sin\gamma\sin\psi -$$
$$- \cos\gamma\sin\vartheta\cos\psi) + (\dot{\psi} + \omega_\zeta)\cos\gamma\cos\vartheta; \qquad (1)$$

$$\omega_z = \dot{\vartheta}\cos\gamma + \omega_\xi(\cos\gamma\cos\psi - \sin\gamma\sin\vartheta\sin\psi) + \omega_\eta(\cos\gamma\sin\psi +$$
$$+ \sin\gamma\sin\vartheta\cos\psi) - (\dot{\psi} + \omega_\zeta)\sin\gamma\cos\vartheta.$$

где ψ, ϑ, γ –углы курса (рысканья), тангажа и крена ВМО соответственно; $\omega_\xi, \omega_\eta, \omega_\zeta$ – скорости вращения опорной системы координат; при учете видимого ухода гироскопа [1]:

$$\omega_\xi = \frac{V\cos\psi}{R_з}, \quad \omega_\eta = U_з\cos\varphi + \frac{V\sin\psi}{R_з}, \quad \omega_\zeta = U_з\sin\varphi + \frac{V\sin\psi}{R_з}tg\varphi,$$

где $U_ç$, $R_ç$ – скорость вращения и радиус Земли соответственно; V, φ - соответственно скорость и широта месторасположения ВМО; α,β – карданные углы.



Системы координат двухосного ГС

Кинематические уравнения наружной рамки ГС, ГСП и ГП согласно рисунку запишутся в виде:

для наружной рамки:

$$p_н = (\dot\alpha + \omega_x);$$
$$q_н = \omega_y\cos\alpha + \omega_z\sin\alpha;$$
$$r_н = \omega_z\cos\alpha - \omega_y\sin\alpha;$$

для ГСП:

$$p_0 = (\dot\alpha + \omega_x)\cos\beta - \omega_y\sin\beta\cos\alpha;$$
$$q_0 = \omega_y\cos\alpha\cos\beta + \omega_z\sin\alpha\cos\beta - (\dot\alpha + \omega_x)\sin\beta;$$
$$r_0 = \dot\beta + \omega_z\cos\alpha - \omega_y\sin\alpha;$$

для первого гироскопа:

$$p_1 = p_0\cos\upsilon_1 + q_0\sin\upsilon_1;$$
$$q_1 = \dot\varphi + q_0\cos\upsilon_1 - p_0\sin\upsilon_1;$$
$$r_1 = \dot\upsilon_1 + r_0;$$

для второго гироскопа:

$$p_2 = \dot{\upsilon}_2 + p_0;$$
$$q_2 = \dot{\varphi} - q_0 \cos\upsilon_2 - r_0 \sin\upsilon_2;$$
$$r_2 = r_0 \cos\upsilon_2 - q_0 \sin\upsilon_2.$$

В приведенных уравнениях $\dot{\varphi}$– собственная угловая скорость гироскопов, а υ_1, υ_2 – углы их поворота вокруг осей прецессии oz_0 и ox_0 соответственно Моменты инерции элементов ГС обозначим так:

$J_{íx}$, $J_{íy}$, $J_{íz}$ – моменты инерции наружной рамки ГС относительно осей $ox_í\, y_í\, z_í$:

J_x, J_y, J_z – моменты инерции ГСП относительно осей $ox_0y_0z_0$;

A– экваториальные моменты инерции ГП (считаем гироскопы идентичными и их моменты инерции относительно экваториальных осей одинаковыми);

H – кинетические моменты ГП.

Для составления дифференциальных уравнений двухосного ГС воспользуемся второй методой Лагранжа [1,5,7,8]. Выражение для кинетической энергии ГС на основе вышеуказанных кинематических уравнений и с учетом введенных обозначений запишется в виде

$$2T = J_{нx}(\dot{\alpha} + \omega_x)^2 + J_{ну}(\omega_y \cos\alpha + \omega_z \sin\alpha)^2 + J_{нz}(\omega_z \cos\alpha - \omega_y \sin\alpha)^2 +$$
$$+ J_x[(\dot{\alpha} + \omega_x)\cos\beta + (\omega_y \cos\alpha + \omega_z \sin\alpha)\sin\beta]^2 +$$
$$+ J_y[(\omega_y \cos\alpha + \omega_z \sin\alpha)\cos\beta - (\dot{\alpha} + \omega_x)\sin\beta]^2 +$$
$$+ J_z(\dot{\beta} + \omega_z \cos\alpha - \omega_y \sin\alpha)^2 + A\{[(\dot{\alpha} + \omega_x)\cos\beta + (\omega_y \cos\alpha + \omega_z \sin\alpha)\sin\beta]\times$$
$$\times \cos\nu_1 + [(\omega_y \cos\alpha + \omega_z \sin\alpha)\cos\beta - (\dot{\alpha} + \omega_x)\sin\beta]\sin\nu_1\}^2 +$$
$$+ C\{\dot{\varphi} + [(\omega_y \cos\alpha + \omega_z \sin\alpha)\cos\beta -$$
$$- (\dot{\alpha} + \omega_x)\sin\beta]\cos\nu_1 - [(\dot{\alpha} + \omega_x)\cos\beta + (\omega_y \cos\alpha + \omega_z \sin\alpha)\sin\beta]\sin\nu_1\}^2 +$$
$$+ A(\dot{\nu}_1 + \dot{\beta} + \omega_z \cos\alpha - \omega_y \sin\alpha)^2 + A[(\dot{\alpha} + \omega_x)\cos\beta +$$
$$+ (\omega_y \cos\alpha + \omega_z \sin\alpha)\sin\beta + \dot{\nu}_2]^2 +$$
$$+ C\{\dot{\varphi} + [(\omega_y \cos\alpha + + \omega_z \sin\alpha)\cos\beta - (\dot{\alpha} + \omega_x)\sin\beta]\cos\nu_2 +$$
$$+ (\dot{\beta} + \omega_z \cos\alpha - \omega_y \sin\alpha)\sin\nu_2\}^2 + A\{(\dot{\beta} + \omega_z \cos\alpha - \omega_y \sin\alpha)\cos\nu_2 -$$
$$- [(\omega_y \cos\alpha + \omega_z \sin\alpha)\cos\beta - (\dot{\alpha} + \omega_x)\sin\beta]\sin\nu_2\}^2$$

После стандартных преобразований по алгоритму Лагранжа [6,10] получим следующую систему дифференциальных уравнений:

$$[J_\alpha + (J_x + 2A)\cos^2\beta + J_y \sin^2\beta]\frac{d}{dt}(\dot\alpha + \dot\omega_x) +$$

$$+ 2(J_x + J_y + 2A)(\dot\alpha + \omega_x)\dot\beta \sin\beta\cos\beta -$$

$$- A\dot\nu_1(\dot\alpha + \omega_x)\sin\beta\cos\beta + (J_x - J_y + 2A)\sin\beta\cos\beta[\dot\beta(\omega_y\cos\alpha + \omega_z\sin\alpha)\cos 2\beta -$$

$$-(\dot\alpha + \omega_x)(\omega_z\cos\alpha - \omega_y\sin\alpha) + (\omega_z\cos\alpha - \omega_y\sin\alpha)\dot\alpha + \dot\omega_y\cos\alpha + \dot\omega_z\sin\alpha] +$$

$$+ A\dot\nu_1\cos 2\beta(\omega_y\cos\alpha + \omega_z\sin\alpha) + A\ddot\nu_2\cos\beta - A\dot\nu_2\dot\beta\sin\beta - A(\dot\beta + \omega_z\cos\alpha -$$

$$-\omega_y\sin\alpha)\dot\nu_2\sin\beta - [J_{ny} - J_{nz} + (J_x + 2A)\sin^2\beta + J_y\cos^2\beta](\omega_y\cos\alpha + \omega_z\sin\alpha)\times$$

$$\times(\omega_z\cos\alpha - \omega_y\sin\alpha) - (J_z + 2A)(\dot\beta + \omega_z\cos\alpha - \omega_y\sin\alpha)(\omega_y\cos\alpha + \omega_z\sin\alpha) -$$

$$-2H\cos\beta(\dot\beta + \omega_z\cos\alpha - \omega_y\sin\alpha) - H\dot\upsilon_1\cos\beta - A\dot\nu_1(\omega_y\cos\alpha + \omega_z\sin\alpha) -$$

$$- A\dot\nu_2(\omega_z\cos\alpha - \omega_y\sin\alpha) = M_x;$$

$$A\frac{d}{dt}(\dot\nu_1 + \dot\beta + \omega_z\cos\alpha - \omega_y\sin\alpha) - A[(\dot\alpha + \omega_x)\cos\beta +$$

$$+ (\omega_y\cos\alpha + \omega_z\sin\alpha)\sin\beta]\times$$

$$\times[(\omega_y\cos\alpha + \omega_z\sin\alpha)\cos\beta - (\dot\alpha + \omega_x)\sin\beta] + H[(\dot\alpha + \omega_x)\cos\beta +$$

$$+ (\omega_y\cos\alpha + + \omega_z\sin\alpha)\sin\beta = M_1; \qquad (2)$$

$$(J_z + 2A)\frac{d}{dt}(\dot\beta + \omega_z\cos\alpha - \omega_y\sin\alpha) +$$

$$+ A\ddot\upsilon_1 - (J_x - J_y + 2A)[(\dot\alpha + \omega_x)\cos\beta +$$

$$+ (\omega_y\cos\alpha + \omega_z\sin\alpha)\sin\beta][(\omega_y\cos\alpha + \omega_z\sin\alpha)\cos\beta - (\dot\alpha + \omega_x)\sin\beta] -$$

$$- A\dot\nu_2[(\omega_y\cos\alpha + \omega_z\sin\alpha)\cos\beta - (\dot\alpha + \omega_x)\sin\beta] +$$

$$+ A(\dot\beta + \omega_z\cos\alpha - \omega_y\sin\alpha)\times\times(\omega_y\cos\alpha + \omega_z\sin\alpha) + H\dot\upsilon_2 +$$

$$+ 2H[(\dot\alpha + \omega_x)\cos\beta + (\omega_y\cos\alpha + + \omega_z\sin\alpha)\sin\beta] = M_z$$

$$A\frac{d}{dt}[\dot\nu_2 + (\dot\alpha + \omega_x)\cos\beta + (\omega_y\cos\alpha + \omega_z\sin\alpha)\sin\beta] +$$

$$+ A(\dot\beta + \omega_z\cos\alpha - \omega_y\sin\alpha)\times$$

$$\times[(\omega_y\cos\alpha + \omega_z\sin\alpha)\cos\beta - (\dot\alpha + \omega_x)\sin\beta] -$$

$$- H(\dot\beta + \omega_z\cos\alpha - \omega_y\sin\alpha) = M_2.$$

При выводе уравнений (2) учтено стандартное допущение о том, что собственная угловая скорость ГП на несколько порядков превышает значения всех остальных угловых скоростей ГС и углы отклонения ГП малы [1, 7, 9].

В системе уравнений (2) обозначено:

M_x, M_z – моменты внешних сил по осям стабилизации ГС ox и oz_0;

M_1 и M_2 – моменты внешних сил по осям прецессии oz_0 и ox_0.

Указанные моменты можно представить в виде суммы двух слагаемых:

$$M_x = M_{xB} + M_{xC};\ M_z = M_{zB} + M_{zC};$$
$$M_1 = M_{1B} + M_{1Y};\ M_2 = M_2B + M_{2Y}.$$

Здесь слагаемые с индексом «В» определяют внешние моменты по осям стабилизации и прецессии, а с индексом «С» и «У» – соответственно моменты стабилизации и управления: моменты стабилизации определяются значениями углов поворота гироскопов относительно осей прецессии, а моменты управления от углов, характеризующих динамическую погрешность ГС (но не от значений карданных углов).

Для линеаризации полученной системы уравнений необходимо знать зависимость карданных углов и кинематических параметров ГС от углов, определяющих пространственное положение ВМО и погрешностей выдачи ГС опорной системы координат. Такие зависимости получены в работе [3,4] в виде

$$-\sin\beta = \varepsilon\cos\vartheta\sin\psi_k - \delta\cos\vartheta\cos\psi_k + \sin\vartheta$$
$$\cos\alpha\cos\beta = \varepsilon(\sin\gamma\cos\psi_k - \sin\vartheta\cos\gamma\sin\psi_k) + \delta(\sin\psi_k\sin\gamma +$$
$$+\sin\vartheta\cos\gamma\cos\psi_k) + \cos\vartheta\cos\gamma$$
$$\sin\alpha\cos\beta = \varepsilon(\cos\gamma\cos\psi_k + \sin\vartheta\sin\gamma\sin\psi_{kk}) - \delta(\sin\psi_k\cos\gamma -$$
$$-\sin\vartheta\sin\gamma\cos\psi_k) - \cos\vartheta\sin\gamma. \qquad (3)$$

Здесь углы ε и δ определяют динамическую погрешность ГС соответственно по осям стабилизации ox и oz_0 .и являются малыми.

Угловые скорости $\dot{\alpha}$ и $\dot{\beta}$ могут быть определены путем дифференцирования зависимостей (3) или на основании положения теоретической механики о том, что абсолютная скорость тела равна сумме его скоростей в переносном и относительном движении. Тогда согласно рисунку

$$(\dot{\varepsilon}\cos\psi - \dot{\delta}\sin\psi)\cos\vartheta = \dot{\alpha} + \dot{\gamma} + \dot{\psi}\sin\vartheta;$$
$$(\dot{\varepsilon}\sin\psi + \dot{\delta}\cos\psi)\cos(\alpha+\gamma) = \dot{\beta} + \dot{\vartheta}\cos(\alpha+\gamma) - \dot{\psi}\sin(\alpha+\gamma).$$

Отсюда с учетом формул (3) получим

$$\dot{\alpha} = (\dot{\varepsilon}\cos\psi - \dot{\delta}\sin\psi)\cos\vartheta - \dot{\gamma} - \dot{\psi}\sin\vartheta;$$
$$\dot{\beta} = \dot{\varepsilon}\sin\psi + \dot{\delta}\cos\psi - \dot{\vartheta} - \dot{\psi}\frac{\cos\vartheta}{\cos\beta}(\varepsilon\cos\psi - \delta\sin\psi). \qquad (4)$$

Используя формулы (3) и (4), систему нелинейных уравнений (2) после достаточно громоздких преобразований можно представить в следующем линейном варианте

$$[J_\alpha + (J_x + 2A)\cos^2\vartheta + J_y \sin^2\vartheta]\cos\vartheta(\ddot{\varepsilon}\cos\psi - \ddot{\delta}\sin\psi) - (J_x + 2A - J_y)\times$$

$$\times[\ddot{\psi}\sin^2\vartheta\cos\vartheta(\varepsilon\sin\psi + \delta\cos\psi) + \dot{\psi}^2\sin^2\vartheta\cos\vartheta(\varepsilon\cos\psi - \delta\sin\psi)] -$$

$$-2H\cos\vartheta(\dot{\varepsilon}\sin\psi + \dot{\delta}\cos\psi) - -H\dot{\upsilon}_1\cos\vartheta + A\ddot{\nu}_2\cos\vartheta = M_x;$$

$$A(\ddot{\upsilon}_1 + \ddot{\varepsilon}\sin\psi + \ddot{\delta}\cos\psi) + H(\dot{\varepsilon}\cos\psi - \dot{\delta}\sin\psi)\cos^2\vartheta -$$

$$-(3M_1 tg\vartheta + H\dot{\psi}\sin^2\vartheta)(\varepsilon\sin\psi + \delta\cos\psi) = M_1.$$

$$A\dot{\upsilon}_1 + (J_z + 2A)(\ddot{\varepsilon}\sin\psi + \ddot{\delta}\cos\psi) + H\dot{\upsilon}_2 + 2H(\dot{\varepsilon}\cos\psi - \dot{\delta}\sin\psi)\cos^2\vartheta -$$

$$-(3M_z tg\vartheta + H\dot{\psi}\sin^2\vartheta)(\varepsilon\sin\psi + \delta\cos\psi) = M_z;$$

$$A[(\ddot{\upsilon}_2 + \ddot{\varepsilon}\cos\psi - \ddot{\delta}\sin\psi)\cos\vartheta + \ddot{\psi}(\varepsilon\sin\psi + \delta\cos\psi)] - \qquad (5)$$

$$-H[\dot{\varepsilon}\cos\vartheta\sin\psi + \dot{\delta}\cos\vartheta\cos\psi - \dot{\psi}(\cos\psi\varepsilon - \sin\psi\delta)\cos\vartheta +$$

$$+\dot{\vartheta}(\sin\psi\varepsilon + \cos\psi\delta)\sin\vartheta = -A\ddot{\psi}\sin\vartheta\cos\vartheta - -H\dot{\psi}\sin\gamma\cos\gamma + M_2\cos\vartheta.$$

Итак, математическая модель двухосного силового ГС, размещенного на ВМО, пространственное положение которого характеризуется конечными углами поворота, представляет собой взаимосвязанную систему четырех линейных уравнений с переменными коэффициентами.

В индикаторных ГС гироскопы используются как измерители положения или угловой скорости ГСП и их параметры практически не влияют на значение кинетической энергии ГС. Используя с учетом этого выше приведенное выражение для кинетической энергии, можно получить тем же методом Лагранжа дифференциальные уравнения такого ГС в следующем виде

$$[J_\alpha + J_x\cos^2\beta + J_y\sin^2\beta]\frac{d}{dt}(\dot{\alpha} + \dot{\omega}_x) + 2(J_x + J_y)(\dot{\alpha} + \omega_x)\dot{\beta}\sin\beta\cos\beta +$$

$$+(J_x - J_y)\sin\beta\cos\beta[\dot{\beta}(\omega_y\cos\alpha + \omega_z\sin\alpha)\cos 2\beta - (\dot{\alpha} + \omega_x)(\omega_z\cos\alpha -$$

$$-\omega_y\sin\alpha) + (\omega_z\cos\alpha - -\omega_y\sin\alpha)\dot{\alpha} + \dot{\omega}_y\cos\alpha + \dot{\omega}_z\sin\alpha] -$$

$$-[J_{ну} - J_{нz} + J_x)\sin^2\beta + + J_y\cos^2\beta](\omega_y\cos\alpha + \omega_z\sin\alpha)(\omega_z\cos\alpha - \omega_y\sin\alpha) +$$

$$+J_z(\dot{\beta} + \omega_z\cos\alpha - \omega_y\sin\alpha)\times(\omega_y\cos\alpha + \omega_z\sin\alpha) = M_x;$$

$$J_z\frac{d}{dt}(\dot{\beta} + \omega_z\cos\alpha - \omega_y\sin\alpha) - (J_x - J_y[(\dot{\alpha} + \omega_x)\cos\beta +$$

$$+(\omega_y\cos\alpha + \omega_z\sin\alpha)\sin\beta]\times$$

$$\times[(\omega_y\cos\alpha + \omega_z\sin\alpha)\cos\beta - (\dot{\alpha} + \omega_x)\sin\beta] = M_z.$$

Здесь приняты прежние обозначения параметров ГС и его угловых скоростей.

Для линеаризации полученной системы уравнений также используем формулы (3) и (4). После преобразований математическая модель индикаторного ГС будет иметь следующий вид:

$$[J_\alpha + (J_x + 2A)\cos^2\vartheta + J_y \sin^2\vartheta]\cos\vartheta(\ddot{\varepsilon}\cos\psi - \ddot{\delta}\sin\psi) -$$

$$-(J_x - J_y)\sin^2\vartheta\cos\vartheta\times[\ddot{\psi}(\varepsilon\sin\psi + \delta\cos\psi) + \dot{\psi}^2(\varepsilon\cos\psi - \delta\sin\psi)] -$$

$$-J_x\dot{\psi}\cos\vartheta(\dot{\varepsilon}\sin\psi + \dot{\delta}\cos\psi) = M_x; \qquad (6)$$

$$J_z[\ddot{\varepsilon}\sin\psi + \ddot{\delta}\cos\psi + \dot{\psi}(\dot{\varepsilon}\cos\psi - \dot{\delta}\sin\psi)]\cos^2\vartheta -$$

$$-3M_z tg\vartheta(\varepsilon\sin\psi + \delta\cos\psi) = M_z.$$

В заключении следует отметить, что при введении в математические модели (5) или (6) внешних моментов их выражения следует представлять в соответствии с зависимостями (3) и (4). Например, демпфирующие моменты по осям стабилизации можно записать как

$$M_{x\ddot{a}} = -\mu_x\dot{\alpha} = -(\dot{\varepsilon}\cos\psi - \dot{\delta}\sin\psi)\cos\vartheta - \dot{\gamma} - \dot{\psi}\sin\vartheta$$

$$M_{z\ddot{a}} = -\mu_z\dot{\beta} = \dot{\varepsilon}\sin\psi + \dot{\delta}\cos\psi - \dot{\vartheta} - \dot{\psi}\frac{\cos\vartheta}{\cos\beta}(\varepsilon\cos\psi - \delta\sin\psi)$$

в случае, если они зависят от относительных угловых скоростей ГС.

Список литературы.

1. Павлов В.А. Теория гироскопа и гироскопических приборов: учебное пособие для приборостроительных вузов. Л.: Судостроение, 1964. 495 с.

2. Козлова Е.С. Выходные сигналы указателей вертикали // Известия Тульского государственного университета. Серия: Проблемы специального машиностроения. Вып.4. Ч. 2. Тула: Изд-во ТулГУ, 2001. С.166-169.

3. Козлова Е.С. Выходные сигналы гиропривода координатора цели Математические методы в технике и технологиях - ММТТ-27 [текст]: сб.трудов XXVII Междунар.науч.конф.: в 12 т. Т4. Секции10,11 / под общ. ред. А.А.Большакова. Тамбов: Тамбовск. гос. техн. ун-т, 2014. С. 181-184.

4. Козлова Е.С., Рогов С.В. О погрешности выходных сигналов датчика крена и дифферента при качке судна. Системы управления электротехническими объектами. Вып.7. Сб.научных трудов седьмой Всероссийской научно-практической конференции. Тула: Изд-во ТулГУ, 2015. 190 с.

5. Козлова Е.С., Власенков В.М., Рогов С.В. Аналитическая механика и теория колебаний. Часть 1. Механика Лагранжа - Гамильтона: учеб. пособие. Тула: Изд-во ТулГУ, 2013.

6. Козлова Е.С. Электромагнитный момент гироприводa измерительного прибора. Системы управления электротехническими объектами. Вып.7. Сб.научных трудов седьмой Всероссийской научно-практической конференции. Тула: Изд-во ТулГУ, 2015. 190 с.

7. Козлова Е.С. Математическая модель волчка Лагранжа при контакте с поверхностью. Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-28 [текст]: сб. трудов XXVIII Междунар. науч. конф.: в 12 т. Т.7. / под общ. ред. А.А. Большакова. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2015; Ярославль: Ярослав.гос. техн. ун-т; Рязань: Рязанск. гос. радиотехн. ун-т, 2015.

8. Козлова Е.С., Соловьев А.Э. Гироскопические приводы на базе трехстепенных электрических машин (функционирование в условиях подвижного основания). Системы ВТО. Создание, применение и перспективы. Научно-технический журнал. Учредитель и издатель АО «КБП». 4(8), 2015.

9. Козлова Е.С., Соловьев А.Э. Гироскопические приводы на базе трехстепенных электрических машин (функционирование в условиях неподвижного основания). Системы ВТО. Создание, применение и перспективы. Научно-технических журнал. Учредитель и издатель АО «КБП». 4(8), 2015.

10. Козлова Е.С., Соловьев А.Э., Сухинин Б.В., Сурков В.В. Гироскопические приводы на базе трехстепенных электрических машин: Монография. Тула: Изд-во ТулГУ, 2007.

Козлова Елена Сергеевна, канд. техн. наук, доц., Giroscopiya@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Рогов Сергей Васильевич, канд. техн. наук, доц., ievlevo39@ yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

GENERAL MATHEMATICAL MODEL OF BIAXIAL GYROSTABILIZER

E.S. Kozlova, S.V. Rogov

There were considered the system of linear differential equations of biaxial gyrostabilizer describing his movement when it mounted on highly maneuverable objects. The variables used in the equations of the angles which determine the dynamic error of such device.

Key words: end values of angles, coordinate system, highly maneuverable object, gyrostabilizer, the projection of the angular velocity, gyrostabilized platform.

Kozlova Elena Sergeevna, candidate of technical science, docent, Giroscopiya@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Rogov Sergey Vasilyevich, candidate of technical science, docent, ievlevo39@ yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 531.383

МЕТОД РАСШИРЕНИЯ ПОЛОСЫ ПРОПУСКАНИЯ В АКСЕЛЕРОМЕТРЕ КОМПЕНСАЦИОННОГО ТИПА

В.В. Кулешов

В работе рассматриваются вопросы проектирования широкополосного акселерометра компенсационного типа. Это достигается путем введения в акселерометр аналоговой и цифровой обратных связей и обеспечение условия инвариантности при выборе параметров. Предложена практическая схема реализации акселерометра компенсационного типа, которая может быть использована в системах стабилизации, навигации и наведения подвижных объектов.

Ключевые слова: структурный метод, обратные связи, автоколебания топологический синтез, полоса пропускания, частота среза, сдвигатель, стеки, двоичный сумматор

Существующие акселерометры, применяемые в системах стабилизации, навигации и наведения, как правило, содержат жесткую отрицательную обратную связь [1 - 3]. Недостатком подобных акселерометров является низкая точность измерения, так как выбор коэффициента усиления в жесткой отрицательной обратной связи ограничен условием устойчивости системы. Наличие аналогового канала обработки информации приводит к низкой точности измерения, так как не производится запоминание информации за время её преобразования и осреднения в процессе накопления . Кроме того, точность измерения зависит от параметров схемы электронного ключа, осуществляющего выборку информации и основная погрешность акселерометра связана с конечностью времени заряда конденсатора интегрирующего усилителя . Эта погрешность приводит к апертурной ошибке , свойственной подобной схеме выборки и обработки информации [4, 5].

Целью данной работы является разработка метода по расширению полосы пропускания акселерометра компенсационного типа. Поставленная цель достигается путем введения а акселерометр двух отрицательных связей, причем одна аналоговая, а другая цифровая.

Реализацию метода расширения полосы пропускания в аналоговой модели акселерометра компенсационного типа можно пояснить с помощью передаточных функций (рис. 1).

Если ввести, а аналоговую отрицательную обратную связь, акселерометра компенсационного типа, сопряжённый фильтр верхних частот с передаточной функцией

$$W_1(s) = \frac{W(s)}{1+W(s)} ,$$

а в цифровую, отрицательную обратную связь, сопряжённый фильтр с передаточной функцией

$$W_2(s) = \frac{1}{1+W(s)},$$

то это позволяет создать инвариантное устройство для измерения ускорений с единичной обратной связью

$$-(W_1(s)+W_2(s)) = -(\frac{W(s)}{1+W(s)} + \frac{1}{1+W(s)}) = -1$$

и независимое от постоянной времени сглаживающего фильтра в цепи цифрового отсчёта (где $W(s)$ – передаточная функция прямой цепи акселерометра компенсационного типа, включая чувствительный элемент акселерометра и усилитель) [5].

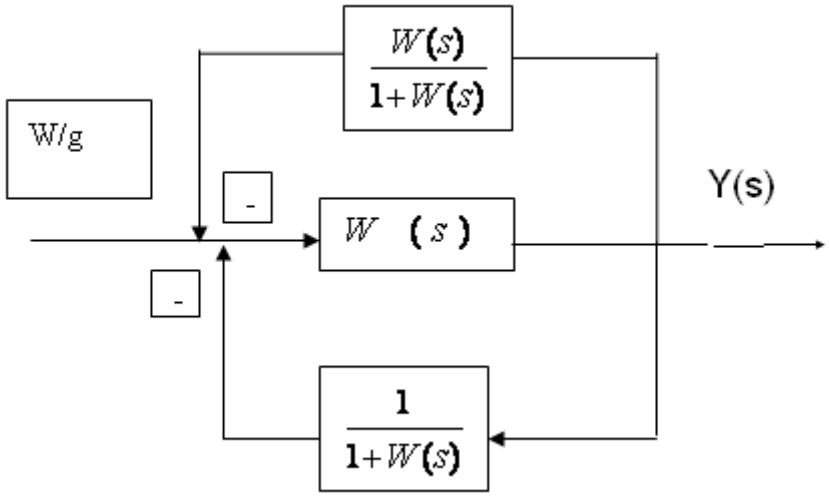


Рис. 1. Структурная схема аналоговой модели акселерометра компенсационного типа

Проанализируем динамику акселерометра компенсационного типа, содержащего лишь только жесткую отрицательную обратную связь. Передаточная функция разомкнутой системы акселерометра с жесткой отрицательной обратной связью можно записать в виде [4]

$$W(s) = \frac{T_1 \cdot s + 1}{(T_2 \cdot s + 1)(T_3 \cdot s + 1)(T_4 \cdot s + 1)}, \quad (1)$$

где T_1, T_2, T_3, T_4 - обобщённые параметры акселерометра компенсационного типа. На высоких частотах звенья, входящие в структуру акселерометра, $(T_1 \cdot s + 1)$ и $\frac{1}{1+T_4 \cdot s}$ компенсируют друг друга, при этом зависимость (1) принимает вид

$$W_r(s) = \frac{1}{(T_2 \cdot s+1)\cdot(T_3 \cdot s+1)}. \quad (2)$$

Из анализа выражения (2) следует, что акселерометр с жесткой отрицательной обратной связью имеет ограниченную полосу пропускания и коэффициент передачи по разомкнутому контуру.

Если реализовать включение обмоток датчика моментов акселерометра по мостовой схеме, то это приведет к тому, что зависимость (2) принимает вид [5]

$$W_r(s) = \frac{1+T_0 \cdot s}{(T_2 \cdot s+1)(T_3 \cdot s+1)}. \quad (3)$$

Если обеспечить равенство параметров $T_0 = T_3$ (T_0 – постоянная времени датчика момента), то зависимость (3) может записана как:

$$W_r(s) = \frac{1}{(T_2 \cdot s+1)}. \quad (4)$$

Из анализа (4) следует, что включение обмоток датчика моментов по мостовой схеме позволяет создать акселерометр компенсационного типа, устойчивый при любом коэффициенте передачи по разомкнутому контуру.

Практическая схема реализации метода по расширению полосы пропускания представлена на рис. 2.

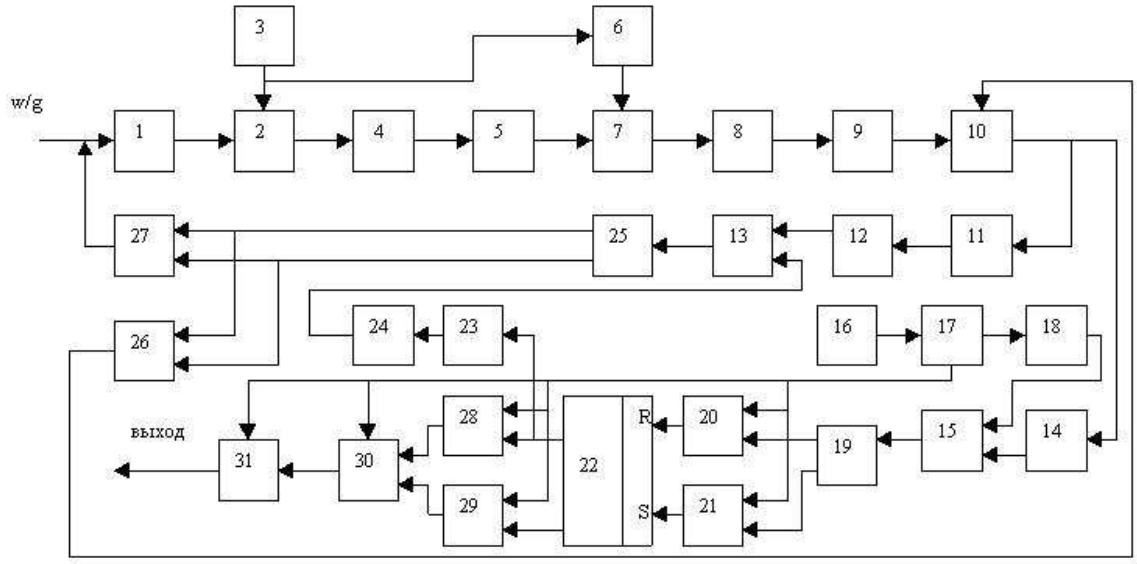


Рис. 2. Схема реализации метода по расширению полосы пропускания

Расширение полосы пропускания достигается тем, что в акселерометр введены два параллельных входных канала с датчика угла 2 и с мостовой схемы 25 и две параллельные отрицательные обратные связи. Одна,

аналоговая, с выхода усилителя 4 на один из входов датчика моментов 27 через последовательно включённые: первый логический элемент 5, схему исключающее "ИЛИ" 7, первый прецизионный релейный элемент 8, сглаживающий фильтр 9, первый суммирующий элемент 10, сопряжённый фильтр верхних частот 11, первый преобразователь напряжения – ток 12, второй суммирующий элемент 13. Выход второго суммирующего элемента 13 соединен с одной из диагоналей мостовой схемы 25. Другая диагональ мостовой схемы 25, в плечо которой введена обмотка датчика моментов 27, соединена с одним из входов первого суммирующего элемента 10 через дифференциальный операционный усилитель 26. Цифровая обратная связь введена с выхода усилителя 4 на другой вход датчика моментов 27 через последовательно включённые: первый логический элемент 5, схему исключающее "ИЛИ" 7, первый прецизионный релейный элемент 8, сглаживающий фильтр 9, первый суммирующий элемент 10, сопряжённый фильтр низких частот 14, третий суммирующий элемент 15, релейный элемент 19, ждущие синхронные генераторы 20,21 и RS-триггер 22 . Один из выходов RS-триггера 22 соединен со вторым прецизионным релейным элементом 23, второй преобразователь напряжение – ток 24, второй суммирующий элемент 13, мостовую схему 25. Другой выход RS-триггера 22 соединен с входом итогового регистра 31 через схемы совпадения ("И")28,29 и реверсивный двоичный счётчик 30. Причем, один из входов третьего суммирующего элемента 15 соединен с генератором стабильной частоты 16 через схему синхронизации 17 и генератор пилообразного напряжения 18. Вторые входы ждущих синхронных генераторов, схем совпадения "И", итогового регистра соединены с одним из выходов схемы синхронизации. Акселерометр содержит генератор опорного напряжения 3, один из выходов которого соединен с входом датчика угла, а другой – с входом схемы "ИЛИ" через второй логический элемент 6. Выход с итогового регистра 31 является цифровым выходом широкополосного акселерометра [5].

На рис. 3 представлены результаты моделирования акселерометра с жесткой отрицательной обратной связью при коэффициентах усиления по разомкнутому контуру равному 10 (рис. 3 (3)), 100 (рис. 3 (2)) и 10000 (рис. 3 (1)). Результаты моделирования получены при значениях постоянных времени акселерометра

$$T_2 = 0.65 \text{ с.},$$

$$T_0 = 0.03 \text{ с.}$$

Из анализа результатов моделирования следует, что время переходного процесса акселерометра компенсационного типа с двумя параллельными обратными связями уменьшилось по сравнению с акселерометром с жесткой отрицательной обратной связью за счёт включения сопряжённых фильтров верхних и нижних частот, мостовой схемы включения датчика

моментов и дифференциального усилителя. При этом, в акселерометре с параллельными обратными связями, обеспечивается широкая полоса пропускания, значительный коэффициент передачи по разомкнутому контуру, определяющий точность цифрового отсчёта в установившемся режиме.

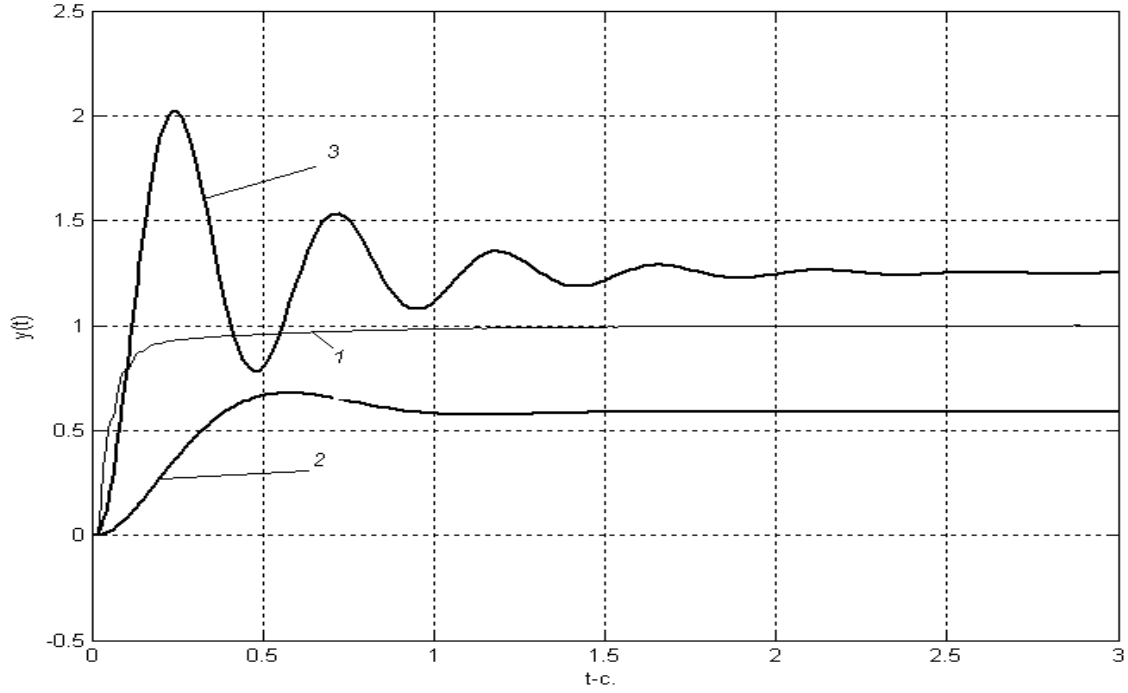


Рис. 3. Результаты моделирования:
1 **–** $K = 10000$***; 2*** **–** $K = 100$***; 3*** **–** $K = 10$;

Полученные результаты могут быть использованы при разработке элементов систем стабилизации, навигации и наведения подвижных объектов в которых имеются ограничения на такие параметры как: стоимость, вес и габариты. Применение недорогих акселерометров, выпускаемых промышленностью с реализацией по схеме [5], позволяет снять не только перечисленные ограничения, но и создать акселерометр с качественно иными динамическими характеристиками. Предложенный метод расширения полосы пропускания может найти применения в устройствах компенсационного типа для измерения параметров механических величин (например, в датчиках угловой скорости).

Список литературы

1. А.С. №742801 СССР. Акселерометр / А.Г. Бурик, Ю.Я. Никулин // Б.И., 1980, №23.

2. Низкочастотные линейные компенсационные акселерометры / В.В. Метальников, А.Н. Любезнов, В.Н. Колганов [и др.] // Приборы и системы управления, 1990. №10. С. 21 - 22.

3. Бурик А.Г. Структурный метод повышения точности маятникового компенсационного акселерометра // Известия вузов. Приборостроение, 1981. №3. С. 61 - 64.

4. Скалон А.И. О статической погрешности компенсационного акселерометра с импульсной обратной связью // Известия вузов. Приборостроение, 1981. N 12. С. 41 - 45.

5. Патент 2171995 РФ. Устройство для измерения ускорений / А.Н. Кутуров, В.В. Кулешов, 2002.

Кулешов Владимир Вениаминович, канд. техн. наук, доц., v47kuleshov@gmail.com, Россия, Тула, Тульский государственный университет

METHOD RASSSYIRENIGA BANDWIDTH OF THE ACCELEROMETER COMPENSATION TYPE

V.V. Kuleshov

In this paper the device operating in the self-oscillating mode, in which the transformation of time intervals in the relative numerical code proportional inputs. Acceleration in the relative numerical code to improve the accuracy as the relative value of time intervals is independent of the dynamic properties of the device.

Key words: electronic key, aperture error, time interval, the transfer function, self-oscillation mode, the relative numerical code.

Kuleshov Vladimir Veniaminovich, candidate of tehnicale sciences, docent, v47kuleshov@gmail.com, Russia, Tula, Tula State University

УДК 623.4

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАЩИТНОГО ЭЛЕМЕНТА БРОНЕШЛЕМА НА ОСНОВЕ КОМПОЗИТА С ДОБАВКОЙ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК

С.Н. Курков, О.А. Голованов, А.В. Серов

Предложена методика определения характеристик защитного элемента бронешлема на основе композита с добавкой углеродных нанотрубок, включающая алгоритм вычисления эффективной коэффициента затухания волновой энергии в композитах на основе полимера и углеродных нанотрубок. Доказана возможность получения полимерных композитов с добавкой углеродных нанотрубок, которые имеют по сравнению с существующими материалами, более высокие показатели поглощения волновой энергии, возникающей при соударении с СИБ поражающих элементов, образующихся при взрыве боеприпасов или воздействия избыточного давления во фронте воздушной ударной волны, сопровождающей взрыв.

Ключевые слова: средства индивидуальной бронезащиты, углеродные нанотрубки, динамическая вязкость полимера.

В настоящее время ведутся интенсивные исследования по получению защитных материалов в средствах индивидуальной бронезащиты (СИБ) человека, имеющих более высокие показатели поглощения волновой энергии, возникающей при соударении с СИБ поражающих элементов, образующихся при взрыве боеприпасов или воздействия избыточного давления во фронте воздушной ударной волны, сопровождающей взрыв.

Одним из перспективных направлений указанных исследований является получение полимерных композитов с добавкой углеродных нанотрубок

С развитием науки и техники к полимерным материалам предъявляются все более высокие требования, которым индивидуальные полимеры уже не удовлетворяют. Существенно улучшить эксплуатационные свойства полимеров позволяет создание на их основе полимерных композиционных материалов. Одним из перспективных направлений исследований в области композиционных материалов является создание полимерных

композитов на основе углеродных нанотрубок. С момента открытия углеродных нанотрубок Инжимой в 1991 году количество исследований в данной области постоянно увеличивается. Уникальная структура углеродных нанотрубок обеспечивает им рекордные значения прочности, модуля Юнга при малом удельном весе, а также электропроводность в осевом направлении. Такие свойства углеродных нанотрубок с учетом того, что их диаметр составляет всего несколько нанометров, а длина – от единиц до сотен микрон, обуславливают возможность создания композиционных материалов с высокими значениями прочности, модуля Юнга, коэффициента поглощения акустических волн, электропроводности, расширенным интервалом рабочих температур и некоторыми специальными свойствами, в частности радиопоглощающими.

Создание таких материалов является сложной задачей, что связано с рядом проблем, возникающих при введении нанотрубок в полимерную матрицу. Для достижения максимальной эффективности от использования углеродных нанотрубок, как правило, необходимо их равномерное распределение в объеме полимера, а также высокая адгезия полимерной матрицы к поверхности нанотрубок. Однако вследствие большой удельной поверхности (до 1000 м/г) углеродные нанотрубки склонны к образованию агломератов, т.е. к неравномерному распределению в полимере, а графеновая поверхность нанотрубки может образовывать лишь слабые Ван-дер-Ваальсовые связи с полимерной матрицей, поэтому высокая адгезия полимера к углеродным нанотрубкам, как правило, не характерна.

Наиболее перспективным путем для решения указанных выше проблем является функционализация углеродных нанотрубок – химические превращения, ведущие к образованию активных функциональных групп на поверхности нанотрубок. Функциональные группы на поверхности углеродных нанотрубок способны образовывать ковалентные связи с макромолекулами, что обеспечивает их равномерное распределение в объеме полимера и высокую адгезию последнего к нанотрубкам.

Алгоритм вычисления эффективного коэффициента затухания волновой энергии в композитах на основе полимера и углеродных нанотрубок. Алгоритм вычисления эффективного коэффициента затухания акустических волн в композитах заливок на основе полимера и углеродных нанотрубок строим на следующих научных положениях:

1. Полимер рассматриваем как вязкую среду с динамической вязкостью;

2. Углеродную нанотрубку рассматриваем как твердотельный цилиндр, на поверхности которого нормальная и касательная составляющие скорости равны нулю.

3. Движение вязкой жидкости описывается с помощью уравнений Навье-Стокса (объемные силы $\vec{F} = 0$) [2]:

$$\rho_0 \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = -gradp + \mu \Delta \vec{v} + \frac{1}{3}\mu graddiv\vec{v}, \qquad (1)$$

где μ – динамическая вязкость; ρ_0 – плотность вязкой среды; $\vec{v}$ – скорость частиц среды; P – давление; Δ – оператор Лапласа.

Учитывая, $rotrot\vec{v} = graddiv\vec{v} - \Delta\vec{v}$ запишем (3.35) в виде:

$$\rho_0 \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = -gradp + \frac{4}{3}\mu graddiv\vec{v} - \mu rotrot\vec{v} \qquad (2)$$

Дополним (2) уравнением неразрывности в переменных Эйлера [1], в ведем векторную функцию $\vec{\varphi} = rot\vec{v}$ и запишем полную систему уравнений гидродинамики для вязкой среды:

$$\begin{cases} \dfrac{1}{c_l^2 \rho_0}\dfrac{\partial \rho}{\partial t} + div\vec{v} = 0, \\ \rho_0 \dfrac{\partial \vec{v}}{\partial t} = -gradp + \dfrac{4}{3}\mu graddiv\vec{v} - \mu rot\vec{\varphi} \\ \vec{\varphi} = rot\vec{v}, \end{cases} \qquad (3)$$

где c_l – скорость продольных акустических волн в вязкой среде.

Для гармонических колебаний система уравнений (3) имеет вид:

$$\begin{cases} div\vec{v} = -i\dfrac{\omega}{c^2\rho_0}p, \\ gradp = \vec{\psi}, \\ rot\varphi = i\dfrac{\omega\rho_0}{\mu}\vec{v} + \dfrac{q}{\mu}\vec{\psi} \\ rot\vec{v} = -\vec{\varphi}, \end{cases} \qquad (4)$$

где $\vec{\varphi}, \vec{\psi}$ – дополнительно введенные векторные функции, $q = 1 + i\dfrac{4\omega\mu}{3c_l^2\rho_0}$.

Расчетная схема вычисления эффективного коэффициента затухания акустических волн в композитах заливок на основе полимера и углеродных нанотрубок показана на рис. 1.

На основе метода автономных блоков [3-6] на базе уравнений (4) разработан алгоритм вычисления эффективного коэффициента затухания акустических волн в композитах на основе полимера и углеродных нанотрубок:

1. В трехмерной периодической структуре заливки выделяется ячейка (автономный блок) в виде прямоугольного параллелепипеда с углеродной нанотрубкой, на поверхности которой нормальные и касательные составляющие скорости равны нулю;

2. Для автономного блока определяется дескриптор в виде шестиканальной многомодовой матрицы импеданса;

3. Из решения характеристического уравнения, определяем комплексные постоянные распространения акустических волн $\Gamma_0 = \Gamma_0' + i\Gamma_0''$ в композите заливки на основе полимера и углеродных нанотрубок;

4. Определяем коэффициент затухания $k_3^{\Sigma} = 20\log\exp(-\Gamma''o) \approx -8{,}685\Gamma''o$ акустических волн для композите на основе полимера и углеродных нанотрубок.

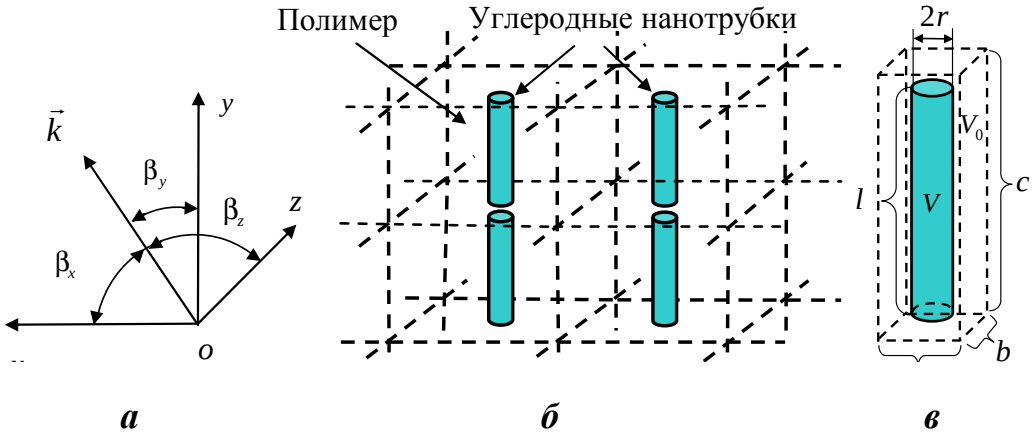


Рис. 1. Расчетная схема математической модели затухания акустических волн в композите на основе полимера и углеродных нанотрубок: а – направление распространения волнового процесса; б – периодическая 3D- наноструктура; в – автономный блок (ячейка периодической структуры); V_0 – область прямоугольного параллелепипеда; V – область углеродной нанотрубки

Запишем алгоритм вычисления коэффициента затухания акустических волн в композите обобщенно в виде функциональной зависимости:

$$k_3^{\Sigma} = F_{к.затух}\,(c_l, \rho_{пол}, \mu, a, b, c, l, r, \beta_x, \beta_y, \beta_z, f), \qquad (5)$$

где c_l – скорость распространения продольных акустических волн в полимере; $\rho_{пол} = \rho_0$ – плотность полимера; μ – динамическая вязкость полимера; a, b, c – геометрические размеры ячейки периодической структуры; l – длина углеродной нанотрубки; $\beta_x, \beta_y, \beta_z$ – углы направления распространения акустической волны в композите заливки; f – частота.

Определение коэффициента затухания волновой энергии в композите на основе полимера и углеродных нанотрубок. Расчет проведем для композита на основе полимера суспензионный поливинилхлорид ПВХ-С марки 7059, ГОСТ 14337-73, ($\rho_{пол} = 1100$кг/м^3, $E_{пол} = 14$МПа, $\mu_{пол} = 0{,}193\,Нс/м^2$) и углеродных многослойных нанотрубок «Таунит-М» чистотой > 98% ($\rho_{унт} = 2300$ кг/м^3, $E_{унт} = 1280$ Мпа, $r = 72$ нм, $l = 5000$ нм). Ячейка периодической структуры композита: $a = b, c = = 5144$ нм, процентное соотношение массовых долей углеродных нанотрубок к полимеру $\eta = \dfrac{\pi r^2 l \rho_{унт}}{abc\rho_{пол} - \pi r^2 l \rho_{унт}} 100\%$. Скорость распространения продольных акустические волн для полимера «Виксинт ПК-68» равна $c_l = \sqrt{E_{пол} / \rho_{пол}} = 112{,}8$ м/с[1].

Расчет проводится на основе положения полимера - суспензионный поливинилхлорид ПВХ-С марки 7059, ГОСТ 14337-73, среда, обладающая сдвиговой вязкостью. Волны в вязкой бесконечной среде в направлении распространения z затухают по экспоненциальному закону $\exp(-\Gamma_0'' z)$, где Γ_0'' – мнимая часть комплексной постоянной распространения акустических волн в полимере $\Gamma_0 = \Gamma_0' + i\Gamma_0''$. Коэффициент затухания акустических волн в вязкой среде полимера определяется согласно [11]:

$$k_З = 20 \log \exp(-\Gamma_o'') \approx -8{,}685\Gamma_o'' = -8{,}685 \frac{(2\pi f)^2 \mu_{пол}}{2\rho_{пол} c_l^3} \frac{4}{3}. \qquad (6)$$

Коэффициент затухания $k_З$ имеет размерность в системе СИ [дБ/м].

Вычислим динамическую вязкость полимера, используя выражение (6) и экспериментальные данные о коэффициенте затухания акустических волн в полимере суспензионного поливинилхлорида ПВХ-С марки 7059, ГОСТ 14337-73 [7]. На рис. 2 показаны результаты расчетов по формуле (6) и экспериментальные результаты.

На рис. 3 показана зависимость коэффициента затухания волн в композите от частоты при различных процентных соотношениях массовых долей углеродных нанотрубок к полимеру. С увеличением процентного соотношения массовых долей углеродных трубок к полимеру коэффициент затухания акустических волн увеличивается, т.к. суммарная поверхность углеродных нанотрубок возрастает.

Углеродная нанотрубка обладает свойством симметрии в плоскости сечения, которая параллельна координатной плоскости xoz, следовательно, коэффициент затухания акустической волны в композите зависит только от одного из углов $\beta_x, \beta_y, \beta_z$, которые являются случайными величинами. Выбираем угол ориентации β_z, который является случайной величиной.

Случайная величина β_z угла ориентации распространения ударного ускорения на отрезке [0, 90^0] имеет равномерное распределение [8]

$$f(\tilde{\beta}_z) = \begin{cases} 0 при \tilde{\beta}_z < 0, \\ 1/90° при 0 \le \tilde{\beta}_z \le 90°, \\ 0 при \tilde{\beta}_z > 90°. \end{cases} \quad (7)$$

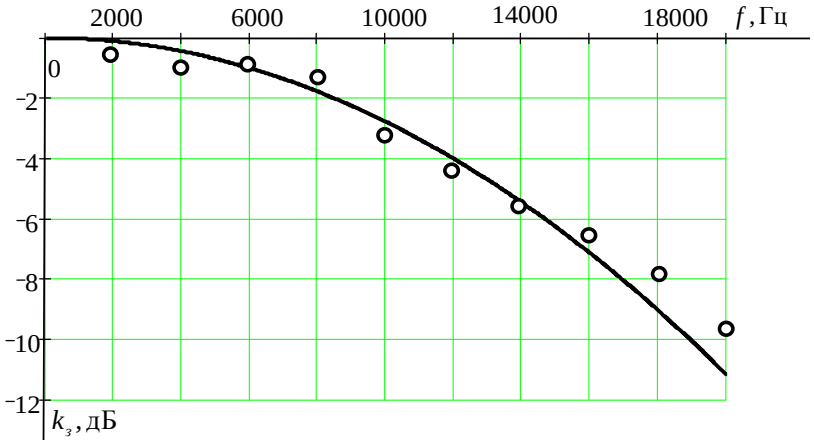


Рис. 2. Коэффициент затухания акустических волн в полимере: $\rho_{пол}$ = 1100кг/м^3; $\mu_{пол}$ = 0,193 Нс/м^2; c_l = 112,8 м/с – теория вязких сред; ○ – эксперимент

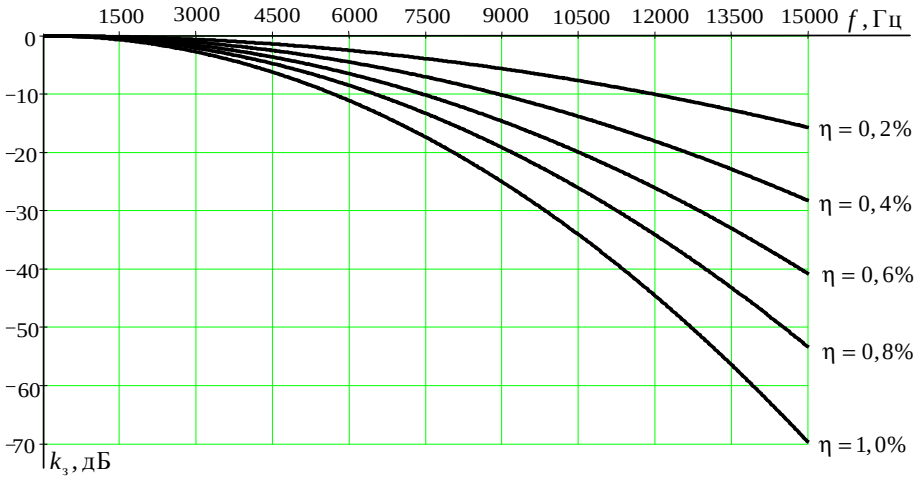


Рис. 3. Зависимость коэффициента затухания волн в композите от частоты при различных процентных соотношениях массовых долей УНТ к полимеру: $\rho_{пол}$ = 1100кг/м^3; $\mu_{пол}$ = 0,193 Нс/м^2; c_l = 112,8 м/с; $\beta_x = 0$, $\beta_y = 0$, $\beta_z = 90°$; полимер – суспензионный поливинилхлорид ПВХ-С марки 7059, ГОСТ 14337-73; УНТ марки – «Таунит-М» чистотой > 98%

Вероятностная модель для определения математического ожидания коэффициента затухания акустических волн в композите является имитационной. Используем генератор случайных чисел, распределенных равномерно на отрезке [0, 90^0], для имитации случайной величины $\tilde{\beta}_z$ (угол ориентации волнового процесса) Для того, чтобы определить реализации случайных функций, в вероятностной модели учитываем распределение случайной величины $\tilde{\beta}_z$, полученное из имитации.

Используя детерминированную модель (алгоритм вычисления коэффициента затухания акустической волны в композите (5)), определяем коэффициент затухания акустических волн в композите на основе полимера и углеродных нанотрубок. При помощи детерминированной модели (5) определяем реализации случайных функций $k_З(\tilde{\beta}_z)$, учитывая равномерное распределение случайной величины $\tilde{\beta}_z$, полученное из имитации (генератор случайных чисел, имеющих равномерный закон распределения). По реализациям случайных функций $k_З(\tilde{\beta}_z)$ определяем математические ожидания $k_{з.мо}$ случайной величины $k_з(\tilde{\beta}_z)$.

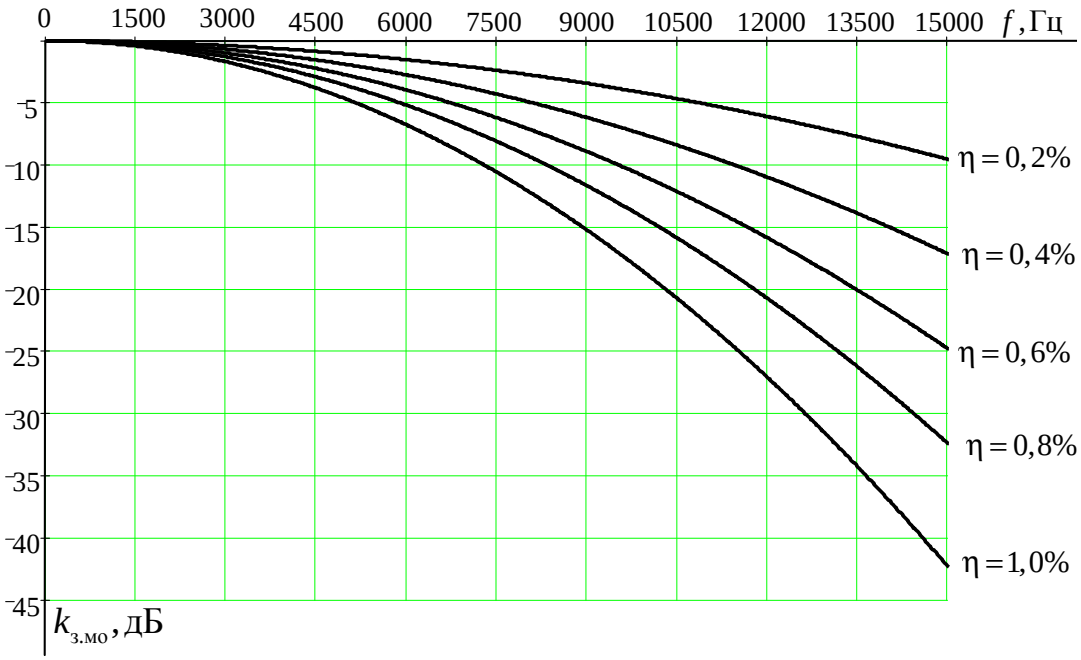


Рис. 4. Вероятностная модель расчета коэффициента затухания волн в композите при различных процентных соотношениях массовых долей УНТ к полимеру: $\rho_{пол} = 1100 кг/м^3$; $\mu_{пол} = 0{,}193\ Нс/м^2$; $c_l = 112{,}8\ м/с$; полимер – суспензионного поливинилхлорида ПВХ-С марки 7059; ГОСТ 14337-73; УНТ – «Таунит-М» чистотой > 98%

На рис. 4 показана зависимость математического ожидания коэффициента затухания акустических волн в композите от частоты при различных процентных соотношениях массовых долей углеродных нанотрубок к полимеру. Количество реализаций случайных функций бралось равным 100.

При хаотической ориентации углеродных нанотрубок к направлению ударного ускорения коэффициент затухания акустических волн в композите уменьшается примерно на 40...60 % по сравнению с ориентированным массивом углеродных нанотрубок по отношению к направлению распространения акустических волн при угле $\beta_z = 90°$.

Таким образом, доказана возможность получения полимерных композитов с добавкой углеродных нанотрубок, которые имеют по сравнению с существующими материалами, более высокие показатели поглощения волновой энергии, возникающей при соударении с СИБ поражающих элементов, образующихся при взрыве боеприпасов или воздействия избыточного давления во фронте воздушной ударной волны, сопровождающей взрыв.

Список литературы

1. Лепендин Л.Ф. Акустика. М.: Высшая школа. 1978. 448 с.

2. Бэтчелор Дж. Введение в динамику жидкости. М.: Мир. 1973. 757 с.

3. Голованов О.А. Автономные блоки с виртуальными каналами Флоке и их применение для решения прикладных задач электродинамики / О.А. Голованов // Радиотехника и электроника. Т. 51. №12 , 2006. С. 1423-1430.

4. Голованов О.А., Макеева Г.С. Математическое моделирование акустических устройств декомпозиционным методом автономных блоков с каналами Флоке // Известия вузов. Поволжский регион. Физико-математические науки, 2007. № 4. С. 35-43.

5. Голованов О.А., Макеева Г.С., Грачев А.И. Декомпозиционный подход к решению трехмерных краевых задач акустики на основе метода автономных блоков с каналами Флоке // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. Т. 11. №1, 2008. С. 57-63.

6. Голованов О.А., Макеева Г.С., Мазур А.М., Грачев А.И. Декомпозиционный подход к решению трехмерных краевых задач акустики на основе метода автономных блоков с каналами Флоке // Физика волновых процессов и радиотехнические системы, 2009. Т.12. № 1. С. 43-47.

7. Montazeri A. Viscoelastic and mechanical properties of multi walled carbon nanotube/epoxy composites with different nanotube content / A. Montazeri, N. Montazeri // Materials and Design. 2011. V. 32. P. 2301-2307.

8. Shen J. Thermo-physical properties of epoxy nanocomposites reinforced with amino-functionalized multi-walled carbon nanotubes / J. Shen, W. Huang, L. Wu et al. // Composites: Part A, 2007. V. 38. P. 1331-1336.

Курков Сергей Николаевич, д-р техн. наук, проф., doc.kurkov@mail.ru, Россия, Пенза, Пензенский артиллерийский инженерный институт, филиал Военной академии материально технического обеспечения Санкт-Петербург,

Голованов Олег Александрович, д-р физ.-мат. наук, проф., golovanovol@mail.ru, Россия, Пенза, Пензенский артиллерийский инженерный институт, филиал Военной академии материально технического обеспечения Санкт-Петербург,

Серов Андрей Валерьевич, адъюнкт, Andrey11811@rambler.ru, Россия, Пенза, Пензенский артиллерийский инженерный институт, филиал Военной академии материально технического обеспечения Санкт-Петербург

TECHNIQUE OF DEFINITION OF CHARACTERISTICS OF THE BRONESHLEM PROTECTIVE ELEMENT ON THE BASIS OF THE COMPOSITE WITH ADDITIVE OF CARBON NANOTUBES

S.N. Kurkov, O.A. Golovanov, A.V. Serov

The technique of determination of characteristics of a protective element of a broneshlem on the basis of a composite with additive of carbon nanotubes including an algorithm of calculation effective coefficient of attenuation of wave energy in composites on the basis of polymer and carbon nanotubes is offered. The possibility of receipt of polymeric composites with additive of carbon nanotubes which have in comparison with the existing materials, higher rates of absorption of the wave energy arising in case of impact with SIB of the striking elements which are formed in case of explosion of ammunition or impacts of excessive pressure in the front of the air shock wave accompanying explosion is proved.

Key words: means of an individual armored protection, carbon nanotubes, dynamic viscosity of polymer.

Kurkov Sergey Nikolaevich, doctor of technical sciences, professor, doc.kurkov@mail.ru, Russia, Penza, Penza artillery engineering institute, branch of Military academy of financially technical providing St. Petersburg,

Golovanov Oleg Aleksandrovich, doctor of physical and mathematical sciences, professor, golovanovol@mail.ru, Russia, Penza, Penza artillery engineering institute, branch of Military academy of financially technical providing St. Petersburg,

Serov Andrey Valeryevich, graduated in a military academy, Andrey11811@rambler.ru, Russia, Penza, Penza artillery engineering institute, branch of Military academy of financially technical providing St. Petersburg

УДК 623.624.9

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЯ S-ПАРАМЕТРОВ СРЕДСТВ СНИЖЕНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ЗАМЕТНОСТИ ОБРАЗЦОВ ВООРУЖЕНИЯ И ВОЕННОЙ ТЕХНИКИ

А.В. Полянсков, М.С. Спирин, Ю.М. Зайцев

Рассмотрена методика измерения S-параметров средств снижения радиолокационной заметности образцов вооружения и военной техники. В основу методики положено использование измерительного комплекса, базирующегося на применении современного преобразующего, измерительного и вычислительного оборудования.

Ключевые слова: коэффициент отражения, радиолокационная заметность, измерительный комплекс, анализатор спектра и сигналов.

Решение практически всех задач при ведении вооружённой борьбы, как на земле, так и на море, зависит от наличия достоверной информации о местоположении и составе войск противника, а также его техническом потенциале. Опыт ведения боевых действий ВС РФ в САР свидетельствует о высоком информационном обеспечении террористических группировок за счёт получения данных технических разведок Израиля, Турции, США, Великобритании.

Приоритетным видом разведки при организации боевых действий в САР выступает космическая радиолокационная разведка благодаря ряду принципиальных преимуществ [1, 2, 3, 4].

Повышение информационных возможностей радиолокационных средств разведки и важности, решаемых ими задач в сфере разведки и вооружённой борьбы неизбежно провоцирует ответные меры, направленные на затруднение получения радиолокационной информации о целях.

В связи с этим, в ведущих зарубежных государствах и в нашей стране особую значимость и актуальность приобрели вопросы снижения радиолокационной заметности образцов вооружения и военной техники. Данное направление совершенствования военной техники неразрывно связано с изменением самих принципов конструирования образцов, оптимизации их формы, разработки, производства и применения новых конструкционных материалов и покрытий со специальными свойствами. То есть «малозаметность» военной техники является неотъемлемым ее свойством, которое необходимо закладывать в образцы при их создании на этапе выполнения опытно-конструкторской работы [5, 10]. Основные направления снижения заметности образцов вооружения и военной техники представлены на рис. 1.

Решение проблемы снижения заметности образцов вооружения и военной техники связано с определёнными трудностями:

- отсутствие у заказывающих организаций Министерства обороны Российской Федерации единых взглядов на проблему снижения заметности, на выполнение требований нормативно-технических документов в тактико-технических заданиях на научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по вопросам разработки и модернизации военной техники;

- недостаточное оснащение измерительно-моделирующими комплексами научно-исследовательских организаций Министерства обороны Российской Федерации и промышленного сектора для исследования характеристик средств снижения заметности и малозаметной военной техники. Выход из сложившейся ситуации состоит в интенсивном развитии и широком внедрении новых методов измерений и обработки результатов, с помощью которых возможно существенное повышение информативности уже имеющихся измерительных средств.

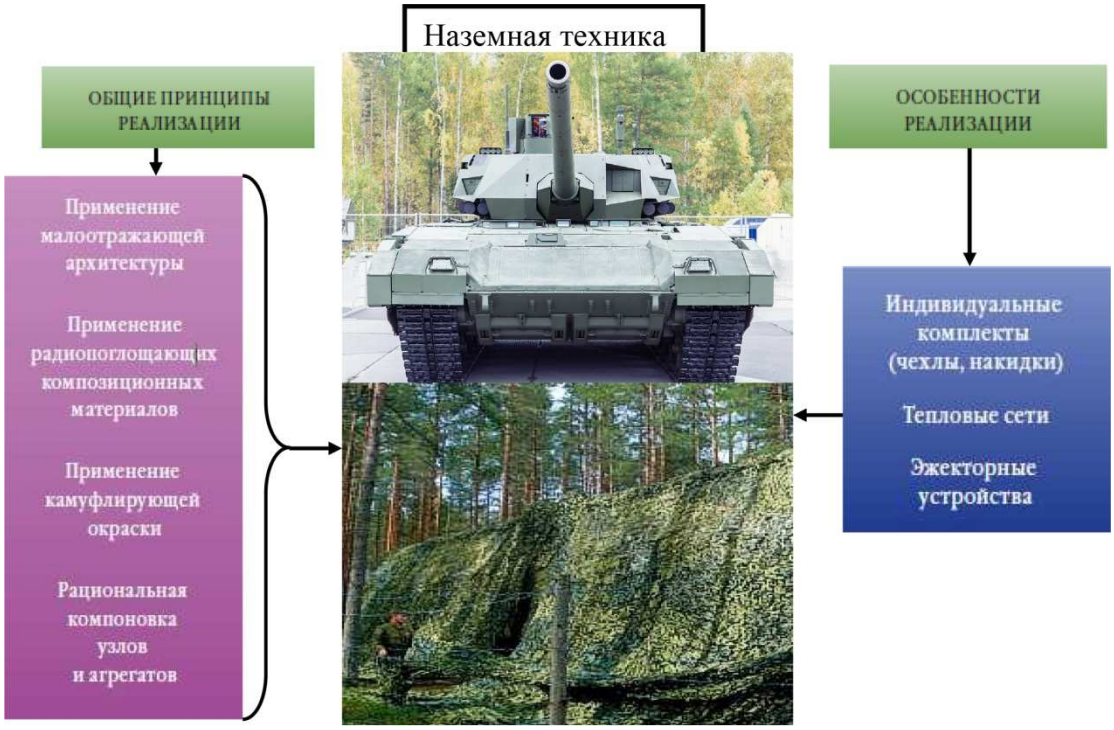


Рис. 1. Основные направления снижения заметности образцов наземной техники

1. Измерение коэффициента отражения средства снижения радиолокационной заметности в диапазоне сверхвысоких частот.

1.1. Объектом испытаний являются образцы радиопоглощающих материалов, применяемых для средств снижения радиолокационной заметности.

Требования к испытуемым объектам.

Минимальные поперечные размеры должны быть не менее:

- 70 × 70 см – при толщине образца до 30 см;
- 150 × 150 см – при толщине образца более 30 см.

1.2. Целью испытаний является измерение модуля коэффициента отражения плоской электромагнитной волны (мода ТЕМ) от образцов материалов, расположенных на плоской металлической поверхности или на согласованной нагрузке, для случая нормального падения на опорную плоскость с образцом.

Общий вид экспериментальной установки представлен на рис. 2.

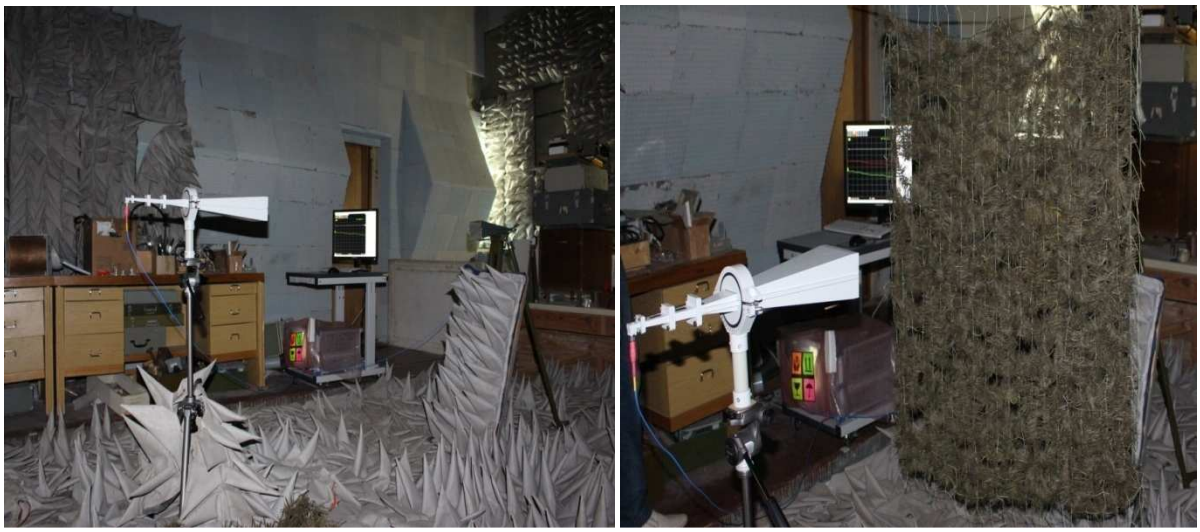


Рис. 2. Общий вид экспериментальной установки

Коэффициент отражения ($K_{отр}$) определяется как логарифмическое отношение величины мощности СВЧ излучения, отражённой от образца ($W_{отр}$), к величине мощности, падающей на образец ($W_{пад}$), для случая нормального падения, в соответствии с выражением (1):

$$K_{отр} = 10 \cdot \lg(W_{отр}/W_{пад}). \quad (1)$$

Коэффициент отражения $K_{отр}$ измеряется в дБ и, в силу соотношения $W_{отр} < W_{пад}$, является отрицательной величиной. Величина $W_{пад}$ считается равной $W_{отр}$ в случае отражения от идеально проводящей поверхности, расположенной нормально к падающему излучению; данное условие при использовании реальной металлической подложки без образца используется для калибровки установки. В качестве элементов, формирующего плоское электромагнитное излучение (ТЕМ мода) используется антенный измерительный комплект АИК-40А, формирующий плоскопараллельный фронт в ближней зоне. Тип поляризации излучения – линейный.

Измерительный комплекс базируется на применении современного преобразующего, измерительного и вычислительного оборудования, включающего в себя следующие составные части:

1.3. Анализатор спектра и сигналов ROHDE & SCHWARZ ®FSV40.

ROHDE&SCHWARZ®FSV40 (рис.3) – самый быстрый и наиболее универсальный анализатор спектра и сигналов с максимальной точностью. В сфере разработки превосходит другие анализаторы, благодаря высоким радиочастотным характеристикам, непревзойденной в своем классе полосе анализа 40 МГц и широкому диапазону приложений анализа для различных методов аналоговой модуляции, а также для стандартов беспроводной и широкополосной связи [6].

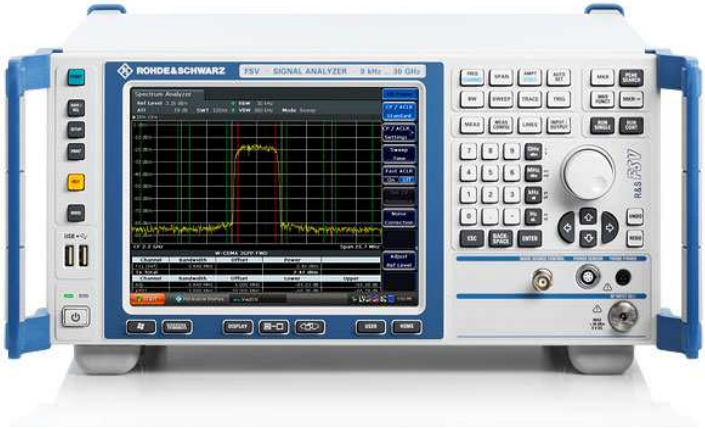


Рис. 3. Внешний вид анализатора спектра и сигналов ROHDE&SCHWARZ®FSV40

Основные технические характеристики анализатора спектра и сигналов ROHDE&SCHWARZ®FSV40 представлены в таблице.

Основные ТТХ анализатора спектра и сигналов ROHDE & SCHWARZ ® FSV40

R&S®FSV40	
от 10 Гц до 40 ГГц	
Точность воспроизведения частоты	1×10^{-6} 1×10^{-7} с дополнительным термостатированным кварцевым генератором R&S®FSV-B4 4×10^{-9} с внутренним источником опорной частоты - цезиевым стандартом частоты R&S®FSV-B14
Нестабильность частоты в диапазоне температур от 0 °С до 50 °С	1×10^{-6} 1×10^{-7} с дополнительным термостатированным кварцевым генератором R&S®FSV-B4, модель 02 1×10^{-8} с дополнительным термостатированным кварцевым генератором R&S®FSV-B4, модель 03 5×10^{-10} с внутренним источником опорной частоты - цезиевым стандартом частоты R&S®FSV-B14

Продолжение табл. 1

Полоса разрешения	
Стандартная развертка	от 1 Гц до 10 МГц
Стандартная развертка	от 1 Гц до 10 МГц
Стандартная развертка (нулевая полоса обзора)	от 1 Гц до 10 МГц, 20 МГц, 28 МГц; 40 МГц (опция) (полосы 20 МГц, 28 МГц и 40 МГц не доступны для R&S®FSV-40 (модель .39))
БПФ-развертка	от 1 Гц до 3 МГц
Канальный фильтр	от 100 Гц до 5 МГц 10 МГц, 20 МГц, 28 МГц, 40 МГц (опция) (полосы 20 МГц, 28 МГц и 40 МГц не доступны для R&S®FSV-40 (модель .39))
Фильтр электромагнитных помех (только с FSV-K54)	200 Гц, 9 кГц, 120 кГц, 1 МГц
Полоса видеофильтра	от 1 Гц до 10 МГц, 20 МГц, 28 МГц, 40 МГц (опция) (полосы 20 МГц, 28 МГц и 40 МГц не доступны для R&S®FSV-40 (модель .39))
Полоса анализа сигнала	28 МГц, 40 МГц с опцией R&S®FSV-B70, 160 МГц с опцией R&S®FSV-B160, 10 МГц для R&S®FSV-40 (модель .39)

1.4. Антенный измерительный комплект АИК-40А. Комплект антенный измерительный АИК 1-40А (далее – комплект) предназначен для измерения плотности потока энергии электромагнитного поля совместно с измерительными приемными устройствами [7]. Совместно с измерительными приемными устройствами комплект применяется для измерения плотности потока энергии электромагнитного поля, параметров антенных устройств, параметров электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств, а также возбуждения электромагнитного поля с заданной плотностью потока энергии в диапазоне частот от 1,0 до 40,0 ГГц и применяется в промышленности и сфере обороны и безопасности.

Комплект представляет собой набор из антенных систем АС-1 и АС-2, обеспечивающих работу в диапазонах частот от 1,0 до 8,2 ГГц и от 8,2 до 40,0 ГГц соответственно. Внешний вид антенных систем показан на рис. 4.

Соединение антенн с портами измерительного прибора осуществляется высококачественными СВЧ кабелями, при необходимости – с соответствующими стандартными внутриканальными и/или межканальными переходами фабричного изготовления (для диапазона частот более 20 ГГц

используется фазостабильный кабель). Положение антенн и кабелей (переходов) фиксируется и не изменяется в пространстве в процессе калибровки и измерений.



а ***б***

Рис. 4. Внешний вид антенных систем АС-1 и АС-2

1.5. Погрешность измерений составляет:

$$\Delta K_{отр}[дБ] = 2\ дБ + |K_{отр}|/10,$$

где $|\Delta K_{отр}|$ – логарифмический коэффициент отражения ($|S_{11}|$ или $|S_{22}|$, соответственно), взятый с положительным знаком.

Динамический диапазон измерений от 0 до -40 дБ. Испытания образцов проводятся в нормальных климатических условиях.

Нормальные климатические условия характеризуются следующими значениями:

- температура воздуха от 288 до 308К;
- относительная влажность воздуха от 45 до 80%;

1.6. Процедура измерения S-параметров. Встроенное программное обеспечение векторного анализатора цепей осуществляет координацию всех процедур измерительного процесса. Решаются три главные задачи: управление ходом физического процесса измерения, вычислительная обработка промежуточных данных, формирование выходных данных измерений.

Полная матрица рассеяния (S-матрица) N-портовой цепи содержит N^2S параметров. В качестве первичных данных анализатор цепей измеряет комплексные интенсивности волновых величин a и b. Полные измерения N-портовой цепи разделяются на N-парциальных измерений. В каждом

парциальном измерении только один из N портов работает как активный порт. Все оставшиеся порты рассматриваются как пассивные с согласованными нагрузками. Предполагается, что нагрузки идеально согласованы с измерительным портом. В каждом парциальном измерении требуется получить оценки для комплексных интенсивностей следующих волн: выходящая волна активного измерительного порта, отражённая волна от активного измерительного порта; волны, передаваемые в оставшиеся N-1 измерительных портов [8, 9].

На рис. 5 показано парциальное измерение на тестовый порт 1 как с четырёх портовой сетью. В результате оказывается определённая первая колонка (столбец) S-матрицы. Парциальные измерения для других портов позволяют определить все другие колонки S-матрицы.

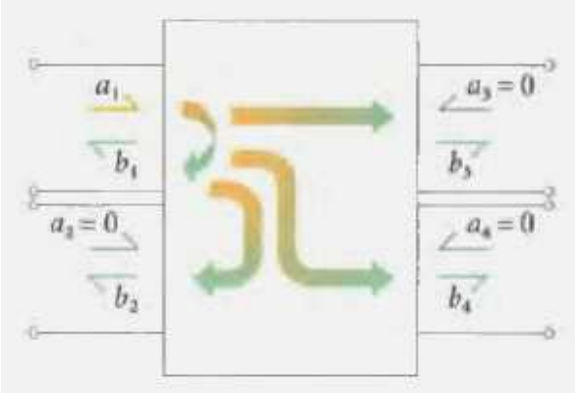


Рис. 5. Парциальные измерения для активного порта 1

Анализатор цепей работает в режиме прерывания (chopping mode). В этом режиме анализатор цепей выполняет все парциальные измерения в заданной частотной точке, затем перемещается в следующую частотную точку.

1.7. Цепочка обработки данных измерений. На вход цепочки обработки данных измерений поступают исходные численные измеренные значения из опорного и измерительного приёмников. На рис.6 шаги обработки представлены стрелками, а объекты данных представлены символами, похожими на бочонки. Шаги обработки, показанные серым цветом, являются обязательными, и не могут быть пропущены.

Цепочка обработки данных оказывается завершённой только после определения требуемых измеренных значений. Соответствующие конечные точки в цепочке обработки данных показаны на рис номерами от 1 до 3. Процедуры, отмеченные зелёным цветом, требуются только для калибровки пользователя, а завершаются определением данных коррекции. Если калибровка пользователя не задействована, то фабричная корреляция системной ошибки осуществляется с использованием предустановок по умолчанию на основе фабричных поправок [9].

1.8. Генерация кривой отклика. Вторая часть цепочки обработки данных (генерация кривой отклика) показана на рис. 6. Она объединяет все вычисления, необходимые для индикации результатов измерений. Комплексные входные величины поступают либо из первой части цепочки обработки данных, либо берутся из основной памяти, или из файла данных. В шагах обработки с лёгкой голубой окраской задействованы комплексные величины [8, 9].

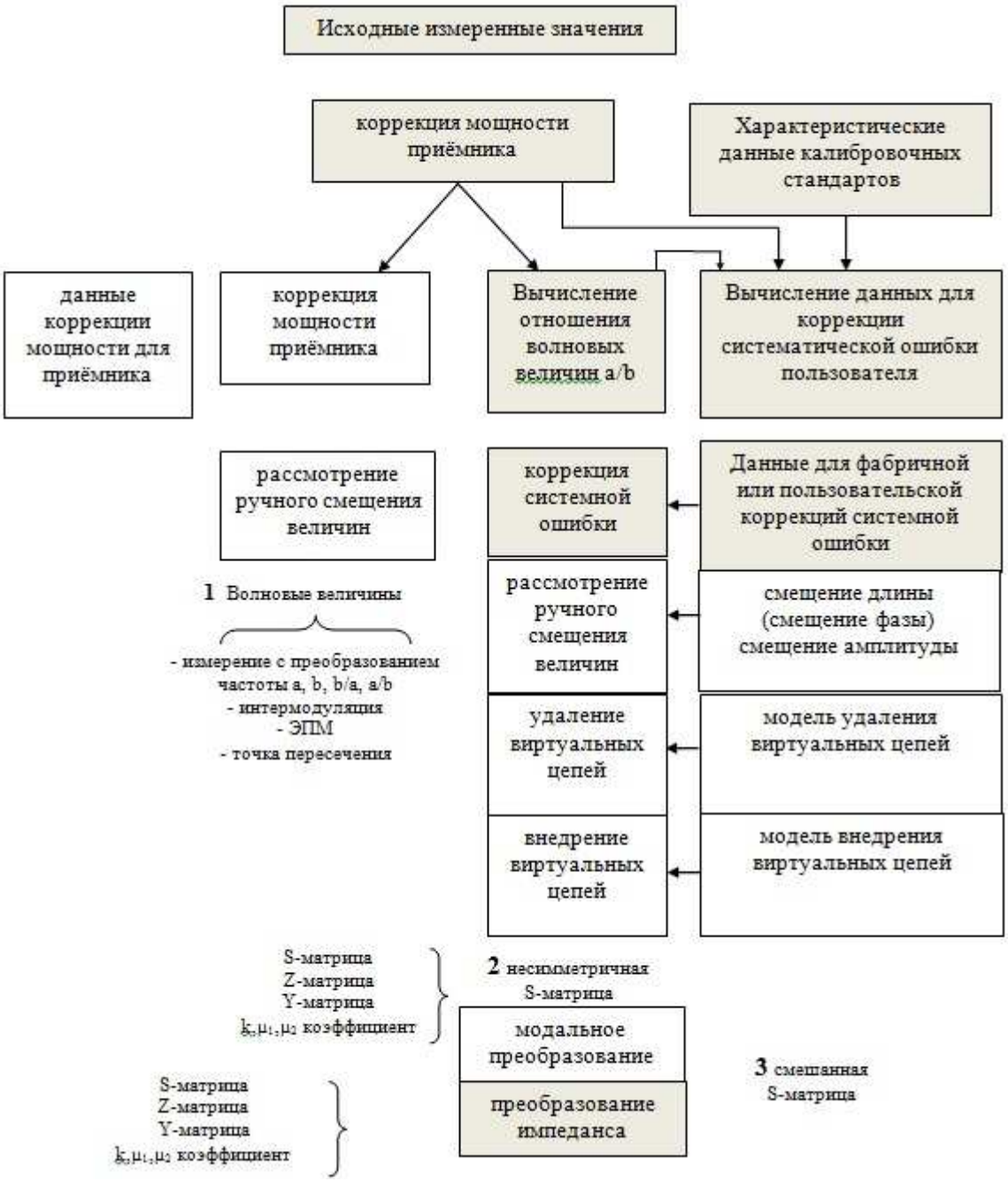
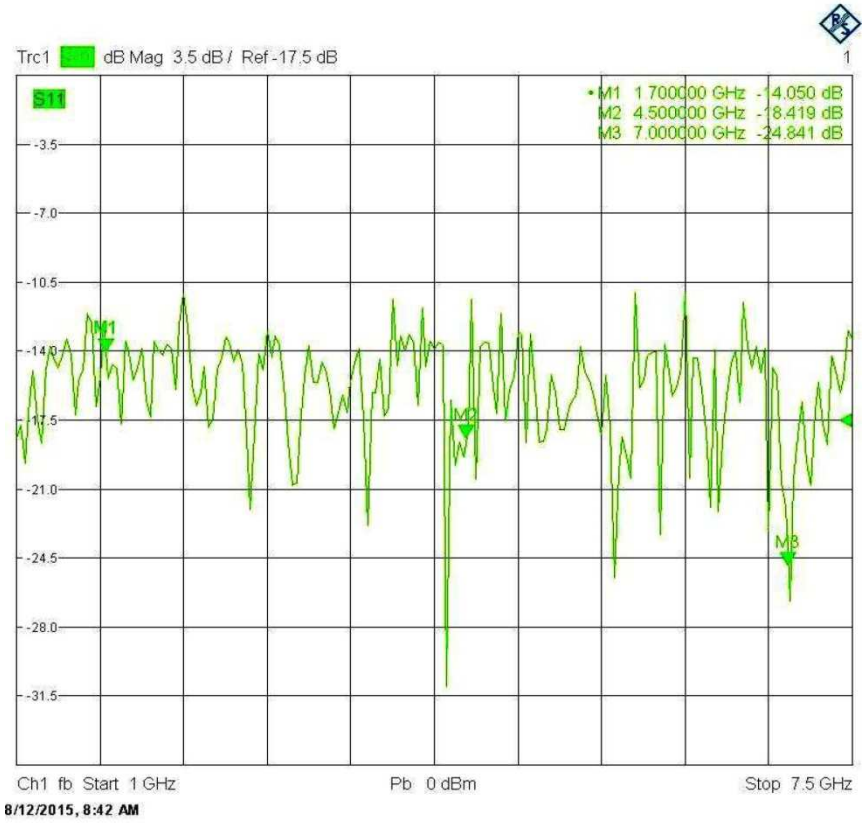


Рис. 6. Цепочка обработки данных (начало)

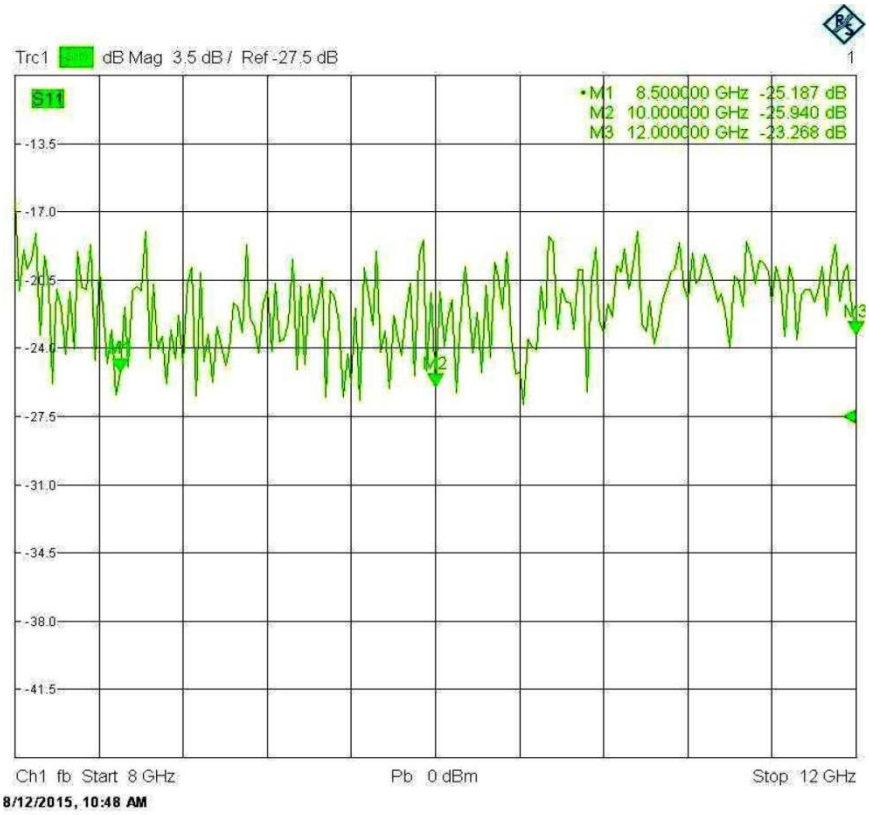


Рис. 6. Цепочка обработки данных (окончание)

Результаты экспериментальных исследований представлены на рис. 7.



а



б

Рис. 7. Результаты измерения коэффициэнта отражения в диапазоне частот: а – от 1 до 7,5 ГГц; б – от 8 до 12 ГГц

Выводы. Предложена методика измерения S-параметров материалов для снижения радиолокационной заметности образцов вооружения и военной техники. Методика базируется на применении измерительного комплекса, базирующегося на современном преобразующем и вычислительном оборудовании.

Внедрение такого измерительного комплекса при измерении радиотехнических параметров исследуемых объектов позволяет существенно повысить информативность, точность и скорость измерений.

Список литературы

1. Меньшаков Ю.К. Виды и средства иностранных технических разведок. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2009. 656 с.

2. Верба В.С., Неронский Л.Б., Осипов И.Г., Турук В.Э. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования. М.: Радиотехника, 2010. 675 с.

3. Кондратенков Г.С., Фролов А.Ю. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли. М.: Радиотехника, 2005. 368 с.

4. Гарбук С.В., Гершензон В.Е. Космические системы дистанционного зондирования Земли. М.: «А и Б», 1997. 296 с.

5. Ласточкин Ю.И. Проблемные вопросы снижения заметности ВВТ в различных физических полях // Тематический сборник. Радиоэлектронная борьба в ВС РФ. 2015. С. 273-277.

6. Официальный сайт Rohde&schwarz.ru [Электронный ресурс]. URL: https://www.rohde-schwarz.ru (дата обращения: 23.04.2016).

7. Антенный измерительный комплект. АИК 1-40А/01. Ч. 1. КНПР. 464965.002-01 ФО. 40 с.

8. Хибель М. Основы векторного анализа цепей. М.: МЭИ, 2009, 500 с.

9. Раушер К. Основы спектрального анализа. М.: Rohde & Schwarz, 2006. 224 с.

10. Михайлов В.В. Создание малозаметного вооружения, военной и специальной техники как направление повышения эффективности радиоэлектронной борьбы // Тематический сборник. Радиоэлектронная борьба в ВС РФ. 2016. С. 41-42.

Спирин Максим Сергеевич, канд. техн. наук, доц., offside7611@rambler.ru, Россия, Пенза, Пензенский артиллерийский инженерный институт, филиал Военной академии материально технического обеспечения г. Санкт-Петербург,

Зайцев Юрий Михайлович, адъюнкт, offside7611@rambler.ru, Россия, Пенза, Пензенский артиллерийский инженерный институт, филиал Военной академии материально технического обеспечения г. Санкт-Петербург,

Полянсков Александр Владимирович, адъюнкт, offside7611@rambler.ru, Россия, Пенза, Пензенский артиллерийский инженерный институт, филиал Военной академии материально технического обеспечения г. Санкт-Петербург

DEVELOPMENT OF TECHNIQUES S-PARAMETER MEASUREMENTS MEANS OF REDUCING THE RADAR SIGNATURE WEAPONS AND MILITARY TECHNOLOGY

M.S. Spirin, Yu.M. Zaitsev, A.V. Polianskov

The method of measuring S-parameters means to reduce radar visibility of weapons and military equipment. The methodology is necessary to use a measuring complex based on the use of modern converting , measuring and computing equipment.

Key words: reflective, radar visibility, measuring complex, spectrum analyzer and signal.

Spirin Maxim Sergeevich, doctor of technical sciences, docent, offside7611@rambler.ru, Russia, Penza, Penza Artillery Engineering Institute, a branch of the Military Academy material and technical support of St. Petersburg,

Zaitsev Yury Michailovich, associate, offside7611@rambler.ru, Russia, Penza, Penza Artillery Engineering Institute, a branch of the Military Academy material and technical support of St. Petersburg,

Polianskov Alexander Vladimirivich, associate, offside7611@rambler.ru, Russia, Penza, Penza Artillery Engineering Institute, a branch of the Military Academy material and technical support of St. Petersburg

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

УДК 621.3

ОЦЕНКА РАБОТОСПОСОБНОСТИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ И СИСТЕМ ПРИ ПЕРЕДАЧЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В РЕЖИМАХ НЕСИНУСОИДАЛЬНОСТИ

С.В. Гужов

Рассмотрен способ оценки дополнительных потерь электрической энергии с учётом режимов несинусоидальности в сетях жилищного хозяйства. Получены соотношения, позволяющие оценить величину потерь электрической энергии от несинусоидальности тока. Получена экономическая оценка ущерба от несинусоидальности тока в питающем кабеле и трансформаторе.

Ключевые слова: режим несинусоидальности, потери электрической энергии, частотный резонанс

Вопросам влияния высших гармонических составляющих тока и напряжения на основные элементы электротехнических комплексов и систем электроснабжения посвящено значительное число работ [1 - 7]. Последствия повышенного уровня несинусоидальности следующие: снижение эффективности процессов генерации и передачи электроэнергии, ускоренный выход из строя предохранителей и батарей конденсаторов, перегрев силовых трансформаторов, дополнительные вибрации на валу электрических двигателей. В системах электроснабжения современных крупных и крупнейших городов в последние 15 лет наблюдается устойчивый рост числа и установленной мощности электропотребителей, генерирующих в сеть гармоники тока и напряжения. При рассмотрении таких неотъемлемых составляющих электротехнических комплексов городов, как сектор жилищного хозяйства, представляется важным оценка дополнительных потерь электрической энергии с учётом режимов несинусоидальности.

Несмотря на трудности в получении достоверной информации по вопросу негативного влияния несинусоидальности напряжения на работу современных сетей с микропроцессорными нагрузками, известен случай,

когда при суммарном коэффициенте гармонических составляющих кривой напряжения K_U=5,5%, регулярно отключались компьютеризированные станки термической обработки на заводе по производству труб [8]. Таким образом, если при K_U = 4 %, может и не быть существенных проблем для сетей напряжением 35 кВ, то при 6%-м уровне K_U может быть ложное срабатывание микропроцессорной защиты нагрузок.

Под работоспособностью функционирования в статье понимается способность электротехнических комплексов и систем выполнять преобразование, поставку, потребление электрической энергии с заданным качеством при минимальных потерях. Под данное определение подпадает и задача функционирования электротехнической системы в режимах несинусоидальности тока и напряжения с условием потребления электрической энергии в паспортных условиях.

Наиболее чувствительны по отношению к высшим гармоническим составляющим напряжения конденсаторные установки и силовые трансформаторы.

Наличие конденсаторов, используемых для компенсации реактивной мощности, может привести к местным резонансам, которые, в свою очередь, могут вызвать чрезмерное увеличение тока в конденсаторах и их выход из строя. Дополнительные активные потери, приводящие к нагреву [9]:

$$\Delta P_{\Sigma\, ДИЭЛ} = \omega \sum_{k=2}^{n} U_{(k)}{}^2 * n * C * tg\delta_k \,, \qquad (1)$$

где ω – номинальная угловая частота; $U_{(k)}$ – напряжение k-й гармоники; ºС – ёмкость батареи; $tg\delta_k$ – коэффициент диэлектрических потерь на k-й гармонике.

В трансформаторах гармоники напряжения вызывают увеличение потерь электроэнергии на гистерезис, потерь, связанных с вихревыми токами в стали, и потерь в обмотках:

$$\Delta P_{TP} = \Delta P_{XX} \sum_{k=2}^{n} U_{КЗ}{}^2 + 0.607 \frac{\Delta P_{КЗ}}{U_{КЗ}} \sum_{k=2}^{n} \frac{1+0.5k^2}{k\sqrt{k}} U_k{}^2 \,, \qquad (2)$$

где ΔP_{XX}, $\Delta P_{КЗ}$, $U_{КЗ}$ – расчётные данные трансформатора.

Например, экспериментально измеренная кривая тока намагничивания силового трансформатора 10/0,4 кВ мощностью 25 кВ·А (рис. 1) характеризуется высоким уровнем искажений (K_I= 76,1%), однако действующее значение тока составляет только 1,54А [8], что крайне мало по сравнению с номинальным значением рабочего тока.

Увеличение потерь в обмотках наиболее важно в случае преобразовательного трансформатора, т.к. наличие фильтра, присоединяемого обычно к стороне переменного тока, не снижает гармоник в трансформаторе.

Кроме того, при работе с повышенным гармоническим составом тока наблюдаются локальные перегревы бака трансформатора, сокращается срок службы изоляции [10].



Рис. 1. Кривая тока намагничивания трансформатора 10/0,4 кВ мощностью 25 кВ·А, K_I = 76,1%

Протекание гармонического состава с повышенным уровнем через силовой трансформатор даже при небольшом уровне их загрузки приводит к перегреву. Ситуация часто наблюдается при питании от трансформатора мощных нелинейных нагрузок. Известны примеры 20%-го снижения передаваемой через трансформатор мощности [11]. Различают два механизма возникновения перегрева:

1. Потери в проводнике пропорциональны квадрату действующего значения тока $I_д$ увеличивающегося с ростом уровня искажений согласно выражению

$$I_Д = \sqrt{1 + K_I{}^2}\,, \tag{3}$$

где K_I – суммарный коэффициент высших гармонических составляющих кривой тока.

$$K_I = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{n} I_{k,\partial}{}^2}}{I_{1,\partial}}, \tag{4}$$

где $I_{k,\partial}$ и $I_{1,\partial}$ – действующие значения k-й и основной гармоник; n – количество учитываемых гармоник.

2. В результате поверхностного эффекта и эффекта близости, в трансформаторных обмотках рост частоты токов высших гармоник на 1А вызывает больше потерь чем 1 А тока основной частоты [12].

При рассмотрении силовых трансформаторов резистивный поверхностный эффект обычно моделируется посредством разделения сопротивления на постоянную составляющую и составляющую, зависящую от частоты. Частотная составляющая сопротивления принимается прямо пропорциональной квадрату частоты [13]:

$$R_k = R_{dc} \cdot (1 + k^2 \cdot P_{ec-r}), \quad (5)$$

где R_k – активное сопротивление обмотки на частоте k-й гармоники; R_{dc} – активное сопротивление обмотки на постоянном токе; $P_{ec\text{-}r}$ – коэффициент, учитывающий потери в обмотках от вихревых токов. $P_{ec\text{-}r}$ варьируется от 0.01 для низковольтных трансформаторов собственных нужд с относительно небольшими проводниками до 0.1 для трансформаторов подстанций с проводниками крупного сечения.

Важная составляющая воздействия гармоник на мощные трансформаторы состоит в циркуляции утроенного тока нулевой последовательности в обмотках, соединённых в треугольник [14]. Этот фактор часто приводит к их перегрузке и последующему межвитковому КЗ.

В линии электропередачи гармоники тока приводят к дополнительным потерям мощности [15].

$$P_{ЛЭП} = 3 \cdot \sum_{k=2}^{n} {I_k}^2 \cdot r \cdot K_{rk}, \quad (6)$$

где K_{rk} – коэффициент, учитывающий влияние поверхностного эффекта ($K_{rk} \approx 0{,}47 * k^{0{,}5}$).

При появлении тока гармоники с порядковым номером k>1 появляется поверхностный эффект, что приводит к дополнительным потерям тепла, нагреву изоляции электроприборов и аппаратов электрической сети и снижению их службы. В кабельных линиях гармоники напряжения увеличивают воздействие на диэлектрик пропорционально увеличению максимальной амплитуды напряжения, что ускоряет его старение. В линиях сверхвысокого напряжении гармоники напряжения по той же причине (увеличение амплитуды) могут ещё вызвать увеличение потерь электроэнергии на корону [15]. Для сетей 6...35 кВ соотношение активного и реактивного сопротивлений при промышленной частоте пренебрежимо мало, т.к.:

$$\frac{r}{x} = \frac{0.1 \div 0.3}{\sqrt{k}}. \quad (7)$$

Для основных сетей энергосистем отношение r_k/x_k оказывается ещё меньше. На частотную характеристику эквивалентного сопротивления сети существенное влияние оказывает ёмкостное сопротивление прямой последовательности кабельных сетей X_{C1}. Его значение для 1-й гармоники примерно в 2 раза отличается от соответствующего сопротивления нулевой последовательности

$$X_{C1} = \frac{2U}{\sqrt{3} I_C}, \quad (8)$$

где U – линейное напряжение сети; I_C – ёмкостный ток однофазного замыкания на землю.

Особое внимание следует уделять прогнозу уровней гармонического состава напряжений и токов при расчёте возможных случаев частотных резонансов, возникающих в случае равенства значений емкостных (X_C) и индуктивных (X_L) сопротивлений в сети и у потребителей на определенной частоте. Если резонансная частота совпадает с частотой высшей гармонической составляющей то, амплитуда соответствующей гармоники напряжения увеличивается многократно. В электрической сети различают параллельный (рис. 2) и последовательный (рис. 3) резонансы.

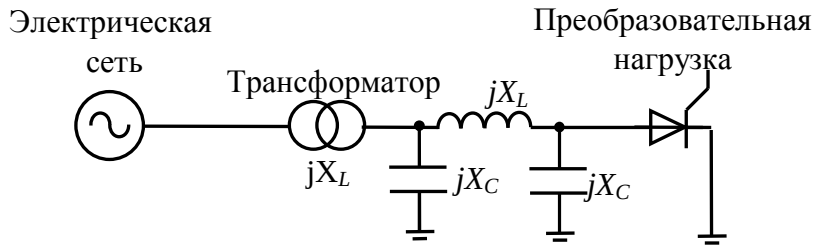


Рис. 2. Упрощённая схема замещения электрической сети при параллельном резонансе

При параллельном резонансе наибольший уровень несинусоидальности напряжения наблюдается в точке присоединения нелинейной нагрузки. Весь спектр частот гармонических составляющих тока передается ко всем электроприемникам по питающему кабелю. Резонансные токи в элементах сети вызывают значительное падение напряжения на соответствующей частоте, которое в свою очередь искажает напряжение питания. При последовательном резонансе максимальные уровни искажения фиксируются в удаленных узлах сети или на сопряженном кабеле, отходящем от шин трансформатора преобразователя.

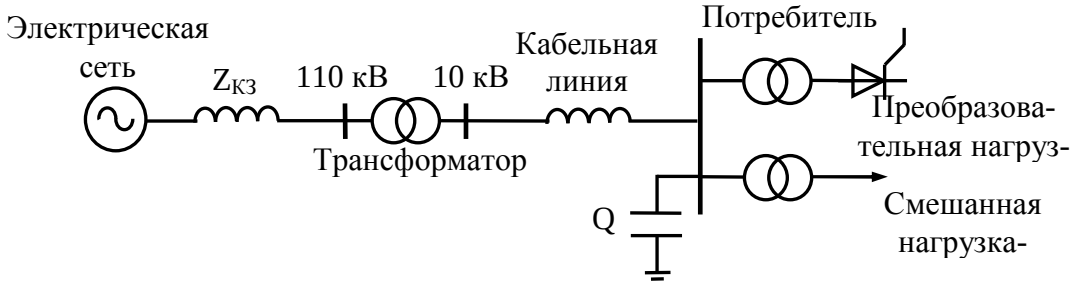


Рис. 3. Упрощённая схема замещения электрической сети при последовательном резонансе

Известно, частота параллельного резонанса $f_{рез}$ в электрической сети не зависит от значений активных сопротивлений сети или нагрузки и рассчитывается по формуле

$$f_{рез} = \frac{\omega_{рез}}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C}} = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{\omega}{X_{\text{L }сист}}\omega X_{\text{C }сист}} =$$

$$= \frac{\omega}{2\pi}\sqrt{\frac{X_{\text{C }конд}}{X_{\text{L }сист}}} = f_{50Гц}\sqrt{\frac{S_{КЗ}}{S_{конд}}}, \qquad (9)$$

где $\omega_{\text{рез}}$ – циклическая резонансная частота колебательного контура; L и C – соответственно,суммарные индуктивность и емкость электрической сети; $S_{КЗ}$ – мощность короткого замыкания сети; $S_{конд}$ – мощность конденсаторной установки.

Поскольку в действующих электрических сетях активное и реактивное сопротивления не статичны, при анализе возможности возникновения частотных резонансов используют частотную характеристику входного сопротивления сети $Z_{\text{ВХ}}(f)$. Современные электрические сети имеют сложную разветвленную структуру и могут иметь в составе множество различных по мощности и типу установок, что создает большое количество параллельных и последовательных контуров для возникновения резонансных токов. Кроме этого, недостатками, ограничивающими применение (9), являются:

1) не учитывается информация о протяженности пика резонансной кривой;

2) требуется трудоёмкий дополнительный расчет уровней несинусоидальности на всем протяжении кабеля, а также сопряженных линий, подключенных к общим шинам трансформаторной подстанции для каждой из модернизаций сети на всех её возможных режимах;

3) становится весьма сложным расчёт величины сопротивления элементов питающей сети и элементов сети потребителя, а значит возможности возникновения локальных резонансов.

Способы подавления гармонической эмиссии делятся на две группы: превентивные и корректирующие. Превентивные методы основываются на минимизации уровней гармонической эмиссии в электрической сети при проектировании и монтаже электрооборудования. Корректирующие методы в основном подразумевают применение фильтрующих устройств, подразделяющихся на пассивные и активные. Пассивные фильтры широко используются для снижения уровней 5-й и 7-й гармонических составляющих тока. Большинство из них состоит из последовательно соединенных индуктивных и емкостных компонентов, обеспечивающих возникновение заземляющего контура с низким сопротивлением на частоте резонанса. Учитывая наличие значительной емкостной составляющей, в низкочастотной области около 50 Гц пассивные фильтры обеспечивают как компенсацию реактивной мощности, так и контроль уровня несинусоидальности напряжения.

В ряде случаев активные фильтров сами являются источниками гармоник тока. Например, если превышена 7-я гармоника, следует устанавливать фильтры 5-й и 7-й гармоник, поскольку только фильтр 7-й гармоники может усиливать уровень 5-й гармоники напряжения. Так следует избегать установки фильтров 3-й гармонической составляющей, поскольку подключенные к сети электродвигатели и трансформаторы — традиционные источники 3-й гармоники, значительно снижают подавляющие свойства данных фильтров [16].

К проблемам, связанным с пассивной фильтрацией, относят:

- снижение ёмкости конденсаторов из-за процессов старения с одновременным увеличением частоты резонанса фильтра;

- малая гибкость фильтра для случая модернизации потребителя либо появления неучтенных источников несинусоидальности сети.

Активные фильтры - это силовые преобразователи, компенсирующие высшие гармонические составляющие тока в режиме реального времени, что решает недостаток пассивных фильтров. Подобные фильтры имеют достаточно высокую сложность и стоимость, поэтому применение должно быть обосновано также с экономической точки зрения.

Определимпотери электрической энергии в кабельной линии и трансформаторе, питающегоодин жилой девятиэтажный трёхподъездный дом на 108 квартир (рис. 4). Ввод α используется в качестве основного, ввод β находится в резерве. На рис. 5 приведены кривые напряжения и тока в одной фазе для 36 квартир жилого дома, присоединённых к ВРУ, в табл. 1приведён амплитудный гармонический спектр тока. Характеристики используемого трансформатора приведены в табл. 2, кабеля приняты для сечения 120 кв.мм.класс 1 согласно [17], длина кабеля от ВРУ до КТП – 500 м.

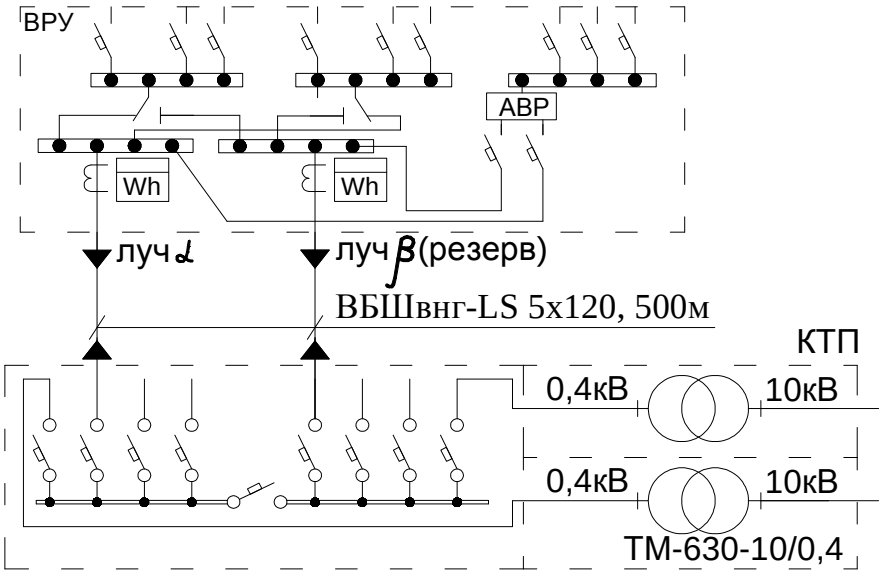


Рис. 4. Схема питания нагрузки от двухтрансформаторной КТП

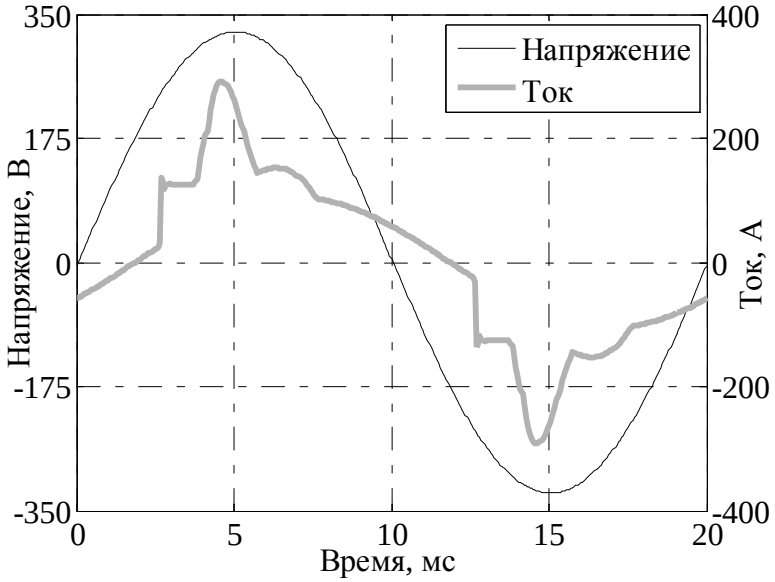


Рис. 5. Кривые напряжения и тока в одной фазе, полученного для 36 квартир жилого дома с работающей системой освещения, телевизорами и ПК в каждой квартире

Таблица 1

Амплитудный гармонический спектр тока в питающем кабеле

I_1, А	I_3/I_1, %	I_5/I_1, %	I_7/I_1, %	I_9/I_1, %	K_I, %
126	29.4	12.7	7.2	9.7	36.7

Таблица 2

Технические данные масляных двухобмоточных трансформаторов общего назначения класса 6-10 кВ [20]

Тип трансформатора	Схема соед. обм.	Потери, Вт		Uкз, %	Iхх, %	Сопротивление, мОм			
		хх	кз			$R_т$	$X_т$	$Z_т$	$Z_т^{(1)}$
ТМ-630/10/0,4	Y-Y-0	1310	7600	5,5	2	3,1	13,6	14	128

Поскольку в ГОСТ 22483-2012 [16] не нормируются электрические сопротивления однопроволочных и многопроволочных жил для высших гармоник, при расчёте был использован алгоритм вычисления сопротивлений [14]. В результате расчёта, выполненного по алгоритму [18] и формулам (1) - (5), выявлены потери в трансформаторе, равными 8,3 Вт при cosφ=0.8. Потери в кабеле (6) - (8) составляют около 5,8 Вт на 500 м. Дополнительные потери электрической энергии в кабельной линии и трансформатореот одного жилого дома за год составят 123,51кВт*ч. В случае

подключения к данной КТП восьми аналогичных домов (что характерно для некоторых дворовых схем), суммарные потери составят около 1000 кВт*ч в год.

Приведённый в работе алгоритм позволяет оценочно произвести расчёт дополнительных потерь электрической энергии, возникающих в сетях электротехнических комплексов при работе в режимах несинусоидальности тока и напряжения.

Список литературы

1. Лррнлага Дж. Брэдли Д. Болжер П. Гармоники в электрических системах / пер. с англ. М. : Энергоатомиздат. 1990. 320 с.

2. Семичевский П.И. Методика расчета дополнительных потерь активных мощности и электроэнергии в элементах систем электроснабжения промышленных предприятий, обусловленные высшими гармониками: дис. ... канд. техн. наук. М., 1978. 206 с.

3. Гидалевнч Е.Д. Упрощенный расчет мощности потерь в косинусных конденсаторах при косинусоидальном напряжении // Промышленная энергетика, 1990. N9 7. С. 24-30.

4. Григорьев О. [и др.]. Высшие гармоники в сетях электроснабжения 0,4 кВ // Новости электротехники, 2002. № 6(18). [Электронный ресурс]. URL: http://www.tesla.ru/publications/files/025.pdf (дата обращения: 14.11.2016).

5. Данилович Я.Б., Кашарский Э.Г. Добавочные потери в электрических машинах. М.: Госэнергоиздат, 1963. 164 с.

6. Кучинский Г.С., Назаров НИ., Назарова Г.Т., Переселенцев И.Ф. Силовые электрические конденсаторы. М.: Энергия, 1975. 248 с.

7. Жежеленко И.В. Высшие гармоники п системах электроснабжения промпредприятий. М.: Энергоатомиздат, 2000. 192 с.

8. Работоспособность и качество функционирования электротехнических комплексов и систем в режимах несинусоидальности напряжения: учебное пособие / Янченко С.А., Гужов С.В. М.: Изд-во МЭИ, 2016. 44 с.

9. Конюхова Е.А. Электроснабжение объектов: учебное пособие по специальности 140409 «Электроснабжение (по отраслям)» / Е.А. Конюхова. 9-е изд., испр. М.: Академия, 2013. 320 с.

10. Атабеков Г.И. Теория нелинейных электрических цепей. М.: Советское радио, 1962. 211 с.

11. Справочник электрослужбы. [Электронный ресурс]. URL: http://www.elektrikii.ru/publ/6-1-0-114 (дата обращения: 14.11.2016).

12. Key T. Costs and benefits of harmonic current reduction for switch-mode power supplies in a commercial office building / T. Key, J.-S. Lai // IEEE Transactions on industry applications, September, 1996.

13. Grady M. Understanding power system harmonics. [Электронный ресурс]. URL: http://www.ece.utexas.edu/~grady (дата обращения: 14.11.2016).

14. Разработка методики расчета установившихся режимов электрических сетей наружного освещения с учетом нелинейных характеристик светодиодных светильников : диссертация ... кандидата технических наук : 05.09.03 / Гужов Сергей Вадимович; [Место защиты: Моск. энергет. ин-т]. М., 2009. 147 с.

15. Жежеленко И.В. Показатели качества электроэнергии на промышленных предприятиях. М.: Энергия, 1977. 128 с.

16. Демирчян К.С, Нейман Л.Р, Коровкин Н.В, Чечурин В.Л. Теоретические основы электротехники: учебник для вызов. Том 2. СПб.: Питер, 2003. 576 с.

17. ГОСТ 22483-2012 (IEC 60228:2004) «Жилы токопроводящие для кабелей, проводов и шнуров», Москва, Стандартинформ, 2013.

18. Разработка концептуального подхода к обеспечению электромагнитной совместимости бытовых электроприемников : диссертация ... кандидата технических наук: 05.09.03 / Янченко Сергей Александрович. М., 2013. 98 с.

Гужов Сергей Вадимович, канд. техн. наук, зам. начальника отдела, GuzhovSV@yandex.ru, Россия, Москва, Национальный исследовательский университет "МЭИ"

PERFORMANCE EVALUATION OF ELECTRO TECHNICAL COMPLEXES AND SYSTEMS FOR TRANSMISSION OF ELECTRIC ENERGY IN MODES-SINUSOIDAL

S.V. Guzhov

The method of assessment of additional losses of electric energy, considering non-sinusoidal regimes in networks of housing. Relations are derived allowing to estimate the size of losses of electric energy from nesenai-range current. The economic assessment of damage from non-sinusoidal current in the supply cable and the transformer.

Key words: mode-sinusoidal losses of electric energy, frequency, resonance

Guzhov Sergey Vadimovich, candidate of technical sciences, deputy head of the department, GuzhovSV@yandex.ru, Russia, Moscow, National Research University "Moscow Power Engineering Institute"

УДК 681.511.4

ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ХАРАКТЕРИСТИК АВТОКОЛЕБАНИЙ В СИСТЕМЕ С ТРЕХПОЗИЦИОННЫМ РЕЛЕЙНЫМ ЭЛЕМЕНТОМ

Н.В. Фалдин, А.В. Моржов

Рассматриваются системы с трехпозиционным релейным элементом и нелинейным объектом управления. Разработаны методы определения функций чувствительности автоколебаний (периодической траектории, частоты, критерия устойчивости).

Ключевые слова: трехпозиционный релейный элемент, автоколебания, чувствительность, периодическая траектория, частота, критерий устойчивости.

К системам с трехпозиционным релейным элементом обычно обращаются, когда требуется обеспечить автоколебания, имеющие невысокую амплитуду при достаточно низкой частоте. Далее, системы с трехпозиционным релейным элементом характеризуются меньшим (по сравнению с двухпозиционным) потреблением энергии.

При анализе и синтезе релейных систем важно располагать информацией о чувствительности системы к изменению параметров объекта управления. Зная функцию чувствительности, легко определить, как влияют отклонения параметров от номинальных значений на качественные характеристики системы. На практике такие отклонения всегда имеют место. С помощью функций чувствительности, таким образом, можно оценить работоспособность системы в реальных условиях эксплуатации. Далее, они позволяют также выполнить синтез при задании ограничений на чувствительность системы к изменению параметров объекта управления.

В [1–4] разработаны методы исследования чувствительности систем с двухпозиционным релейным элементом. Однако аналогичные методы необходимо иметь и для систем с трехпозиционным релейным элементом. Настоящая статья посвящена разработке методов исследования чувствительности автоколебаний в системах с трехпозиционным релейным элементом и нелинейным объектом управления. Рассматривается чувствительность следующих характеристик автоколебаний: периодической траектории; критерия устойчивости.

Чувствительность периодического движения. Рассмотрим релейную автоколебательную систему с трехпозиционным релейным элементом (рис.1).

При отсутствии входного сигнала ($y(t)\equiv 0$) движение системы задается уравнениями:

$$\frac{d\mathbf{x}}{dt}=\mathbf{f}(\mathbf{x},\alpha,u), \qquad (1)$$

$$u=\Phi(-\mathbf{R}^T\mathbf{x},\lambda,b), \qquad (2)$$

где $\mathbf{x}=(x_1,x_2,...,x_n)$ и $\mathbf{f}=(f_1,f_2,...,f_n)$ – n-мерные векторы.

Функция Φ задается статической характеристикой трехпозиционного релейного элемента (рис. 2).

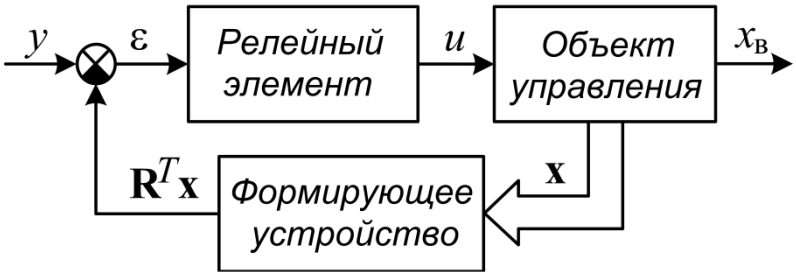


Рис. 1. Релейная автоколебательная система с трехпозиционным релейным элементом: $y(t)$ ***– входной сигнал,*** $\mathbf{R}^T$ ***– матрица-строка***

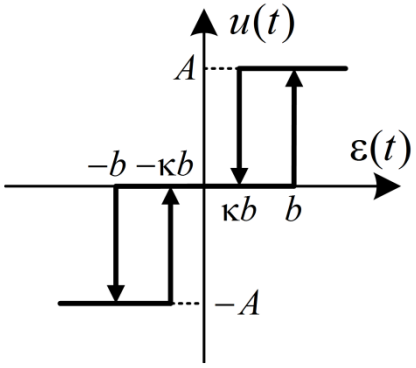


Рис. 2. Статическая характеристика трехпозиционного релейного элемента

В равенстве (1) α – некоторый скалярный параметр. Будем предполагать, как это обычно имеет место в следящих системах, что объект управления обладает нечетной симметрией:

$$\mathbf{f}(-x,\alpha,-u)=-\mathbf{f}(x,\alpha,u),$$

причем симметрия сохраняется при любом значении параметра α.

Фазовый годограф [5] позволяет легко определить возникающие в представленной на рис. 1 и 2 системе ($y(t)\equiv 0$) автоколебания. Пусть $\mathbf{x}(t)$ – периодическая траектория системы (1), (2) периода $2T$. Объект управления и функция Φ обладают нечетной симметрией. В такой системе периодическая траектория также имеет симметрию, т.е. $\mathbf{x}(t+T)=-\mathbf{x}(t)$. На рис. 3 изображен вид на периоде сигнала с выхода релейного элемента $u(t)$.

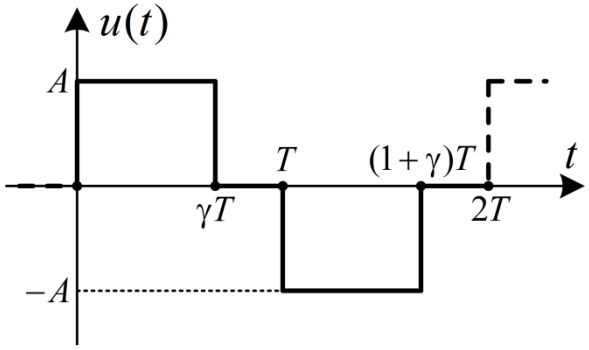


Рис. 3. Вид на периоде сигнала с выхода релейного элемента u(t)

Малое изменение параметра α приведет к малому изменению периодической траектории. Периодическую траекторию в параметрически возмущенной системе (она также обладает симметрией) обозначим $\tilde{\mathbf{x}}(t)=\mathbf{x}(t)+\delta\mathbf{x}(t)$, здесь $\delta\mathbf{x}(t)=(\delta\mathbf{x}_1(t),\delta\mathbf{x}_2(t),...,\delta\mathbf{x}_n(t))$.

На траекториях $\mathbf{x}(t)$ и $\tilde{\mathbf{x}}(t)$ момент $t=0$ совместим с моментом переключения релейного элемента с нуля на плюс. На траектории $\mathbf{x}(t)$ управление переключается в точках γT и T, а на траектории $\tilde{\mathbf{x}}(t)$ – в моменты $\gamma T+\delta(\gamma T)$ и $T+\delta T$, где $\delta(\gamma T)$ и δT – малые величины.

Для системы с номинальным значением параметра α, как следует из рис. 1 и 2, имеют место равенства:

$$-\mathbf{R}^T\mathbf{x}(\gamma T)=\lambda b,\ -\mathbf{R}^T\mathbf{x}(T)=-b, \tag{3}$$

а для параметрически возмущенной системы – равенства

$$-\mathbf{R}^T\tilde{\mathbf{x}}(\gamma T+\delta(\gamma T))=\lambda b,\ -\mathbf{R}^T(\tilde{\mathbf{x}}(T+\delta T))=-b. \tag{4}$$

Представим уравнения (4) в виде

$$\begin{aligned}-\mathbf{R}^T[\mathbf{x}(\gamma T+\delta(\gamma T))+\delta\mathbf{x}(\gamma T+\delta(\gamma T))]=\lambda b,\\ -\mathbf{R}^T[(\mathbf{x}(T+\delta T)+\delta\mathbf{x}(T+\delta T)]=-b.\end{aligned} \tag{5}$$

Из (5) и (3), принимая во внимание, что $\delta(\gamma T)$, δT и $\delta\mathbf{x}(t)$ являются малыми величинами, найдем

$$\begin{aligned}\mathbf{R}^T[\dot{\mathbf{x}}^-(\gamma T)\delta(\gamma T)+\delta\mathbf{x}^-(\gamma T)]=0,\\ \mathbf{R}^T[(\dot{\mathbf{x}}(T)\delta T+\delta\mathbf{x}^-(T)]=0.\end{aligned} \tag{6}$$

В равенствах (6) символом «минус» обозначены пределы слева. Далее, в них опущены величины, имеющие порядок малости выше первого. Из (6) следует

$$\delta(\gamma T)=-\frac{\mathbf{R}^T\delta\mathbf{x}^-(\gamma T)}{\mathbf{R}^T\dot{\mathbf{x}}^-(\gamma T)}, \tag{7}$$

$$\delta T=-\frac{\mathbf{R}^T\delta\mathbf{x}^-T}{\mathbf{R}^T\dot{\mathbf{x}}^-T}. \tag{8}$$

Запишем уравнение (1) для параметрически возмущенной траектории, полагая $u(t)$ фиксированной величиной

$$\frac{d[\mathbf{x}(t)+\delta\mathbf{x}(t)]}{dt}=\mathbf{f}(\mathbf{x}+\delta\mathbf{x},\alpha+\delta\alpha,u). \tag{9}$$

В качестве фиксированных (см.рис.3) рассматриваются значения $u(t)=A, u(t)=-A,\ u(t)=0$. Будем, далее, полагать, что функция $\mathbf{f}$ непрерывно дифференцируема по $\mathbf{x}$ и α и непрерывна по u. Из (9), опуская величины, имеющие порядок малости выше первого относительно $\delta\mathbf{x}$ и $\delta\alpha$, найдем

$$\frac{d\delta\mathbf{x}(t)}{dt}=\frac{\partial\mathbf{f}(\mathbf{x},\alpha,u)}{\partial\mathbf{x}}\delta\mathbf{x}+\frac{\partial\mathbf{f}(\mathbf{x},\alpha,u)}{\partial\alpha}\delta\alpha. \tag{10}$$

Равенство (10) связывает между собой отклонение траектории движения $\mathbf{x}(t)$ с отклонением параметра α и называется уравнением в вариациях. Оно представляет собой неоднородное линейное дифференциальное уравнение с переменными во времени коэффициентами.

Траектория $\tilde{\mathbf{x}}(t)$ непрерывна в момент $\gamma T+\delta(\gamma T)$. Поэтому можно записать

$$\mathbf{x}^-(\gamma T+\delta(\gamma T))+\delta\mathbf{x}^-(\gamma T+\delta(\gamma T))=\mathbf{x}^+(\gamma T+\delta(\gamma T))+\delta\mathbf{x}^+(\gamma T+\delta(\gamma T)). \tag{11}$$

Учитывая непрерывность траектории $\mathbf{x}(t)$ и опуская в (11) величины, имеющие порядок малости выше первого, получим

$$\delta\mathbf{x}^+(\gamma T)=\delta\mathbf{x}^-(\gamma T)+[\dot{\mathbf{x}}^-(\gamma T)-\dot{\mathbf{x}}^+(\gamma T)]\delta(\gamma T). \tag{12}$$

Здесь и в дальнейшем символом «минус» обозначаются пределы слева, а символом «плюс» - пределы справа.

На траектории $\mathbf{x}(t)$ управление $u(t)$ принимает значения $u=A, u=0$, $u=-A$. Обозначим $\mathbf{V}_1(t,t_0)$ нормированную фундаментальную матрицу решений уравнения

$$\frac{d\mathbf{x}(t)}{dt}=\frac{\partial\mathbf{f}(\mathbf{x},\alpha,u)}{\partial\mathbf{x}} \tag{13}$$

при $u=A$, $\mathbf{V}_2(t,t_0)$ при $u=0$, здесь t_0 – начальный момент времени.

Пусть, далее, $\mathbf{r}^1(t)$ является решением уравнения (10) при $\delta\mathbf{x}(0)=0$, $u=A$ и $\delta\alpha=1$. Тогда

$$\delta\mathbf{x}^-(\gamma T)=\mathbf{V}_1(\gamma T,0)\delta\mathbf{x}(0)+\mathbf{r}^1(\gamma T)\delta\alpha. \tag{14}$$

В соответствии с (7), (12) и (14)

$$\delta\mathbf{x}^+(\gamma T)=\mathbf{P}\delta\mathbf{x}(0)+\mathbf{Q}\delta\alpha, \tag{15}$$

где

$$\mathbf{P}=\mathbf{V}_1(\gamma T,0)-\frac{(\dot{\mathbf{x}}^-(\gamma T)-\dot{\mathbf{x}}^+(\gamma T))\mathbf{R}^T\mathbf{V}_1(\gamma T,0)}{\mathbf{R}^T\dot{\mathbf{x}}^-(\gamma T)},$$

$$\mathbf{Q}=\mathbf{r}^1(\gamma T)-\frac{(\dot{\mathbf{x}}^-(\gamma T)-\dot{\mathbf{x}}^+(\gamma T))\mathbf{R}^T\mathbf{r}^1(\gamma T)}{\mathbf{R}^T\dot{\mathbf{x}}^-(\gamma T)}.$$

Ниже в выражениях, в которых в скобках, наряду с текущим или конечным временем, указывается начальное время, оно записывается после запятой, например, $\mathbf{V}(t,t_0)$.

Обозначим $\mathbf{r}^2(t,\gamma T)$ $(t>\gamma T)$ решение уравнения (10) при $\delta\mathbf{x}(\gamma T)=0$, $u=0$, $\delta\alpha=1$. Тогда

$$\delta\mathbf{x}^-(T)=\mathbf{V}_2(T,\gamma T)\delta\mathbf{x}^+(\gamma T)+\mathbf{r}^2(T,\gamma T)\delta\alpha.$$

Принимая во внимание (15), получим

$$\delta\mathbf{x}^-(T)=\mathbf{M}_0\delta\mathbf{x}(0)+\mathbf{N}_0\delta\alpha, \tag{16}$$

здесь

$$\mathbf{M}_0=\mathbf{V}_2(T,\gamma T)\mathbf{P},$$

$$\mathbf{N}_0=\mathbf{V}_2(T,\gamma T)\mathbf{Q}+\mathbf{r}^2(T,\gamma T).$$

Воспользуемся симметрией параметрически возмущенной траектории $\tilde{\mathbf{x}}(t)=\mathbf{x}(t)+\delta\mathbf{x}(t)$:

$$-\mathbf{x}^-(T+\delta T)-\delta\mathbf{x}^-(T+\delta T)=\mathbf{x}(0)+\delta\mathbf{x}(0). \tag{17}$$

Опуская величины, имеющие порядок малости выше первого, и принимая во внимание непрерывность траектории $\mathbf{x}(t)$, из (17) найдем

$$-\delta\mathbf{x}^-(T)-\dot{\mathbf{x}}^-(T)\delta T=\delta\mathbf{x}(0).$$

Учитывая (16), получим равенство

$$\left[-\mathbf{I}-\mathbf{M}_0+\frac{\dot{\mathbf{x}}^-(T)\mathbf{R}^T\mathbf{M}_0}{\mathbf{R}^T\dot{\mathbf{x}}^-(T)}\right]\delta\mathbf{x}(0)=\left[\mathbf{N}_0-\frac{\dot{\mathbf{x}}^-(T)\mathbf{R}^T\mathbf{N}_0}{\mathbf{R}^T\dot{\mathbf{x}}^-(T)}\right]\delta\alpha,$$

из которого следует, что

$$\delta\mathbf{x}(0)=\mathbf{L}\delta\alpha, \tag{18}$$

где

$$\mathbf{L}=\left[-\mathbf{I}-\mathbf{M}_0+\frac{\dot{\mathbf{x}}^-(T)\mathbf{R}^T\mathbf{M}_0}{\mathbf{R}^T\dot{\mathbf{x}}^-(T)}\right]^{-1}\left[\mathbf{N}_0-\frac{\dot{\mathbf{x}}^-(T)\mathbf{R}^T\mathbf{N}_0}{\mathbf{R}^T\dot{\mathbf{x}}^-(T)}\right].$$

На периодической траектории $\mathbf{x}(t)$ в момент $t=\gamma T$ происходит переключение управления с $u=A$ на $u=0$ (рис. 3). В соответствии с уравнением (10)

$$\delta\mathbf{x}(t)=\begin{cases}\mathbf{V}_1(t,0)\delta\mathbf{x}(0)+\mathbf{r}^1(t)\delta\alpha & \text{при } 0<t<\gamma T,\\ \mathbf{V}_2(t,\gamma T)\delta\mathbf{x}^+(\gamma T)+\mathbf{r}^2(t,\gamma T)\delta\alpha & \text{при } \gamma\Gamma<t<T.\end{cases} \tag{19}$$

Принимая во внимание полученные выше равенства, представим (19) в виде

$$\delta\mathbf{x}(t)=\begin{cases}[\mathbf{V}_1(t,0)\mathbf{L}+\mathbf{r}^1(t)]\delta\alpha \ \text{ при } 0<t<\gamma T,\\ [\mathbf{V}_2(t,\gamma T)(\mathbf{PL}+\mathbf{Q})+\mathbf{r}^2(t,\gamma T)]\delta\alpha \ \text{ при } \gamma\mathrm{T}<t<T.\end{cases} \tag{20}$$

По определению функция чувствительности периодической траектории

$$\frac{\delta\mathbf{x}(t)}{d\alpha}=\lim_{\delta\alpha\to 0}\frac{\mathbf{x}(t)+\delta\mathbf{x}(t)-\mathbf{x}(t)}{\delta\alpha}=\boldsymbol{\rho}(t), \tag{21}$$

здесь

$$\boldsymbol{\rho}(t)=\begin{cases}\mathbf{V}_1(t,0)\mathbf{L}+\mathbf{r}^1(t) \ \text{ при } 0<t<\gamma T,\\ \mathbf{V}_2(t,\gamma T)(\mathbf{PL}+\mathbf{Q})+\mathbf{r}^2(t,\gamma T) \ \text{при } \gamma\mathrm{T}<t<T.\end{cases}$$

Установим чувствительность момента γT и периода автоколебаний $2T$.

В соответствии с равенством (7)

$$\delta(\gamma T)=-\frac{\mathbf{R}^T[\mathbf{V}_1(\gamma T,0)\mathbf{L}+\mathbf{r}^1(\gamma T)]\delta\alpha}{\mathbf{R}^T\dot{\mathbf{x}}^-(\gamma T)}. \tag{22}$$

Из (22) следует, что функция чувствительности

$$\frac{d(\gamma T)}{d\alpha}=-\frac{\mathbf{R}^T[\mathbf{V}_1(\gamma T,0)\mathbf{L}+\mathbf{r}^1(\gamma T)]}{\mathbf{R}^T\dot{\mathbf{x}}^-(\gamma T)}.$$

Далее, принимая во внимание (8) и (20), найдем

$$\delta T=-\frac{\mathbf{R}^T[\mathbf{V}_2(T,\gamma T)(\mathbf{PL}+\mathbf{Q})+\mathbf{r}^2(T,\gamma T)]\delta\alpha}{\mathbf{R}^T\dot{\mathbf{x}}^-(T)}. \tag{23}$$

Периодическая траектория $\tilde{\mathbf{x}}(t)$ имеет период $2(T+\delta T)$. Чувствительность периода автоколебаний к изменению параметра α

$$\frac{d(2T)}{d\alpha}=-\frac{2\mathbf{R}^T[\mathbf{V}_2(T,\gamma T)(\mathbf{PL}+\mathbf{Q})+\mathbf{r}^2(T,\gamma T)]}{\mathbf{R}^T\dot{\mathbf{x}}^-(T)}. \tag{24}$$

Чувствительность критерия устойчивости колебаний. В релейных автоколебательных системах, как правило, оценивается асимптотическая орбитальная устойчивость автоколебаний [6,7]. Для релейной системы (1), (2) устойчивость периодической траектории $\mathbf{x}(t)$ оценивается [5] по собственным числам матрицы

$$\mathbf{G}=\mathbf{G}_2\mathbf{G}_1, \tag{25}$$

где

$$\mathbf{G}_1=\mathbf{V}_1(\gamma T,0)-\frac{\dot{\mathbf{x}}^-(\gamma T)\mathbf{R}^T\mathbf{V}_1(\gamma T,0)}{\mathbf{R}^T\dot{\mathbf{x}}^-(\gamma T)}, \tag{26}$$

$$\mathbf{G}_2=\mathbf{V}_2(T,\gamma T)-\frac{\dot{\mathbf{x}}^-(T)\mathbf{R}^T\mathbf{V}_2(T,\gamma T)}{\mathbf{R}^T\dot{\mathbf{x}}^-(T)}, \tag{27}$$

Определим устойчивость периодической траектории $\tilde{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{x}(t) + \delta\mathbf{x}(t)$. Возмущенную (малым изменением начального условия) траекторию обозначим $\hat{\mathbf{x}}(t) = \tilde{\mathbf{x}}(t) + \delta\tilde{\mathbf{x}}(t)$. Запишем уравнение в вариациях

$$\frac{d\delta\tilde{\mathbf{x}}(t)}{dt} = \frac{\partial \mathbf{f}(\tilde{\mathbf{x}}, \alpha + \delta\alpha, u)}{\partial\tilde{\mathbf{x}}}\delta\tilde{\mathbf{x}}(t).$$

Обозначим

$$\mathbf{M}(\mathbf{x}, \alpha, u) = \frac{\partial \mathbf{f}(\mathbf{x}, \alpha, u)}{\partial\tilde{\mathbf{x}}}.$$

Тогда

$$\frac{\partial \mathbf{f}(\tilde{\mathbf{x}}, \alpha + \delta\alpha, u)}{\partial\tilde{\mathbf{x}}} = \mathbf{M}(\mathbf{x} + \delta\mathbf{x}, \alpha + \delta\alpha, u).$$

Выше было установлено, что

$$\tilde{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{x}(t) + \boldsymbol{\rho}(t)\delta\alpha$$

и, следовательно,

$$\frac{d\delta\tilde{\mathbf{x}}}{dt} = \mathbf{M}(\mathbf{x} + \boldsymbol{\rho}\delta\alpha, \alpha + \delta\alpha, u)\delta\tilde{\mathbf{x}}.$$

Так как $\delta\alpha$ является малой величиной, то можно записать

$$\frac{d\delta\tilde{\mathbf{x}}}{dt} = \mathbf{M}(\mathbf{x}, \alpha, u)\delta\tilde{\mathbf{x}} + \mathbf{N}(\mathbf{x}, \alpha, u)\delta\alpha\delta\tilde{\mathbf{x}}, \tag{28}$$

здесь

$$\mathbf{N}(\mathbf{x}, \alpha, u) = \frac{d}{d\delta\alpha}[\mathbf{M}(\mathbf{x} + \boldsymbol{\rho}\delta\alpha, \alpha + \delta\alpha, u]\Big|_{\delta\alpha=0}.$$

Во избежание недоразумений отметим, что $\delta\alpha$ входит в определение траектории $\tilde{\mathbf{x}}(t)$, т.е. $\delta\alpha$ и $\delta\tilde{\mathbf{x}}$ – независимые малые величины.

В [1] установлено, что линеаризованные по α (не учитываются величины, имеющие порядок малости выше первого) нормированные фундаментальные матрицы решений (в зависимости от величины управления) уравнения (28) задаются равенствами

$$\tilde{\mathbf{V}}_1(t,0) = \mathbf{V}_1(t,0) + \mathbf{V}_1^{\alpha}(t,0)\delta\alpha, \tag{29}$$

$$\tilde{\mathbf{V}}_2(t,\gamma T) = \mathbf{V}_2(t,\gamma T) + \mathbf{V}_2^{\alpha}(t,\gamma T)\delta\alpha. \tag{30}$$

В равенстве (29) $\mathbf{V}_1^{\alpha}(t,0)$ является матрицей [1] ,столбцы которой образованы векторами $\mathbf{m}^1(t), \mathbf{m}^2(t)$, …, $\mathbf{m}^n(t)$, причем каждый вектор $\mathbf{m}^i(t)$ является решением уравнения

$$\frac{d\mathbf{m}}{dt} = \mathbf{M}(\mathbf{x}, \alpha, A)\mathbf{m} + \mathbf{N}(\mathbf{x}, \alpha, A)\delta\tilde{\mathbf{x}}^0(t) \tag{31}$$

при $\mathbf{m}(0)=0$. Это решение зависит от функции $\delta\tilde{\mathbf{x}}^0(t)$. Входящий в уравнение (31) вектор $\delta\tilde{\mathbf{x}}^0(t)$ представляет собой столбец матрицы $\mathbf{V}_1(t,0)$, причем вектору $\mathbf{m}^i(t)$ соответствует *i*-ый столбец матрицы $\mathbf{V}_1(t,0)$.

Далее, вектор $\mathbf{V}_2^{\alpha}(t,\gamma T)$ является матрицей, столбцы которой образованы векторами $\mathbf{q}^1(t)$, $\mathbf{q}^2(t),\ldots,$ $\mathbf{q}^n(t)$ $(t\geq\gamma T)$. Каждый вектор $\mathbf{q}^i(t)$ является решением уравнения

$$\frac{d\mathbf{q}}{dt}=\mathbf{M}(\mathbf{x},\alpha,0)\mathbf{q}+\mathbf{N}(\mathbf{x},\alpha,0)\delta\tilde{\mathbf{x}}^0(t,\gamma T),\ \ t\geq\gamma T, \tag{32}$$

при $\mathbf{q}(\gamma T)=0$. В равенстве (32) вектор $\delta\tilde{\mathbf{x}}^0(t,\gamma T)$ является столбцом матрицы $\mathbf{V}_2(t,\gamma T)$. Вектору $\mathbf{q}^i(t)$ соответствует *i*-ый столбец матрицы $\mathbf{V}_2(t,\gamma T)$.

В соответствии с (25) – (27) матрица устойчивости периодической траектории $\tilde{\mathbf{x}}(t)$ задается равенством

$$\tilde{\mathbf{G}}=\tilde{\mathbf{G}}_2\tilde{\mathbf{G}}_1,$$

где

$$\tilde{\mathbf{G}}_1=\tilde{\mathbf{V}}_1(\gamma T+\delta(\gamma T),0)-\frac{\dot{\tilde{\mathbf{x}}}(\gamma T+\delta(\gamma T))\mathbf{R}^T\tilde{\mathbf{V}}_1(\gamma T+\delta(\gamma T),0)}{\mathbf{R}^T\dot{\tilde{\mathbf{x}}}(\gamma T+\delta(\gamma T))}, \tag{32}$$

$$\tilde{\mathbf{G}}_2=\tilde{\mathbf{V}}_2(T+\delta T,\gamma T+\delta(\gamma T))-\frac{\dot{\tilde{\mathbf{x}}}(T+\delta T)\mathbf{R}^T\tilde{\mathbf{V}}_2(T+\delta T,\gamma T+\delta(\gamma T))}{\mathbf{R}^T\dot{\tilde{\mathbf{x}}}(T+\delta T)}, \tag{33}$$

Рассмотрим сначала матрицу $\tilde{\mathbf{G}}_1$. Принимая во внимание равенство (29), вид функции $\tilde{\mathbf{x}}(t)$ и учитывая, что $\delta\mathbf{x}(t)$, $\delta\alpha$ и $\delta(\gamma T)$ являются малыми величинами, получим

$$\tilde{\mathbf{G}}_1=\mathbf{V}_1(\gamma T,0)+\dot{\mathbf{V}}_1(\gamma T,0)\nu\delta\alpha+\mathbf{V}_1^{\alpha}(\gamma T,0)\delta\alpha-$$

$$-\frac{\dot{\mathbf{x}}^-(\gamma T)\mathbf{R}^T\mathbf{V}_1(\gamma T,0)+\ddot{\mathbf{x}}^-(\gamma T)\mathbf{R}^T\mathbf{V}_1(\gamma T,0)\nu\delta\alpha+\boldsymbol{\psi}\mathbf{R}^T\mathbf{V}_1(\gamma T,0)\delta\alpha}{\mathbf{R}^T[\dot{\mathbf{x}}^-(\gamma T)+\ddot{\mathbf{x}}^-(\gamma\mathrm{T})\nu\delta\alpha+\boldsymbol{\psi}\delta\alpha]}-$$

$$-\frac{\dot{\mathbf{x}}^-(\gamma T)\mathbf{R}^T\dot{\mathbf{V}}_1(\gamma T,0)\nu\delta\alpha+\dot{\mathbf{x}}^-(\gamma T)\mathbf{R}^T\mathbf{V}_1^{\alpha}(\gamma T,0)\delta\alpha}{\mathbf{R}^T[\dot{\mathbf{x}}^-(\gamma T)+\ddot{\mathbf{x}}^-(\gamma\mathrm{T})\nu\delta\alpha+\boldsymbol{\psi}\delta\alpha]}, \tag{34}$$

здесь

$$\nu=-\frac{\mathbf{R}^T[\mathbf{V}(\gamma T,0)\mathbf{L}+\mathbf{r}^1(\gamma T,0)]}{\mathbf{R}^T\dot{\mathbf{x}}^-(T)},$$

$$\boldsymbol{\psi}=\mathbf{M}(\mathbf{x}(\gamma T),\alpha,A)\boldsymbol{\rho}^-(\gamma T)+\frac{\partial\mathbf{f}(\mathbf{x}(\gamma T),\alpha,A)}{\partial\alpha}.$$

В равенстве (34) опущены величины, имеющие порядок малости выше первого относительно $\delta\alpha$.

Ниже равенства, в которых опущены величины, имеющие порядок малости выше первого, будем записывать, не оговаривая это особо.

Представим (34) в виде

$$\tilde{\mathbf{G}}_1 = \mathbf{V}_1(\gamma T,0) + (\dot{\mathbf{V}}_1(\gamma T,0)\nu + \mathbf{V}^{\alpha}(\gamma T,0))\delta\alpha - \\ - \frac{\dot{\mathbf{x}}^{-}(\gamma T)\mathbf{R}^T\mathbf{V}_1(\gamma T,0) + \tilde{\mathbf{Q}}\delta\alpha}{\mathbf{R}^T[\dot{\mathbf{x}}^{-}(\gamma T) + (\ddot{\mathbf{x}}^{-}(\gamma T)\nu + \boldsymbol{\psi})\delta\alpha]}, \tag{35}$$

здесь

$$\tilde{\mathbf{Q}} = \ddot{\mathbf{x}}^{-}(\gamma T)\mathbf{R}^T\mathbf{V}_1(\gamma T,0)\nu + \boldsymbol{\psi}\mathbf{R}^T\mathbf{V}_1(\gamma T,0) + \dot{\mathbf{x}}^{-}(\gamma T)\mathbf{R}^T\dot{\mathbf{V}}_1(\gamma T,0)\nu + \\ + \dot{\mathbf{x}}^{-}(\gamma T)\mathbf{R}^T\mathbf{V}^{\alpha}(\gamma T,0).$$

Выполним линеаризацию по $\delta\alpha$ входящей в равенство (35) дроби в окрестности точки $\delta\alpha=0$. В результате получим:

$$\tilde{\mathbf{G}}_1 = \mathbf{W}_1 + \mathbf{W}_1^{\alpha}\delta\alpha,$$

где

$$\mathbf{W}_1 = \mathbf{V}_1(\gamma T,0) - \frac{\dot{\mathbf{x}}^{-}(\gamma T)\mathbf{R}^T\mathbf{V}_1(\gamma T,0)}{\mathbf{R}^T\dot{\mathbf{x}}^{-}(\gamma T)},$$

$$\mathbf{W}_1^{\alpha} = \dot{\mathbf{V}}_1(\gamma T,0)\nu - \mathbf{V}^{\alpha}(\gamma T,0) - \\ - \frac{\mathbf{R}^T\dot{\mathbf{x}}^{-}(\gamma T)\tilde{\mathbf{Q}} - \mathbf{R}^T(\ddot{\mathbf{x}}^{-}(\gamma T)\nu + \boldsymbol{\psi})\dot{\mathbf{x}}^{-}(\gamma T)\mathbf{R}^T\mathbf{V}_1(\gamma T,0)}{[\mathbf{R}^T\dot{\mathbf{x}}^{-}(\gamma T)]^2}. \tag{36}$$

На периодической траектории $\mathbf{x}(t)$ переключение управления с $u=A$ на $u=0$ происходит в момент γT, а на $\tilde{\mathbf{x}}(t)-$ в момент $\gamma T + \delta(\gamma T)$ $(\delta(\gamma T) = \nu\delta\alpha)$.

Рассмотрим матрицу $\tilde{\mathbf{G}}_2(t)$:

$$\tilde{\mathbf{G}}_2 = \tilde{\mathbf{V}}_2(T+\delta T, \gamma T + \delta(\gamma T)) - \frac{\dot{\tilde{\mathbf{x}}}^{-}(T+\delta T)\mathbf{R}^T\tilde{\mathbf{V}}_2(T+\delta T, \gamma T + \delta(\gamma T))}{\mathbf{R}^T\dot{\tilde{\mathbf{x}}}^{-}(T+\delta T)}. \tag{37}$$

Выше было установлено

$$\tilde{\mathbf{V}}_2(t) = \mathbf{V}_2(t) + \mathbf{V}_2^{\alpha}(t)\delta\alpha.$$

Представим равенство (37) в виде

$$\tilde{\mathbf{G}}_2 = \mathbf{V}_2(T+\mu\delta\alpha, \gamma T + \nu\delta\alpha) + \mathbf{V}_2^{\alpha}(T+\mu\delta\alpha, \gamma T + \nu\delta\alpha) - \\ - \frac{[\dot{\mathbf{x}}^{-}(T+\mu\delta\alpha) + \delta\dot{\mathbf{x}}^{-}(T+\mu\delta\alpha)]\mathbf{R}^T}{\mathbf{R}^T[\dot{\mathbf{x}}^{-}(T+\mu\delta\alpha) + \delta\dot{\mathbf{x}}^{-}(T+\mu\delta\alpha)]} \times \\ \times[\mathbf{V}_2(T+\mu\delta\alpha, \gamma T + \nu\delta\alpha) + \mathbf{V}_2^{\alpha}(T+\mu\delta\alpha, \gamma T + \nu\delta\alpha)], \tag{38}$$

где

$$\mu = -\frac{\mathbf{R}^T[\mathbf{V}(T,\gamma T)(\mathbf{PL}+\mathbf{Q})+\mathbf{r}^2(T,\gamma T)]}{\mathbf{R}^T\dot{\mathbf{x}}^-(T)}. \qquad (39)$$

В равенстве (38) нормированные фундаментальные матрицы решений $\mathbf{V}_2$ и $\mathbf{V}_2^\alpha$ записаны следующим образом: выражение, стоящее в скобках перед запятой, задает конечное время, а после запятой – начальное.

Фундаментальная матрица решений $\mathbf{V}_2(t)$ формируется с точки переключения управления γT (начальная точка $\mathbf{V}_2(\gamma T)=\mathbf{I}$), а матрица $\tilde{\mathbf{V}}_2(t)$ с начальной точки $\gamma T+\delta(\gamma T)=\gamma T+\nu\delta\alpha$.

Легко видеть (см. [8]), что

$$\mathbf{V}_2(t,\gamma T+\nu\delta\alpha)=\mathbf{V}_2(t)\mathbf{V}_2^{-1}(\gamma T+\nu\delta\alpha)=\mathbf{V}_2(t)[\mathbf{V}_2^{-1}(\gamma T)+\dot{\mathbf{V}}_2^{-1}(\gamma T)\nu\delta\alpha]$$

является нормированной фундаментальной матрицей решений и, следовательно,

$$\mathbf{V}_2(T+\mu\delta\alpha,\gamma T+\nu\delta\alpha)=\mathbf{V}_2(T+\mu\delta\alpha)[\mathbf{V}_2^{-1}(\gamma T)+\dot{\mathbf{V}}_2^{-1}(\gamma T)\nu\delta\alpha]. \qquad (40)$$

Далее (см. [8]),

$$\dot{\mathbf{V}}^{-1}(t)=-\mathbf{V}^{-1}(t)\dot{\mathbf{V}}(t)\mathbf{V}^{-1}(t).$$

Таким образом

$$\mathbf{V}_2(T+\mu\delta\alpha,\gamma T+\nu\delta\alpha)=\mathbf{V}_2(T+\mu\delta\alpha)[\mathbf{V}_2^{-1}(\gamma T)-\mathbf{V}_2^{-1}(\gamma T)\dot{\mathbf{V}}_2(\gamma T)\mathbf{V}_2^{-1}(\gamma T)\nu\delta\alpha].$$

Матрица $\mathbf{V}_2(\gamma T)=\mathbf{I}$, здесь $\mathbf{I}$ – единичная матрица, и, следовательно

$$\begin{aligned}\mathbf{V}_2(T+\mu\delta\alpha,\gamma T+\nu\delta\alpha)&=\mathbf{V}_2(T+\mu\delta\alpha)[\mathbf{I}-\mathbf{I}\dot{\mathbf{V}}_2^{-1}(\gamma T)\mathbf{I}\nu\delta\alpha]=\\&=\mathbf{V}_2(T+\mu\delta\alpha)[\mathbf{I}-\dot{\mathbf{V}}_2(\gamma T)\nu\delta\alpha].\end{aligned} \qquad (41)$$

Представим

$$\mathbf{V}_2(T+\mu\delta\alpha)=\mathbf{V}_2(T)+\dot{\mathbf{V}}_2(T)\mu\delta\alpha.$$

Равенство (41) принимает окончательный вид

$$\begin{aligned}\mathbf{V}_2(T+\mu\delta\alpha,\gamma T+\nu\delta\alpha)&=\mathbf{V}_2(T)-\mathbf{V}_2(T)\dot{\mathbf{V}}_2(\gamma T)\nu\delta\alpha+\dot{\mathbf{V}}_2(T)\mu\delta\alpha=\\&=\mathbf{V}_2(T)+[\dot{\mathbf{V}}_2(T)\mu-\mathbf{V}_2(T)\dot{\mathbf{V}}_2(\gamma T)\nu]\delta\alpha.\end{aligned} \qquad (42)$$

Для параметрически возмущенной системы фундаментальная матрица решений

$$\tilde{\mathbf{V}}_2(t,\gamma T)=\mathbf{V}_2(t,\gamma T)+\mathbf{V}_2^\alpha(t,\gamma T)\delta\alpha,$$

где $\mathbf{V}_2^\alpha(\gamma T,\gamma T)=0$. Тогда

$$\mathbf{V}_2^\alpha(\gamma T+\nu\delta\alpha,\gamma T)\delta\alpha=[\mathbf{V}_2^\alpha(\gamma T,\gamma T)+\dot{\mathbf{V}}_2^\alpha(\gamma T)\nu\delta\alpha]\delta\alpha=0. \qquad (43)$$

В равенстве (43), как и выше, опущено слагаемое, имеющее порядок малости относительно $\delta\alpha$ выше первого.

Таким образом, матрица

$$\tilde{\mathbf{V}}_2(t,\gamma T+\delta(\gamma T))=\mathbf{V}_2(t)\dot{\mathbf{V}}_2^{-1}(\gamma T+\delta(\gamma T))+\mathbf{V}_2^\alpha(t,\gamma T+\delta(\gamma T))\delta\alpha \qquad (44)$$

является нормированной фундаментальной матрицей решений для параметрически возмущенной системы.

В соответствии с (44) и (42)

$$\tilde{\mathbf{V}}(T+\mu\delta\alpha,\gamma T+\nu\delta\alpha)=\mathbf{V}_2(T)+\boldsymbol{\Theta}\delta\alpha,$$

где

$$\boldsymbol{\Theta}=\dot{\mathbf{V}}_2(T)\mu-\mathbf{V}_2(T)\dot{\mathbf{V}}_2(\gamma T)\nu+\mathbf{V}_2^{\alpha}(T).$$

Упростим равенство (38)

$$\tilde{\mathbf{G}}_2=\mathbf{V}_2(T)+\boldsymbol{\lambda}\delta\alpha-\frac{[\dot{\mathbf{x}}^-(T)+\ddot{\mathbf{x}}^-(T)\mu\delta\alpha+\delta\dot{\mathbf{x}}^-(T)]\mathbf{R}^T[\mathbf{V}_2(T)+\boldsymbol{\lambda}\delta\alpha]}{\mathbf{R}^T[\dot{\mathbf{x}}^-(T)+\ddot{\mathbf{x}}^-(T)\mu\delta\alpha+\delta\dot{\mathbf{x}}^-(T)]}.$$

В соответствии с (10)

$$\delta\dot{\mathbf{x}}^-(T)=\boldsymbol{\gamma}\delta\alpha,$$

где

$$\boldsymbol{\gamma}=\left[\mathbf{M}(\mathbf{x}(T),\alpha,0)\boldsymbol{\rho}(T)+\frac{\partial\mathbf{f}(\mathbf{x}(T),\alpha,0)}{\partial\alpha}\right].$$

Далее, из уравнения (1) следует

$$\ddot{\mathbf{x}}^-(T)=\boldsymbol{\eta},$$

здесь

$$\boldsymbol{\eta}=\mathbf{M}(\mathbf{x}(T),\alpha,0)\dot{\mathbf{x}}^-(T).$$

Матрица $\tilde{\mathbf{G}}_2$ принимает вид:

$$\tilde{\mathbf{G}}_2=\mathbf{V}_2(T)+\boldsymbol{\lambda}\delta\alpha-\frac{[\dot{\mathbf{x}}^-(T)+\boldsymbol{\Gamma}\delta\alpha]\mathbf{R}^T[\mathbf{V}_2(T)+\boldsymbol{\lambda}\delta\alpha]}{\mathbf{R}^T\dot{\mathbf{x}}^-(T)+\mathbf{R}^T\boldsymbol{\Gamma}\delta\alpha},$$

где

$$\boldsymbol{\Gamma}=(\boldsymbol{\eta}\mu+\boldsymbol{\gamma}).$$

Выполним линеаризацию дроби

$$\frac{[\dot{\mathbf{x}}^-(T)+\boldsymbol{\Gamma}\delta\alpha]\mathbf{R}^T[\mathbf{V}_2(T)+\boldsymbol{\Theta}\delta\alpha]}{\mathbf{R}^T\dot{\mathbf{x}}^-(T)+\mathbf{R}^T\boldsymbol{\Gamma}\delta\alpha}=\frac{\dot{\mathbf{x}}^-(T)\mathbf{R}^T\mathbf{V}_2(T)+\boldsymbol{\xi}\delta\alpha}{\mathbf{R}^T\dot{\mathbf{x}}^-(T)+\mathbf{R}^T\boldsymbol{\Gamma}\delta\alpha} \qquad (45)$$

по $\delta\alpha$ в окрестности точки $\delta\alpha=0$. В результате получим, что

$$\tilde{\mathbf{G}}=\mathbf{V}_2(T)-\frac{\dot{\mathbf{x}}^-(T)\mathbf{R}^T\mathbf{V}_2(T)}{\mathbf{R}^T\dot{\mathbf{x}}^-(T)}-\frac{\mathbf{R}^T\dot{\mathbf{x}}^-(T)\boldsymbol{\xi}-\mathbf{R}^T\boldsymbol{\Gamma}\dot{\mathbf{x}}^-(T)\mathbf{R}^T\mathbf{V}_2(T)}{[\mathbf{R}^T\dot{\mathbf{x}}^-(T)]^2}\delta\alpha+\boldsymbol{\Theta}\delta\alpha. \qquad (46)$$

В равенствах (45) и (46)

$$\boldsymbol{\xi}=\dot{\mathbf{x}}^-(T)\mathbf{R}^T\boldsymbol{\Theta}+\boldsymbol{\Gamma}\mathbf{R}^T\mathbf{V}_2(T).$$

Введем обозначения

$$\mathbf{W}_2=\mathbf{V}_2(T)-\frac{\dot{\mathbf{x}}^-(T)\mathbf{R}^T\mathbf{V}_2(T)}{\mathbf{R}^T\dot{\mathbf{x}}^-(T)},$$

$$\mathbf{W}_2^{\alpha}=\mathbf{\Theta}-\frac{\mathbf{R}^T\dot{\mathbf{x}}^-(T)\xi-\mathbf{R}^T\mathbf{\Gamma}\dot{\mathbf{x}}^-(T)\mathbf{R}^T\mathbf{V}_2(T)}{[\mathbf{R}^T\dot{\mathbf{x}}^-(T)]^2}.$$

Из выражения (46) следует

$$\tilde{\mathbf{G}}_2=\mathbf{W}_2+\mathbf{W}_2^{\alpha}\delta\alpha. \qquad (47)$$

Принимая во внимание (36) и (47), запишем для периодической траектории $\tilde{\mathbf{x}}(t)$ матрицу устойчивости:

$$\tilde{\mathbf{G}}=\tilde{\mathbf{G}}_2\tilde{\mathbf{G}}_1=\mathbf{W}_2\mathbf{W}_1+(\mathbf{W}_2^{\alpha}\mathbf{W}_1+\mathbf{W}_2\mathbf{W}_1^{\alpha})\delta\alpha. \qquad (48)$$

Устойчивость определяется по собственным числам матрицы $\tilde{\mathbf{G}}$. Если все ее собственные числа λ_j удовлетворяют неравенству

$$|\lambda_j|<1, \quad j=\overline{1,m},$$

то периодическая траектория асимпототически орбитально устойчива [5–7]. Собственные числа матрицы $\tilde{\mathbf{G}}$ являются корнями многочлена

$$\det[\lambda\mathbf{I}-\tilde{\mathbf{G}}]. \qquad (49)$$

Обозначим λ_j^0, $j=\overline{1,m}$, $m\le n$, собственные числа матрицы (48), если в ней положить $\delta\alpha=0$. По собственным числам λ_j^0 оценивается устойчивость периодической траектории $\mathbf{x}(t)$. Представим

$$\lambda_j=\lambda_j^0+\delta\lambda_j,$$

где приращение $\delta\lambda_j$ порождено вариацией $\delta\alpha$ параметра α. Ясно, что $\delta\lambda_j\to 0$ при $\delta\alpha\to 0$. Собственные числа λ_j^0 являются корнями многочлена (49) при $\delta\alpha=0$.

Пусть λ_j^0 – простое (не кратное) собственное число матрицы (25) (матрицы (48) при $\delta\alpha=0$). Положим в многочлене (49) $\lambda=\lambda_j^0+\delta\lambda_j$. Поскольку $\delta\lambda_j$ и $\delta\alpha$ являются зависимыми малыми величинами, то в многочлене $\det[(\lambda_j^0+\delta\lambda_j)\mathbf{I}-\tilde{\mathbf{G}}]$ можно приравнять к нулю произведения $\delta\alpha\delta\lambda$, а также $(\delta\lambda_j)^n$ при $n\ge 2$ как имеющие порядок малости выше первого. Собственное число λ_j^0 является корнем многочлена (49) при $\delta\alpha=0$ и поэтому после указанных сокращений получим многочлен первого порядка относительно $\delta\lambda_j$, т.е. равенство вида

$$f_j(\lambda_j^0)\delta\lambda_j=F_j(\lambda_j^0)\delta\alpha, \qquad (50)$$

где $f_j(\lambda_j^0)$ и $F_j(\lambda_j^0)$ – некоторые многочлены.

Из (50) следует, что

$$\delta\lambda_j = \frac{F_j(\lambda_j^0)}{f_j(\lambda_j^0)}\delta\alpha,$$

т.е. функция чувствительности собственного числа

$$\frac{d\lambda_j}{d\alpha} = \lim_{\delta\alpha\to 0}\frac{\lambda_j^0 + \delta\lambda_j - \lambda_j^0}{\delta\alpha} = \frac{F_j(\lambda_j^0)}{f_j(\lambda_0)}. \qquad (51)$$

В [1] показано, что равенства (50) и (51) справедливы и в случае кратного собственного числа λ_j^0. Но тогда (51) приводит к неопределенности вида «ноль» деленный на «ноль» и требуется ее раскрытие, например, по правилу Лопиталя.

Выше получение функций чувствительности рассмотрено при изменении одного скалярного параметра объекта управления. При изменении в объекте нескольких параметров функции чувствительности по каждому параметру определяются изложенным выше способом. Отклонения характеристик системы, обусловленные изменением нескольких параметров, находятся путем суммирования отклонений, порожденных вариацией каждого из параметров.

Далее, в работе для получения функций чувствительности используются точные методы исследования автоколебаний. Это гарантирует справедливость самих функций чувствительности.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант №14-08-00662).

Список литературы

1. Моржов А.В., Фалдин Н.В. Функции чувствительности характеристик автоколебаний в релейных системах с нелинейным объектом управления // Известия РАН. Теория и системы управления, 2014. №6. С. 14 – 24.

2. Фалдин Н.В., Моржов А.В. Чувствительность ошибки слежения к изменению параметров объекта управления в релейной автоколебательной системе // Мехатроника, автоматизация, управление, 2015. Т. 16. № 2. С. 81 – 88.

3. Фалдин Н.В., Моржов А.В. Чувствительность вынужденных периодических движений релейной системы к изменению параметров объекта управления // Мехатроника, автоматизация, управление, 2015. Т. 16. № 11. С. 721 – 730.

4. Моржов А.В., Фалдин Н.В. Чувствительность ошибки слежения в релейной системе, работающей в режиме вынужденных колебаний // Известия РАН. Теория и системы управления, 2016. №3. С. 84 – 96.

5. Фалдин Н.В. Релейные системы автоматического управления /под. ред. К.А. Пупкова, Н.Д. Егупова // Математические модели, динамические характеристики и анализ систем автоматического управления. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. С. 573 – 636.

6. Андронов А.А., Витт А.А., Хайкин С.Э. Теория колебаний. М.: Физматгиз, 1959. 914 с.

7. Ким Д.П. Теория автоматического управления: учебное пособие для вузов. Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы. Т. 2. М.: Физматлит, 2004. 464 с.

8. Демидович Б.П. Лекции по математической теории устойчивости. М.: Наука, 1967. 472 с.

Фалдин Николай Васильевич, д-р техн. наук, проф., nvfaldin@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Моржов Александр Владимирович, канд. техн. наук, доц., morzhov@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

SENSITIVITY OF CHARACTERISTICS OF SELF-OSCILLATIONS IN SYSTEMS WITH THREE-POSITION RELAY BLOCK

N.V. Faldin, A.V. Morzhov

Systems with three-position relay element and nonlinear plant is offered. Methods of determining of self-oscillations sensitivity functions (periodic trajectory, frequency, criterion of stability) are designed.

Key words: three-position relay element, self-oscillations, sensitivity, periodic trajectory, frequency, criterion of stability.

Nikolay Vasilyevich Faldin, doctor of technical sciences, professor, nvfaldin@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Alexander Vladimirovich Morzhov, candidate of technical sciences, docent, morzhov@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 62-523

АНАЛИТИЧЕСКОЕ КОНСТРУИРОВАНИЕ РЕГУЛЯТОРОВ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ДВУХМАССОВОЙ СИСТЕМЫ Г-Д. УЧЕТ ОГРАНИЧЕНИЙ ТИПА НЕРАВЕНСТВ

П.Э. Подборский, Э.Н. Подборский

Анализируется электропривод постоянного тока двухмассовой системы генератор-двигатель. Предложен критерий оптимальности и получена аналитическая формула регулятора, позволяющего учесть ограничения типа неравенств на напряжение управления и все координаты.

Ключевые слова: электропривод постоянного тока, система управления, оптимальное управление, аналитическое конструирование регуляторов.

В 60-х годах XX века А.М. Летовым была разработана теория об аналитическом конструировании регуляторов [1], которая в итоге сводилась к динамическому программированию и выводу уравнения Риккати. Рассматривались линейные системы и квадратичные функционалы с минимизацией энергии управления, а также с минимизацией энергии и скорости изменения энергии управления. С тех пор по линейному квадратичному регулированию было опубликовано огромное число материалов, основные результаты развития данной теории можно найти в работах Брайсона [2], Атанса и Фалба [3], Калмана [4], Квакернаака [5], Цитрона [6] и др. В [7] данная теория несколько развита. В частности: решена задача не перевода системы в начало координат, а минимизации около любого установившегося значения выхода; получена система управления не с обратной связью, а программного управления (что особенно важно для разработки современных электроприводов [8]); учтено возможное наличие комплексных корней в характеристическом полиноме системы; время регулирование не обязательно было равно бесконечности. Во второй статье теории Летова дается решение для замкнутой области, содержащей границу отклонения регулирующего органа. Показано, что оптимальное управление состоит из движения по границе области и движения, при котором управление не выходит за допустимое значение. Точка сопряжения этих движений рассчитана при помощи условий Вейерштрасса-Эрдмана. Алгоритмизировать универсально такой расчет всех постоянных и времени выхода на угловую точку невозможно, т.е. эту процедуру не запрограммировать, а значит применить на практике данный регулятор тоже затруднительно. Также довольно трудно учесть ограничения на координаты. Попробуем обойти данные ограничения для конкретного объекта управления.

Постановка задачи. Разработать метод, позволяющий для двухмассовой системы генератор-двигатель электропривода постоянного тока вывести аналитическую формулу закона оптимального управления с прямым или косвенным учетом ограничений типа неравенств, как на управление, так и на все координаты.

Математическое описание объекта управления. Рассмотрим электропривод постоянного тока независимого возбуждения с неизменным потоком возбуждения. Питание двигателя осуществляется по цепи якоря от генератора постоянного тока с возбуждением, например, от тиристорного возбудителя. Математическая модель данной двухмассовой системы может быть представлена в следующем виде:

$$\begin{cases} K_{\text{в}} \cdot U_{\text{у}} = R_{\text{в}} \cdot i_{\text{в}} + L_{\text{в}} di_{\text{в}} / dt, \\ K_{\text{г}} \cdot i_{\text{в}} = R_a \cdot i_a + L_a di_a / dt + C \cdot \omega_1, \\ J_1 d\omega_1 / dt = M - M_{\text{у}}, \\ M_{\text{у}} = c_{12}(\varphi_1 - \varphi_2) + \beta_{12}(\omega_1 - \omega_2), \\ J_2 d\omega_2 / dt = M_{\text{у}}, \end{cases} \qquad (1)$$

где $i_{\text{в}}$, i_a, ω_1, ω_2 – ток возбуждения, ток якоря и угловые скорости первой и второй массы; $U_{\text{у}}$ – напряжение управления; $K_{\text{в}}$, $K_{\text{г}}$ – коэффициенты передачи возбудителя и генератора; $R_{\text{в}}$, R_a, $L_{\text{в}}$, L_a – активные сопротивления и индуктивности обмоток возбудителя и якоря; J_1, J_2 – приведенные моменты инерции первой и второй массы, C – конструктивная постоянная; $M = C \cdot i_a$, $M_{\text{у}}$ – электромагнитный момент и упругий момент двухмассовой системы, c_{12}, β_{12}, φ_1, φ_2 – жесткость, вязкое трение и углы поворота первой и второй массы.

Если за ток возбуждения базовый $I_{\text{вб}}$ принять номинальный ток возбуждения, за ток якоря базовый $I_{\text{аб}}$ - максимальный (стопорный) ток якоря двигателя, за момент базовый $M_{б} = I_{\text{аб}} \cdot C$ - максимально допустимый электромагнитный момент, за напряжение управление базовое $U_{\text{б}}$ - номинальное напряжение управления и за угловую скорость базовую $\omega_{\text{б}}$ - номинальную угловую скорость двигателя, то, введя следующие координаты в относительных единицах

$$x_0 = \frac{i_{\text{в}}}{I_{\text{вб}}};\ x_1 = \frac{i_a}{I_{a\text{б}}};\ x_2 = \frac{\omega_1}{\omega_{\text{б}}};$$

$$x_3 = \frac{M_{\text{у}}}{M_{\text{б}}};\ x_4 = \frac{\omega_2}{\omega_{\text{б}}};\ u = \frac{U_{\text{у}}}{U_{\text{б}}},$$

получим электромеханическую систему в формализованном виде:

$$\begin{cases} \dot{x}_0 = -a_{00}x_0 + bu, \\ \dot{x}_1 = a_{10}x_0 - a_{11}x_1 - a_{12}x_2, \\ \dot{x}_2 = a_{21}x_1 - a_{23}x_3, \\ \dot{x}_3 = a_{31}x_1 - a_{32}x_2 - a_{33}x_3 - a_{34}x_4, \\ \dot{x}_4 = a_{43}x_3, \end{cases} \quad (2)$$

где

$$b = \frac{K_{\text{в}} \cdot U_{\text{б}}}{L_{\text{в}} \cdot I_{\text{вб}}};\ a_{00} = \frac{R_{\text{в}}}{L_{\text{в}}};\ a_{10} = \frac{K_{\text{г}} \cdot I_{\text{вб}}}{L_a \cdot I_{a\text{б}}};\ a_{11} = \frac{R_a}{L_a};$$

$$a_{12} = \frac{C \cdot \omega_{\text{б}}}{L_a \cdot I_{a\text{б}}};\ a_{21} = a_{23} = \frac{M_{\text{б}}}{J_1 \cdot \omega_{\text{б}}};\ a_{31} = \frac{\beta_{12}}{J_1};\ a_{32} = a_{34} = \frac{c_{12} \cdot \omega_{\text{б}}}{M_{\text{б}}};$$

$$a_{33} = \frac{\beta_{12}}{J_1 \cdot J_2} \cdot (J_1 + J_2);\ a_{43} = \frac{M_{\text{б}}}{J_2 \cdot \omega_{\text{б}}}.$$

Необходимо ввести также ограничение на управление $|u| \le 4$, т.е. предусмотрим четырехкратную форсировку возбудителя, а также ограничение на все координаты $x_i \le 1$.

Далее будем исследовать только процессы пуска до номинальной скорости.

Оптимизация линейной системы без учета ограничений. Сначала найдем оптимальное управление для линейной системы без ограничений типа неравенств. В качестве примера критерия оптимальности возьмем квадратичный функционал следующего вида:

$$J = \int_0^t \left(q_2 (z_2 - x_2)^2 + r(z_u - u)^2 \right) dt = \int_0^t f dt, \quad (3)$$

где z_2, z_u – желаемые установившиеся значения скорости первой массы и управления; q_2, r – весовые коэффициенты.

Известно, что для решения такой задачи на условный экстремум нужно составить для подынтегральной функции f из (3) систему уравнений Эйлера-Лагранжа:

$$\begin{cases} F_{x_0} - \frac{d}{dt}F_{\dot{x}_0} = 0, \\ F_{x_1} - \frac{d}{dt}F_{\dot{x}_1} = 0, \\ F_{x_2} - \frac{d}{dt}F_{\dot{x}_2} = 0, \\ F_{x_3} - \frac{d}{dt}F_{\dot{x}_3} = 0, \\ F_{x_4} - \frac{d}{dt}F_{\dot{x}_4} = 0, \\ F_u - \frac{d}{dt}F_{\dot{u}} = 0, \end{cases} \quad \begin{cases} F_{\lambda_0} - \frac{d}{dt}F_{\dot{\lambda}_0} = 0, \\ F_{\lambda_1} - \frac{d}{dt}F_{\dot{\lambda}_1} = 0, \\ F_{\lambda_2} - \frac{d}{dt}F_{\dot{\lambda}_2} = 0, \\ F_{\lambda_3} - \frac{d}{dt}F_{\dot{\lambda}_3} = 0, \\ F_{\lambda_4} - \frac{d}{dt}F_{\dot{\lambda}_4} = 0, \end{cases}$$

где

$$F = q_0(z_0 - x_0)^2 + q_1(z_1 - x_1)^2 + q_2(z_2 - x_2)^2 +$$
$$+ q_3(z_3 - x_3)^2 + q_4(z_4 - x_4)^2 + r(z_u - u)^2 + \lambda_0(\dot{x}_0 + a_{00}x_0 - bu) +$$
$$+ \lambda_1(\dot{x}_1 - a_{10}x_0 + a_{11}x_1 + a_{12}x_2) + \lambda_2(\dot{x}_2 - a_{21}x_1 + a_{23}x_3) +$$
$$+ \lambda_3(\dot{x}_3 - a_{31}x_1 - a_{32}x_2 + a_{33}x_3 + a_{34}x_4) + \lambda_4(\dot{x}_4 - a_{43}x_3).$$

В результате имеем следующую систему неоднородных дифференциальных уравнений

$$\begin{cases} \dot{x}_0 = -a_{00}x_0 + b\left(z_u + \dfrac{b}{2r}\cdot\lambda_0\right), \\ \dot{x}_1 = a_{10}x_0 - a_{11}x_1 - a_{12}x_2, \\ \dot{x}_2 = a_{21}x_1 - a_{23}x_3, \\ \dot{x}_3 = a_{31}x_1 - a_{32}x_2 - a_{33}x_3 - a_{34}x_4, \\ \dot{x}_4 = a_{43}x_3, \\ \dot{\lambda}_0 = 2q_0x_0 + a_{00}\lambda_0 - a_{10}\lambda_1 - 2q_0z_0, \\ \dot{\lambda}_1 = 2q_1x_1 + a_{11}\lambda_1 - a_{21}\lambda_2 - a_{31}\lambda_3 - 2q_1z_1, \\ \dot{\lambda}_2 = 2q_2x_2 + a_{12}\lambda_1 - a_{32}\lambda_3 - 2q_2z_2, \\ \dot{\lambda}_3 = 2q_3x_3 + a_{23}\lambda_2 + a_{33}\lambda_3 - a_{43}\lambda_4 - 2q_3z_3, \\ \dot{\lambda}_4 = 2q_4x_4 + a_{34}\lambda_3 - 2q_4z_4. \end{cases} \quad (4)$$

Решением данной системы будут оптимальные траектории

$$\begin{cases} x_i = C_1e_{i,1}e^{p_1t} + \ldots + C_{10}e_{i,10}e^{p_{10}t} + K_i, \\ \lambda_i = C_1e_{i+5,1}e^{p_1t} + \ldots + C_{10}e_{i+5,10}e^{p_{10}t} + K_{i+5}, \end{cases} \quad (5)$$

где $e_{i,j}$, p_j – собственные векторы и собственные значения матрицы системы (4), K_i, K_{i+5} – постоянные, определяемые из неоднородной части уравнений (4); C_j – постоянные, определяемые из граничных условий.

Решая задачу со свободным правым концом для процесса пуска, как это сделано в [7], находим все постоянные C_j, а значит, находим оптимальные траектории x_i, λ_i, а оптимальное управление u находится по известной формуле

$$u = z_u + \frac{b}{2r}\cdot\lambda_0. \quad (6)$$

На рис. 1 показаны переходные процессы данной оптимальной системы при $q_2 = 1$, $r = 0.01$. Минимизация квадрата отклонения скорости приводит к перерегулированию по току возбуждения, которое обычно недопустимо и снимается при помощи отсечки. Ток якоря и упругий момент намного превышают максимально допустимые значения, что также требует применение отсечки. Введение таких нелинейностей приводит к отходу

от оптимальности, что для данной задачи недопустимо. Однако пока обратим главное внимание на напряжение управления, которое примерно в 10 раз превышает номинальное значение. Снижать данную величину приходится за счет введения в задачу оптимизации ограничения типа неравенств.

Оптимизация линейной системы с учетом ограничений на управление. Приведем некоторые предварительные рассуждения, позволяющие затем определить алгоритм синтеза регулятора для замкнутой области управления без сложной процедуры применения условий Вейерштрасса-Эрдмана.

1. Очевидно, что при ограничении на входной сигнал оптимальное управление будет состоять из двух участков. Первый участок длительностью от времени начала переходного процесса до некоторого времени $t_{\text{ут}}$ будет представлять собой постоянную величину, равную максимально допустимому управлению $u = 4$. Движение идет по границе области. Второй участок начинается с угловой точки длительностью от $t_{\text{ут}}$ до времени окончания переходного процесса t представляет собой кривую решения (6), которое связано с решениями (5) для соответствующих начальных условий. Движение идет внутри допустимой области.

2. Значения сопряженных координат λ_i в конце переходного процесса не меняются по сравнению с системой без ограничений. Поэтому если знать значение тока возбуждения, тока якоря, упругого момента и скоростей движущихся масс в момент времени $t_{\text{ут}}$, то оптимальные траектории и оптимальное управление второго участка можно найти аналитически, т.к. все граничные условия для вычисления постоянных C_j в (5) будут известны.

3. Следовательно, имея датчики всех координат системы, мы легко определяем оптимальное управление на втором участке и также знаем оптимальное управление на первом участке, только не знаем его длительность.

4. Предположим, что первый участок по ошибке длится очень короткое время. Тогда координаты системы практически не успеют измениться от начального значения, и значит, оптимальное управление на втором участке будет почти совпадать с решением для открытой области, и в нашем случае, начальное значение управления на втором участке будет примерно в 10 раз превышать номинальное.

5. Предположим, что первый участок по ошибке длится время, немного меньшее, чем $t_{\text{ут}}$. Тогда, подставляя соответствующе начальные условия, получим оптимальное управление, начальное значение второго участка которого будет немного выше максимально допустимого. Графики переходных процессов, подтверждающие данное предположение, приведены на рис. 2.

6. Предположим, что первый участок по ошибке длится время, немного большее, чем $t_{\text{ут}}$. Тогда, подставляя соответствующе начальные условия, получим оптимальное управление, начальное значение второго участка которого будет немного ниже максимально допустимого. Графики переходных процессов, подтверждающие данное предположение, приведены на рис. 3.

7. Оптимальное управление есть величина непрерывная, поэтому в угловой точке должно выполняться условие непрерывности. Значит если момент времени $t_{\text{ут}}$ подобран правильно, то начальное значение управления на втором участке будет равно конечному значению управления на первом, т.е. для нашего случая четырем номинальным значениям.

Алгоритм синтеза оптимального управления. Анализируя вышесказанное можно сформулировать алгоритм синтеза оптимального управления линейной системой для закрытой области управления.

В начале времени управления необходимо подавать на вход системы сигнал, равный максимально допустимому управляющему сигналу. Для расчета следующего шага управления, нужно снимать сигналы обратных связей и рассчитывать оптимальное управление для открытой области при данных граничных условиях. Если начальное значение найденного оптимального управление будет больше максимально допустимого, то принять следующий шаг управления равным максимально допустимому. Далее продолжать данную процедуру, следя за тем, чтобы начальное значение управления постепенно уменьшалось. И в момент, когда это начальное значение управления окажется ниже максимально допустимого, принять это оптимальное управление за искомое на остальном интервале времени.

На рис. 4. показаны переходные процессы, полученные в соответствии с разработанным алгоритмом. Видно, что данные оптимальные траектории и управление найдены верно. Это подтверждено и полным совпадением данных графиков с полученными численно прямым методом математического программирования.

Оптимизация линейной системы с учетом ограничений на управление и все координаты. Заметим, что в проведенных выше исследованиях не производилось ограничение тока якоря, упругого момента (которые превышали допустимые значения в несколько раз) и других координат. Синтезируем аналитическую формулу регулятора, как это сделано в [7], учитывающую ограничения на все координаты, но не для открытой, а для замкнутой области управления. То есть примем весовые коэффициенты при токе возбуждения, токе якоря и скоростях равными нулю и будем минимизировать квадрат отклонения только упругого момента и энергии управления. В результате критерий оптимальности:

$$J = \int_0^t \left(q_3 (z_3 - x_3)^2 + r(z_u - u)^2 \right) dt \cdot \qquad (7)$$

Исследования показали, что если вместо упругого момента минимизировать (как в [7]) квадрат отклонения тока возбуждения, то в системе будут возникать опасные броски и колебания упругого момента.

Ограничивать максимально допустимое напряжение генератора будем (в отличие от [7]) четырехкратной форсировкой, т.е. ограничением типа неравенства. После составления и преобразования уравнений Эйлера-Лагранжа получаем следующую систему неоднородных уравнений:

$$\begin{cases} \dot{x}_0 = -a_{00}x_0 + b\left(z_u + \dfrac{b}{2r}\cdot\lambda_0\right), \\ \dot{x}_1 = a_{10}x_0 - a_{11}x_1 - a_{12}x_2, \\ \dot{x}_2 = a_{21}x_1 - a_{23}x_3, \\ \dot{x}_3 = a_{31}x_1 - a_{32}x_2 - a_{33}x_3 - a_{34}x_4, \\ \dot{x}_4 = a_{43}x_3, \\ \dot{\lambda}_0 = a_{00}\lambda_0 - a_{10}\lambda_1, \\ \dot{\lambda}_1 = a_{11}\lambda_1 - a_{21}\lambda_2 - a_{31}\lambda_3, \\ \dot{\lambda}_2 = a_{12}\lambda_1 - a_{32}\lambda_3, \\ \dot{\lambda}_3 = 2q_3x_3 + a_{23}\lambda_2 + a_{33}\lambda_3 - a_{43}\lambda_4 - 2q_3z_3, \\ \dot{\lambda}_4 = a_{34}\lambda_3. \end{cases} \quad (8)$$

Решая систему (8) в соответствии с вышеописанным алгоритмом, получаем оптимальные траектории и управление, минимизирующие (7). На рис. 5 показаны переходные процессы в такой системе.

Проанализируем полученные результаты. Оптимальные процессы системы Г-Д при учете ограничений по идее должны состоять из трех участков, в начале – максимально быстрое достижение упругим моментом максимального значения, далее – движение на максимальном токе и при максимальном электромагнитном и упругом моменте и в конце – максимально быстрый спад тока и упругого момента до нулевого значения. На первом участке необходимо подавать сначала положительное максимально допустимое напряжение, при котором скорость нарастания тока возрастает. Затем подавать отрицательное максимально допустимое напряжение, при котором скорость нарастания тока убывает. Причем нужно одновременно демпфировать возможные колебания упругого момента. Здесь мы несколько отходим от оптимальности, ограничивая это напряжение не только нелинейностями, но и при помощи минимизации квадрата отклонения энергии управления. Однако это вполне оправдано, т.к. незначительно влияет на время переходного процесса при некоторой экономии этой энергии. Минимизация квадрата отклонения упругого момента от максимально допустимого значения z_3 даст наиболее быстрое достижение упругим мо-

ментом максимальной величины в начале переходного процесса при перерегулировании менее 2%. Быстрее достичь максимального значения можно только, увеличивая перерегулирование, в нашем случае считаем кратковременное превышение максимально значения на 2% приемлемым. В тех случаях, когда превышать максимальный уровень нельзя даже на небольшую величину и маленький промежуток времени, можно ввести дополнительную аварийную отсечку, что будет также незначительным отходом от оптимальности. Второй участок движения при максимальном токе и упругом моменте можно считать оптимальным. А вот на третьем участке данный критерий оптимальности держал бы ток и упругим момент на максимальном значении и после достижения скоростями номинальных значений, что обеспечивает дальнейший разгон системы. Для обеспечения оптимальности этого участка, также как в [7], при достижении током возбуждения, а значит и ЭДС генератора номинального значения (равного обычно входному напряжению двигателя, соответствующему желаемому номинальному значению скоростей движущихся масс) переключаем входное напряжение на желаемое установившееся номинальное значение. Это ограничит также и скорости номинальными значениями.

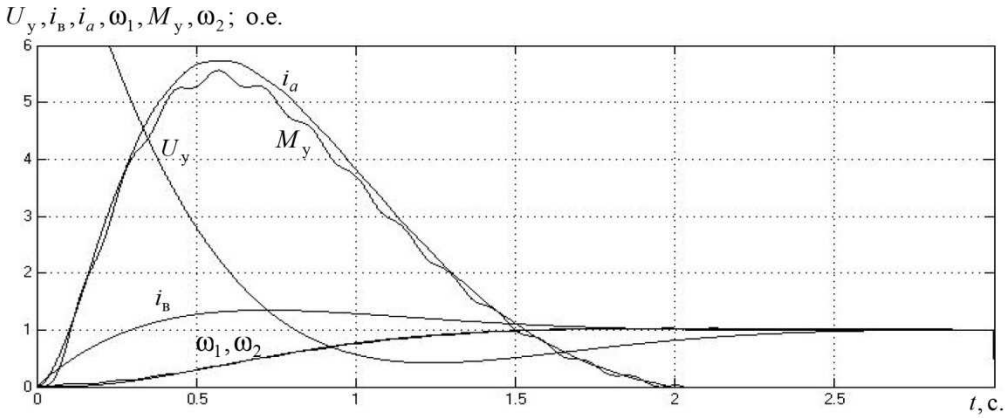


Рис. 1. Переходные процессы системы без ограничений типа нераверств на управление

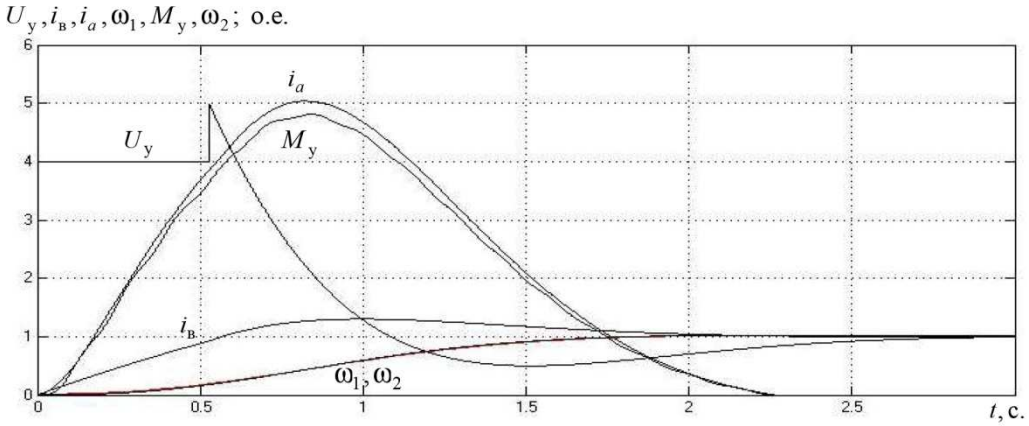


Рис. 2. Переходные процессы системы с соединением траекторий до угловой точки

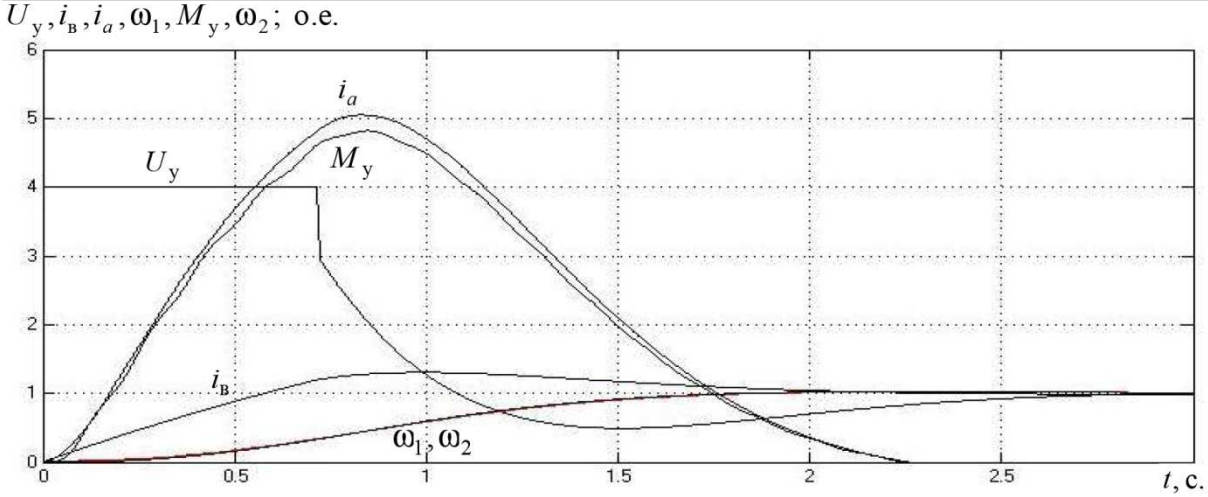


Рис. 3. Переходные процессы системы с соединением траекторий после угловой точки

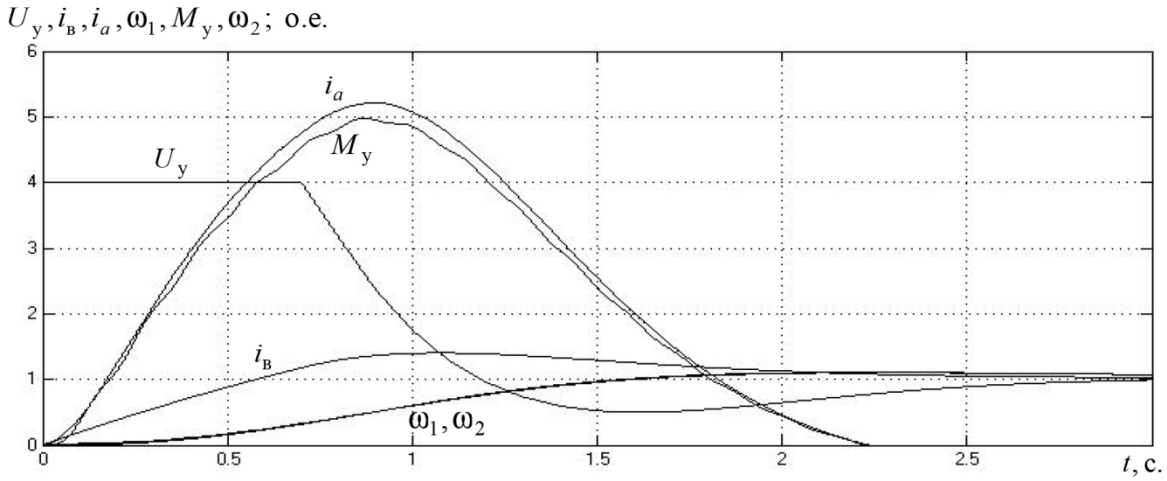


Рис. 4. Переходные процессы оптимальной системы Г-Д с ограничением типа неравенств на управление

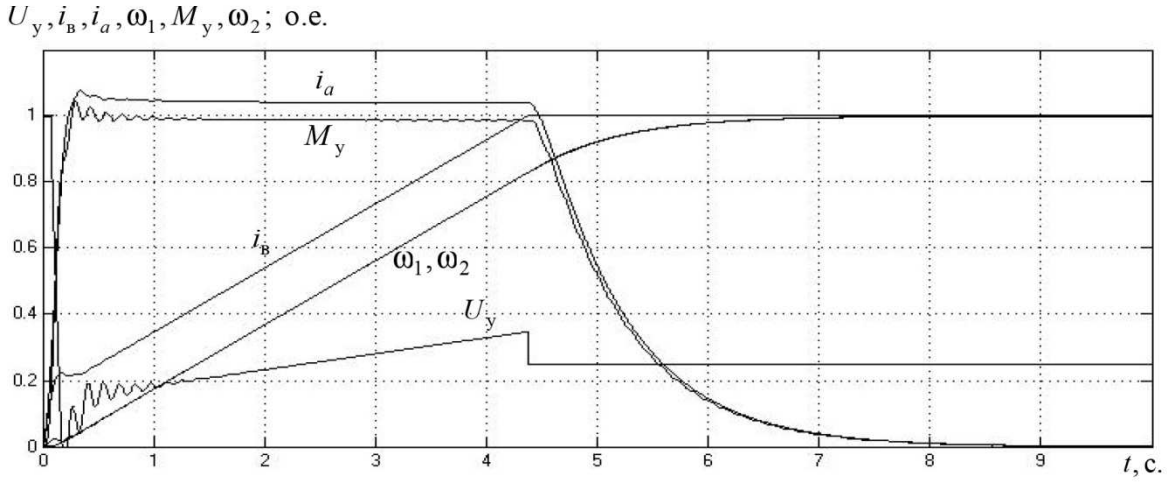


Рис. 5. Переходные процессы оптимальной системы Г-Д с ограничениями на координаты и управление

Можно также ввести одновременную минимизацию квадрата тока якоря и упругого момента, но исследования показывают незначительное отличие качества работы такой системы от данной системы минимизации только квадрата упругого момента.

Вывод. Таким образом, имеем точную аналитическую формулу, определяющую оптимальное управление электроприводом при учете ограничений на все координаты и входной сигнал. Причем ограничения на управление и ток возбуждения типа неравенств производятся напрямую. Ограничение скоростей типа неравенств производится косвенно по ограничению тока возбуждения. Ограничение на ток якоря и упругий момент не сильно отличаются от соответствующих ограничений типа неравенств. Данный регулятор легко реализовать практически в виде соответствующей программы контроллера.

Список литературы

1. Летов А.М. Аналитическое конструирование регуляторов [текст] // Автоматика и телемеханика, 1960.

2. Bryson A.E. Jr., Ho Y.C. Applied Optimal Control. Hemisphere Publishing,Washington, D.C., 1975.

3. Athans M., Falb P.L. Optimal Control: An Introduction to the Theory and Its Applications, Dover, New York, 1966.

4. Kalman R.E. The theory of optimal control and the calculus of variations. University of California Press, Berkeley, 1963.

5. Kwakernaak H., Sivan R. Linear optimal control systems. John Wiley & Sons, Ltd, New York, 1972.

6. Citron S.J. Elements of Optimal Control. Holt, Rinehart and Winston, New York, 1969.

7. Подборский П.Э. Аналитическое конструирование регуляторов электропривода одномассовой системы генератор-двигатель [текст] / П.Э. Подборский, Э.Н. Подборский // Вестник ВГУ, 2013. №. 2. С. 42 – 47.

8. Rodriguez J., Cortes P. Predictive Control of Power Converters and Electrical Drives. John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, 2012.

Подборский Павел Эдуардович, канд. техн. наук, доц., panpodpe@mail.ru, Республика Хакасия, Саяногорск, Саяно-Шушенский филиал Сибирского федерального университета,

Подборский Эдуард Николаевич, канд. техн. наук, доц., panpodpe@mail.ru, Республика Хакасия, Саяногорск, Саяно-Шушенский филиал Сибирского федерального университета

ANALYTICAL DESIGN OF CONTROLLERS FOR ELECTRIC DRIVE OF TWO-MASS ENGINE-GENERATOR SYSTEM. ACCOUNTING FOR INEQUALITY CONSTRAINTS

P.Je. Podborski, Je.N. Podborski

Control of electromechanical systems with square-law cost function is analyzed on an example of the DC-drive for two-mass engine-generator system. The new optimum criterion is offered and the analytical formula of a regulator is received, this allows taking into account inequality constraints on control signal and all state coordinates.

Key words: DC-drive, electromechanical system, one-mass system, control system, two points boundary problem, optimal control, cost function, linear quadratic regulator, LQR, quadratic functional.

Podborski Pavel Jeduardovich, candidate of technical sciences, docent, pan-podpe@mail.ru, Republic of Khakassia, Sayanogorsk, Sayano-Shushensky Branch of Siberian Federal University,

Podborski Jeduard Nikolaevich, candidate of technical sciences, docent, pan-podpe@mail.ru, Republic of Khakassia, Sayanogorsk, Sayano-Shushensky Branch of Siberian Federal University

УДК 681.51

ОПТИМАЛЬНЫЙ ПО ТОЧНОСТИ ВЕНТИЛЬНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ

Т.З. Нгуен, Ч. Кхань, В.В. Сурков

Рассмотрены вопросы аналитического конструирования оптимального по точности регулятора тока (момента) синхронного двигателя с датчиком положения ротора (вентильного электропривода) для следящих систем, инвариантных к действиям внешних дестабилизирующих факторов и изменению параметров систем. Показана структурная схема системы управления током вентильного электропривода. Приводятся результаты математического моделирования характеристик системы в различных режимах работы.

Ключевые слова: вентильный моментный двигатель, оптимальная точность, аналитическое конструирование, следящая система.

В настоящее время при проектировании следящих и оптимальных систем отмечается тенденция расширения области применения бесконтактных моментных электродвигателей (например, промышленно выпускаемой серии ДБМ) с датчиком положения ротора (вентильных двигателей) как наиболее перспективных с точки зрения значительной перегрузочной способности. Эти двигатели допускают интенсивное использование, поскольку не имеют ограничений на частоту пусков и реверса, форму и частоту токов двигателя, величину момента инерции и закон изменения нагрузки двигателя в режиме длительных предельных токов в течение всего срока службы.

Отличительной особенностью работы вентильных двигателей (ВД) является то, что они являются принципиально нелинейными системами.

Теоретически исчерпывающее решение задачи управления нестационарными объектами в условиях действия координатных возмущений дает идея построения оптимальных по точности систем, устойчивых при неограниченном увеличении коэффициента усиления и ограничении на управляющий сигнал [1].

В данной работе рассматривается аналитическое конструирование оптимального по точности регулятора тока (момента) вентильного электропривода, для разнообразных следящих систем.

Силовая часть привода с ВД на основе синхронного двигателя при токе возбуждения $I_f = const$ может быть представлена следующими уравнениями [2]:

$$\begin{cases} r \cdot i_d + L \cdot \dfrac{di_d}{dt} - M \cdot \dfrac{di_f}{dt} + \lambda \cdot L \cdot \omega \cdot i_q = u_d \\ r \cdot i_q + \lambda \cdot L \cdot \dfrac{di_q}{dt} + M \cdot \omega \cdot i_f - L \cdot \omega \cdot i_d = u_q \\ J \dfrac{d\omega}{dt} - \dfrac{3}{2} \cdot (M \cdot i_f \cdot i_q - L \cdot (1-\lambda) \cdot i_d \cdot i_q) = -m_н \end{cases}, \quad (1)$$

где

$$\begin{cases} u_d = \dfrac{2}{3}[u_a \cdot \cos\upsilon + u_b \cdot \cos(\upsilon - \rho) + u_c \cdot \cos(\upsilon + \rho)] \\ u_q = \dfrac{2}{3}[u_a \cdot \sin\upsilon + u_b \cdot \sin(\upsilon - \rho) + u_c \cdot \sin(\upsilon + \rho)] \end{cases}, \quad (2)$$

$$\begin{cases} i_d = \dfrac{2}{3}[i_a \cdot \cos\upsilon + i_b \cdot \cos(\upsilon - \rho) + i_c \cdot \cos(\upsilon + \rho)] \\ i_q = \dfrac{2}{3}[i_a \cdot \sin\upsilon + i_b \cdot \sin(\upsilon - \rho) + i_c \cdot \sin(\upsilon + \rho)] \end{cases}, \quad (3)$$

$u_к$, $i_к$ (к = a, b, c, f или к = d, q) – напряжения и токи в трех контурах фаз и контуре возбуждения или по осям d и q в приведенной двухфазной машине; υ – угол поворота ротора синхронного двигателя, $\upsilon = \int \omega dt + \upsilon_0$; $\rho = 120^0$ - угол сдвига осей фазных обмоток двигателя относительно друг друга; *R* – активное сопротивление обмотки статора двигателя; L – коэффициент индукции по продольной оси двигателя; λ – коэффициент явнополюсности; J – момент инерции вращающихся масс; ω – скорость вращения ротора синхронного двигателя; M – коэффициент взаимоиндукции между обмоткой статора и ротора; $m_{эм}$ – электромагнитный момент вращения вала двигателя; $m_н$ – момент нагрузки на валу двигателя.

Из уравнений (1) следует, что для вентильного двигателя (рис.1) напряжения u_a, u_b и u_c задаются датчиком положения ротора, например, сельсином:

$$\begin{cases} u_a = k \cdot u_{вх} \cdot \sin(\upsilon + \theta) \\ u_b = k \cdot u_{вх} \cdot \sin(\upsilon + \theta - \rho), \\ u_c = k \cdot u_{вх} \cdot \sin(\upsilon + \theta + \rho) \end{cases} \quad (4)$$

где θ – угол установки датчика положения ротора относительно вала синхронного двигателя; k – коэффициент усиления от входа демодулятора 1 до выхода усилителя 4, причем $k \cdot u_{вх\,max} = E/2$; E – эдс источника питания усилителя.

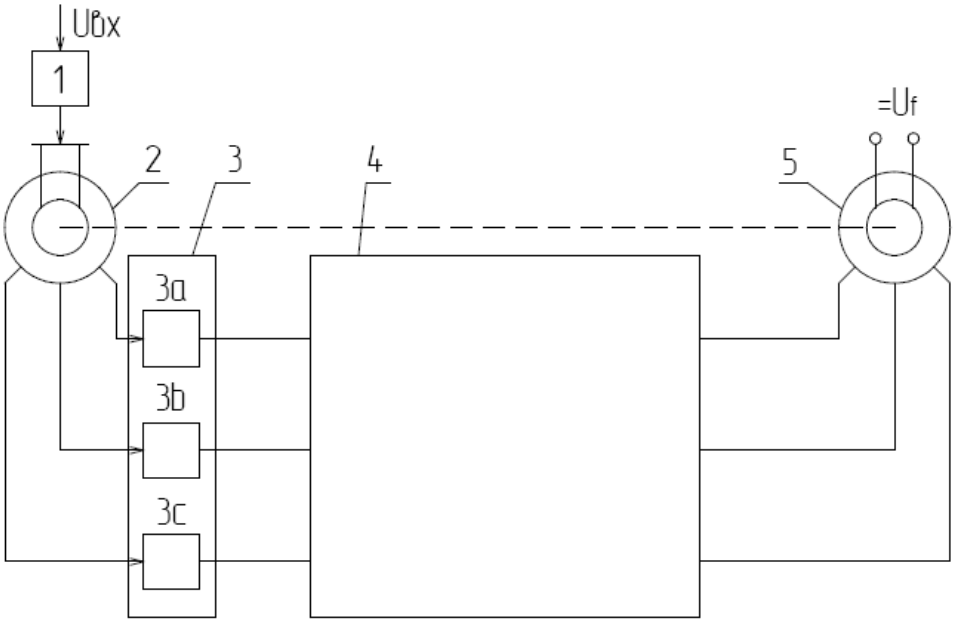


Рис. 1. Структурная схема ВД: 1 – модулятор; 2 – датчик положения ротора (сельсин); 3 – трехфазный демодулятор; 4 – трехфазный усилитель; 5 – синхронный двигатель

Подставляя (4) в (2), можно получить:

$$\begin{cases} u_d = k \cdot u_{вх} \cdot \sin\theta; \\ u_q = k \cdot u_{вх} \cdot \cos\theta, \end{cases} \quad (5)$$

Из уравнений (1) следует, что синхронный двигатель представляет собой объект регулирования с двумя управляющими воздействиями: u_d и u_q.

С целью упрощения получения оптимальных законов управления будем считать, что уравнения (1) записаны в отклонениях, т.е. это уравнения возмущенного движения объекта. Воспользуемся методом, изложенным в [3].

Выделим из системы (1) уравнения, описывающие движение привода по токам i_d, i_q и найдем $\frac{di_d}{dt}$ и $\frac{di_q}{dt}$:

$$\begin{cases} \dfrac{di_d}{dt} = -\dfrac{r}{L}\cdot i_d + \dfrac{M}{L}\cdot\dfrac{di_f}{dt} - \lambda\cdot\omega\cdot i_q + \dfrac{E}{2\cdot L}\cdot u_d \\ \dfrac{di_q}{dt} = -\dfrac{r}{\lambda\cdot L}\cdot i_q - \dfrac{M}{\lambda\cdot L}\cdot\omega\cdot i_f + \dfrac{1}{\lambda}\cdot\omega\cdot i_d + \dfrac{E}{2\cdot\lambda\cdot L}\cdot u_q \end{cases}. \qquad (6)$$

Непосредственно из уравнений (6) следует

$$u_d = U_m\cdot\mathrm{sign}(i_{dзад} - i_d) = U_m\cdot\mathrm{sign}(k\cdot i_{dзад} - k\cdot i_d) = U_m\cdot\mathrm{sign}(u_{dзад} - k\cdot i_d); \qquad (7)$$

$$u_q = U_m\cdot\mathrm{sign}(i_{qзад} - i_q) = U_m\cdot\mathrm{sign}(k\cdot i_{qзад} - k\cdot i_q) = U_m\cdot\mathrm{sign}(u_{qзад} - k\cdot i_q), \qquad (8)$$

где U_m – напряжение питания преобразователя; $i_{dзад}$, $i_{qзад}$ или $u_{dзад}$, $u_{qзад}$ – заданные значения сигналов управления для регулятора тока i_d и i_q соответственно; k – коэффициент пропорциональности, k > 0.

Переменные в координатах d,q выражаются через переменные в реальных координатах A, B, C посредством соотношений (2), (3). Например, фиктивным токам i_d, i_q соответствуют реальные фазные токи i_A, i_B i_C.

Воспользовавшись соотношениями (3), найдем, что разностям $k\cdot i_{dзад} - k\cdot i_d$ и $k\cdot i_{qзад} - k\cdot i_q$ соответствуют разности $k\cdot i_{Aзад} - k\cdot i_A$, $k\cdot i_{Bзад} - k\cdot i_B$, $k\cdot i_{Cзад} - k\cdot i_C$ каждой фазы двигателя и оптимальным управлениям (7), (8) в координатах d,q соответствуют фазные управления

$$u_A = U_m\cdot\mathrm{sign}(k\cdot i_{Aзад} - k\cdot i_A); \qquad (9)$$

$$u_B = U_m\cdot\mathrm{sign}(k\cdot i_{Bзад} - k\cdot i_B); \qquad (10)$$

$$u_C = U_m\cdot\mathrm{sign}(k\cdot i_{Cзад} - k\cdot i_C). \qquad (11)$$

Обозначим

$$u_{Aзад} = k\cdot i_{Aзад},\ u_{Bзад} = k\cdot i_{Bзад},\ u_{Cзад} = k\cdot i_{Cзад}. \qquad (12)$$

Из формул (9)-(11) следует, что для оптимального по точности и быстродействию управления токами (моментом) вентильного привода (рис. 2) требуется трехфазный задатчик тока (датчика положения ротора), трехфазный датчик тока двигателя и трехфазное реле [4].

В качестве трехфазного преобразователя в схеме используется, например, трехфазный мост из шести транзисторов (тиристоров), которые работают в ключевом режиме.

Трехфазный регулятор тока работает следующим образом. Напряжение задания $U_{вх}$ (сигнал управления по току) преобразуется модулятором в напряжение прямоугольной формы повышенной частоты (500 – 20000 Гц) с амплитудным значением, равным $U_{вх}$ и подается на обмотку

возбуждения датчика положения ротора 2 синхронного двигателя, например, сельсина, ротор которого механически соединен с ротором синхронного двигателя. Сигнал с обмоток синхронизации сельсина подается на трехфазный демодулятор 3, на выходе которого появляется напряжение задания на оптимальный регулятор тока:

$$\begin{cases} u_{Азад} = k_1 \cdot U_{вх} \cdot \sin[\upsilon + \theta]; \\ u_{Взад} = k_1 \cdot U_{вх} \cdot \sin[(\upsilon - \rho) + \theta]; \\ u_{Сзад} = k_1 \cdot U_{вх} \cdot \sin[(\upsilon + \rho) + \theta], \end{cases} \quad (13)$$

где k_1 – общий коэффициент преобразования модулятора, датчика положения ротора синхронного двигателя и демодулятора.

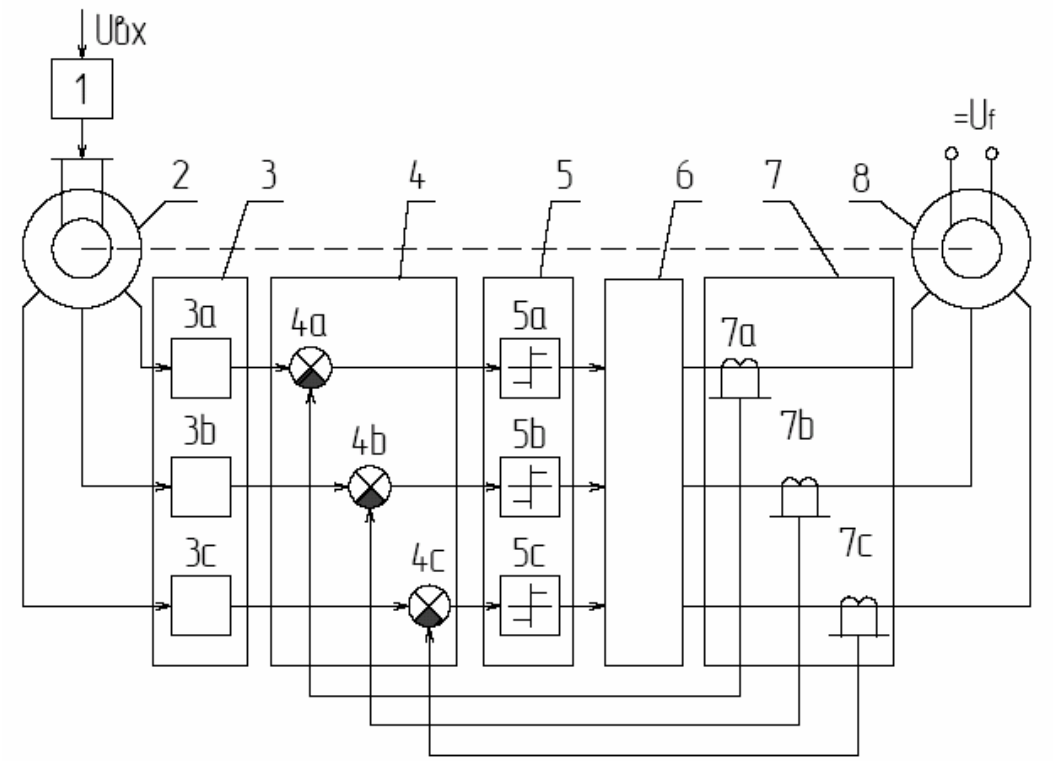


Рис. 2. Структурная схема оптимального по точности и быстродействию регулятора тока (момента) ВД: 1 – модулятор; 2 - датчика положения ротора; 3 - трехфазный демодулятор; 4 - трехфазный сумматор; 5 - трехфазное реле; 6 – трехфазный преобразователь; 7 - трехфазный датчик тока; 8 - синхронный двигатель

Воспользовавшись соотношениями (2), (3), (9), найдем $u_{дзад}$ и $u_{qзад}$ регуляторов (7) и (8), соответствующие заданиям (13):

$$u_{dзад} = k_1 \cdot U_{вх} \cdot \sin(\theta); \quad (14)$$

$$u_{qзад} = k_1 \cdot U_{вх} \cdot \cos(\theta). \quad (15)$$

При этом оптимальные управления (7), (8) примут вид:

$$u_d = U_m \cdot \mathrm{sign}[k_1 \cdot U_{вх} \cdot \sin(\theta) - k \cdot i_d]; \quad (16)$$

$$u_q = U_m \cdot \mathrm{sign}[k_1 \cdot U_{вх} \cdot \cos(\theta) - k \cdot i_q]. \quad (17)$$

Из (16) следует, что при установке датчика положения ротора в нулевое положение ($\theta = 0$) регулятор тока i_d стабилизирует ток i_d на нулевом уровне оптимально по быстродействию и поддерживает его оптимально по точности так, что $i_d = 0$. При этом уравнения (9) – (11) с учетом (12), (13) при $\theta = 0$ приводятся к виду:

$$\begin{cases} u_A = U_m \cdot \mathrm{sign}[k_1 \cdot U_{вх} \cdot \sin(\upsilon) - k \cdot i_A]; \\ u_B = U_m \cdot \mathrm{sign}[k_1 \cdot U_{вх} \cdot \sin(\upsilon - \rho) - k \cdot i_B]; \\ u_C = U_m \cdot \mathrm{sign}[k_1 \cdot U_{вх} \cdot \sin(\upsilon + \rho) - k \cdot i_C]. \end{cases} \quad (18)$$

По уравнениям (18) построена структурная схема (рис. 2).

Уравнения (1) с учетом (16), (17) при $\theta = 0$ и $I_f = \mathrm{const}$ преобразуются к виду:

$$\begin{cases} r \cdot i_q + \lambda \cdot L \cdot \dfrac{di_q}{dt} + M \cdot I_f \cdot \omega = u_q; \\ J \cdot \dfrac{d\omega}{dt} - m_{эм} = -m_н, \\ \dfrac{3}{2} \cdot M \cdot I_f \cdot i_q = m_{эм}, \end{cases} \quad (19)$$

$$u_q = U_m \cdot \mathrm{sign}(k_1 \cdot U_{вх} - k \cdot i_q). \quad (20)$$

Выводы. Предлагаемый способ оптимального управления вентильным двигателем на основе синхронного двигателя переменного тока (например, промышленно выпускаемой серии ДБМ) позволяет рассматривать возможность замены коллекторного двигателя постоянного тока, используемого в высокоточных системах слежения на более предпочтительный вентильный двигатель:

1. Дифференциальные уравнения (19) полностью аналогичны дифференциальным уравнениям коллекторного двигателя постоянного тока. Следовательно, и статические и динамические характеристики при управлении ВД по предлагаемому способу полностью аналогичны статическим и динамическим характеристикам коллекторного двигателя постоянного тока.

2. Из третьего уравнения (19) следует, что ток i_q пропорционален электромагнитному моменту, следовательно, регулятор тока (20) является одновременно и регулятором момента. То есть, ВД приобретает дополнительно свойства оптимального по точности и одновременно оптимального по быстродействию моментного двигателя.

Список литературы

1. Аналитическое конструирование оптимальных регуляторов по критериям точности, быстродействию, энергосбережению / Сурков В.В., Сухинин Б.В. [и др.]. Тула: Изд-во ТулГУ, 2005. 300 с.

2. Горев А.А. Переходные процессы синхронной машины. М.: ГЭИ, 1950.

3. Сухинин Б.В., Сурков В.В., Цырук С.А., Феофилов Е.И. Оптимальное по точности (быстродействию, энергосбережению) управление электромеханическими объектами [Текст]. Тула: Изд-во ТулГУ, 2014. 140 с.

4. Патент 2354036 Российская Федерация. Способ управления вентильным двигателем и следящая система для его осуществления. / Егоров А.Ю., Сухинин Б.В., Сурков В.В., Домнин А.Н., Сурков А.В.; заявитель и патентообладатель Тульский государственный университет - № 2007145131; заявл. 04.12.07; опубл. 27.04.2009.

Нгуен Тиен Зунг, асп., nguyentiendung108@gmail.com, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Чан Кхань, асп., khanh89hd@gmail.com, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Сурков Виктор Васильевич, д-р техн. наук, проф., ivts.tulgu@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

OPTIMAL FOR ACCURACY ENGINE

T.D. Nguyen, T. Khanh, V.V. Surkov

Addressed issues of analytical design optimal on the accuracy of the cruise control power (torque) synchronous motor with position sensor rotor (valve electric) for monitoring systems, invariant to the external destabilizing factors and change the settings systems. Shows the block diagram of the control system shock valve electric. Are the results of mathematical modeling of the system in the various modes of operation.

Key words: torque engine, optimum accuracy, analytical design, servo system.

Nguyen Tien Dung, postgraduate, nguyentiendung108@gmail.com, Russia, Tula, Tula State University,

Tran Khanh, postgraduate, khanh89hd@gmmail.com, Russia, Tula, Tula State University,

Surkov Victor Vasilevich, doctor of technical science, professor, ivts.tulgu@rambler.ru, Russia, Tula, Tula State University.

УДК 621.313.333

ПОВЫШЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА С БЕЗДАТЧИКОВОЙ СКАЛЯРНОЙ СИСТЕМОЙ УПРАВЛЕНИЯ ПРИ ПРОВАЛАХ НАПРЯЖЕНИЯ СЕТИ

О.Б. Шонин, Н.Г. Новожилов, С.Б. Крыльцов

Исследуется бездатчиковый частотно-регулируемый асинхронный электропривод со скалярной системой управления применительно к задаче обеспечения работоспособности привода при провалах напряжения сети. Сохранение управляемости приводом достигается за счет перевода системы управления в режим управляемой рекуперации кинетической энергии, которая используется для поддержания напряжения в звене постоянного тока на требуемом уровне. Управление приводом в нормальном и аварийном режиме осуществляется по принципу подчиненного регулирования. В аварийном режиме внешний контур регулирования скорости заменяется контуром регулирования напряжения звена DC. При этом внутренний контур, регулирующий активную составляющую тока статора, остается неизменным. Исследование привода с предложенной системой управления в нормальном и аварийном режиме выполнено с помощью компьютерного моделирования в среде MatLab Simulink.

Ключевые слова: частотно-регулируемый привод, рекуперация, звено постоянного тока, активная составляющая тока статора, провал напряжения.

1. Введение. Одним из направлений развития частотно-регулируемого электропривода (ЧРП) является совершенствование структур привода и систем управления, способных обеспечить работоспособность привода при отклонении параметров качества напряжения сети от нормируемых значений, которые устанавливаются регламентирующими документами по таким факторам как содержание высших гармоник, степень асимметрии трехфазной системы напряжений, уровень снижения фазных напряжений [1]. В наибольшей степени частотно-регулируемый привод чувствителен к провалам напряжения, параметры которых зависят от типа короткого замыкания в передающих и распределительных линиях, топологии сети, места возникновения аварии, параметров срабатывания релейной защиты, отключающей поврежденные участки. Средняя длительность провалов составляет от 0,1 до 3 секунд, глубина провалов 10...90 % от номинального значения, число провалов - 15-20 в год.

Появление провалов приводит к срабатыванию реле минимального напряжения (РМН) и отключению привода от сети – в противном случае при восстановлении питания могут возникнуть броски, как зарядных токов конденсатора, так и пусковых токов двигателя при отсутствии синхронизации сети и процессов в двигателе [2-5]. Для ЧРП общепромышленного применения на основе двухзвенного преобразователя частоты (ПЧ) время срабатывания РМН составляет 0,02...0,04 с. [6,7], что на порядок меньше длительности кратковременных провалов.

Одним из способов сохранения работоспособности привода во время провалов напряжения является использование дополнительных источников и накопителей энергии различного типа. Экономическая целесообразность применения таких устройств определяется соотношением между ущербом от нарушения технологического процесса и затратами на установку дополнительного оборудования.

В тех случаях, когда установка дополнительного оборудования не имеет достаточного экономического обоснования, основным критерием успешного прохождения приводом аварийного состояния сети является минимизация времени повторного пуска привода, которое в идеальном случае должно совпадать с длительностью провалов напряжения.

Одним из надежных и перспективных способов сохранения управляемости привода является преобразование кинетической энергии, запасенной во вращающихся массах привода и приводного механизма, в электрическую энергию конденсатора с целью поддержания напряжения звена постоянного тока на уровне, близком к номинальному значению [8-10]. Основное достоинство способа заключается в его реализации программными средствами за счет изменения структуры системы управления приводом без установки дополнительного оборудования в силовую часть преобразователя, что делает этот способ наименее затратным. Сохранение непрерывного взаимодействия преобразователя частоты и двигателя во время провалов напряжения позволяет приблизить длительность выбега двигателя ко времени существования аварийного режима сети и обеспечить тем самым минимизацию ущерба от временного пропадания напряжения.

Особый интерес представляет реализация режима рекуперации энергии в рамках современной тенденции развития “бездатчиковых” систем управления электроприводом [11-16]. Известны способы реализации режима рекуперации в системах векторного управления электроприводом [17,18]. В разработках систем скалярного частотного управления без датчиков скорости вращения ротора, реализации режимов рекуперации уделено недостаточно внимания. В тоже время задача обеспечения непрерывной связи преобразователя и двигателя в таких системах во время провалов напряжения является ключевым моментом обеспечения работоспособности привода в целом.

Целью работы является разработка и исследование системы управления бездатчикового асинхронного ЧРП со скалярной системой управления, реализующей режим рекуперации запасенной энергии привода в условиях провалов напряжения в сети. Работа построена следующим образом. Дается краткое описание работы системы скалярного управления на основе наблюдателя скорости вращения ротора, на базе компьютерной модели рассматривается работа привода в основном и аварийном режимах, приводятся результаты исследования режима рекуперации, которые сравниваются с теоретической оценкой параметров выбега.

2. Система управления приводом. В работе рассматривается модифицированная система скалярного частотного управления асинхронным приводом, в которой используется наблюдатель скорости вращения ротора, основанный на соотношении между скольжением и активной составляющей тока статора. Структура двухконтурной системы починенного регулирования показана на рис. 1.

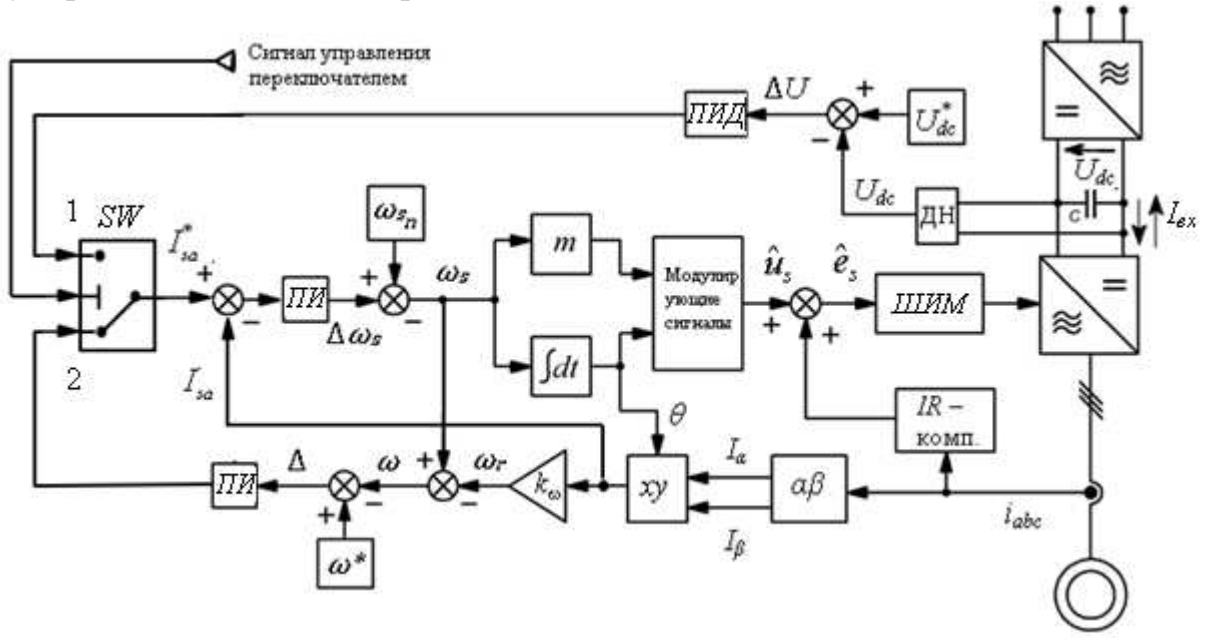


Рис. 1. Структура бездатчиковой скалярной системы управления асинхронным приводом в нормальном режиме и в режиме рекуперации кинетической энергии приводного механизма во время провалов напряжения сети

Модификация системы управления, описанная в работе [16] , состоит в том, что в режиме рекуперации в систему управления вводится дополнительный контур для регулирования напряжения звена постоянного тока по сигналу внешнего устройства контроля напряжения. В нормальных условиях переключатель *SW* находится в положении 1, в котором система управления работает в режиме поддержания заданной скорости вращения ротора ω^* путем регулирования активной составляющей тока статора I_{sa}.

При обнаружении провалов напряжения переключатель переходит в положение 2, в котором задание для внутреннего контура регулирования тока формируется дополнительным контуром регулирования напряжения ЗПТ. Регулирование напряжения достигается за счет изменения частоты основной гармоники выходного напряжения ПЧ в зависимости от скорости вращения ротора. При сравнении напряжения ЗПТ U_{dc} с заданием U_{dc}^* формируется сигнал ошибки ΔU_{dc}, который поступает на вход регулятора напряжения. Выходом регулятора напряжения является задание активной

составляющей тока статора I_{sa}^{*}, которое сравнивается с текущим значением этой величины I_{sa}. Все остальные преобразования осуществляются, так же как и в исходной структуре управления.

Сигналы датчиков тока i_a, i_b, i_c преобразуются в проекции $I_{s\alpha}, I_{s\beta}$ вращающегося вектора I_s на оси α,β стационарной системы координат. Используя данные о положении θ обобщенного вектора трехфазной системы модулирующих напряжений E_s, компоненты тока $I_{s\alpha}, I_{s\beta}$ проецируются на ось x вращающейся системы координат (рис. 2), что позволяет определить активную составляющую тока в виде

$$I_{sa} = I_{s\alpha}\cos\theta + I_{s\beta}\sin\theta. \qquad (1)$$

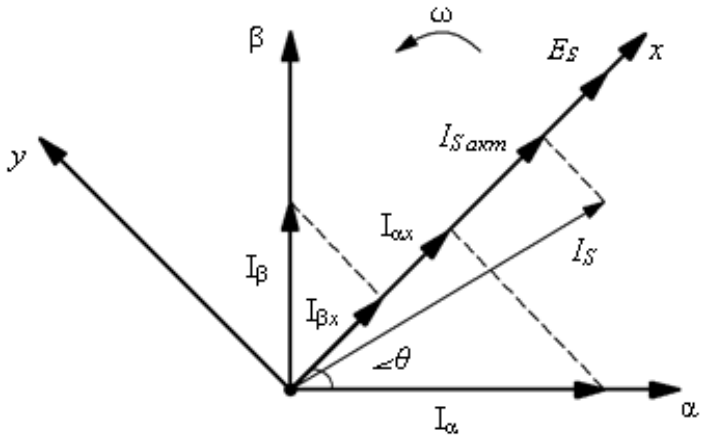


Рис.2. Схема вычисления активной составляющей тока статора

Частота тока ротора оценивается по линейной зависимости $\omega_r = \omega_{r\,nom} I_{sa} / I_{sa\,nom}$. Сравнение вычисленной частоты вращения ротора $\omega^{est} = (\omega_s - \omega_r)/z_p$ с заданной величиной ω^{*} дает ошибку $\Delta_\omega = \omega^{*} - \omega^{est}$, которая поступает на вход ПИ-регулятора скорости (РС). Выходом РС является задание по активной составляющей тока I_{sa}^{*} для внутреннего контура регулирования тока. Выходным сигналом ПИ-регулятора тока (РТ) является величина $\Delta\omega_s$, с помощью которой формируется частота модулирующего напряжения $\omega_s = \omega_{s_{nom}} - \Delta\omega_s$, где $\omega_{s_{nom}}$ – номинальная частота. Частота ω_s используется для формирования угла θ и коэффициента модуляции m, который при законе регулирования $E/\omega_s = const$ определяется как отношение частот $m = \omega_s / \omega_{s\,nom}$. По амплитуде m и текущему углу $\theta(t)$ формируется симметричная трехфазная система модулирующих сигналов $\hat{e}_a(t), \hat{e}_b(t), \hat{e}_c(t)$, которая затем корректируются слагаемыми,

учитывающими $IR-$компенсацию. Сравнение полученных модулирующих напряжений $\hat{u}_a(t),\hat{u}_b(t),\hat{u}_c(t)$ с опорным сигналом ШИМ дает последовательность управляющих импульсов для ключей инвертора S_a,S_b,S_c.

3. Особенности работы привода в нормальном режиме и в случае провалов напряжения. Рассмотрим основные процессы в системе «выпрямитель – конденсатор – ШИМ инвертор – асинхронный двигатель» в двигательном режиме. Осциллограммы входного тока инвертора и фазных токов двигателя, полученные при моделировании процессов в среде *Simulink MatLab*, показаны на рис. 3.

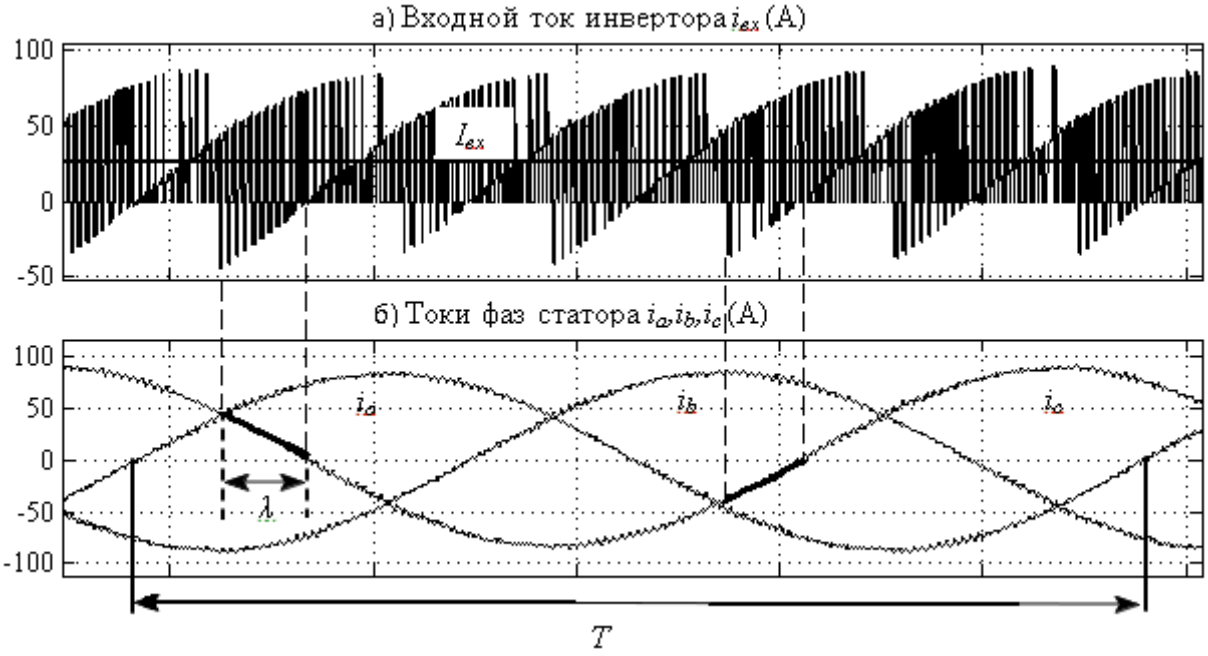


Рис. 3. Осциллограммы токов на входе инвертора (а) и в обмотках статора (б)

Входной ток инвертора $i_{вх}(t)$ представляет собой последовательность импульсов, которые имеют как положительную, так и отрицательную полярность. Положительной полярности соответствует проводящее состояние ключей, отрицательной полярности в течение времени λ – проводящее состояние обратных диодов. Положительному значению усредненного входного тока инвертора $I_{вх}$ соответствует поток энергии от источника к нагрузке, который определяет мощность, развиваемую двигателем $P=3P_{\phi}$. Мощность фазы двигателя определяется основными гармониками тока и напряжения и углом сдвига фаз между ними. Для идеального инвертора мощность, отдаваемая звеном постоянного тока $P_{вх}=U_{dc}I_{вх}$, равна мощности двигателя $P=3/2\,U_{m1}I_{m1}\cos\varphi$. Учитывая связь между амплитудой первой гармоникой фазного напряжения и напряжением ЗПТ $U_{m1}=mU_{dc}/2$, где m – коэффициент модуляции, получим, что усреднен-

ный ток инвертора $I_{вх}$ пропорционален активной составляющей тока двигателя, отвечающей за преобразование электрической энергии в механическую энергию

$$I_{вх} = 3/4\,m I_{m1}\cos\varphi = 3/4\,m I_{ma} \qquad (2)$$

В нормальных условиях напряжение конденсатора поддерживается на требуемом уровне за счет энергии, потребляемой преобразователем от сети. При симметричных провалах напряжения диоды выпрямителя переходят в закрытое состояние и блокируют поступление энергии из сети, что приводит к разряду конденсатора на нагрузку. Механическая мощность привода в процессе разряда конденсатора изменяется незначительно и при оценке времени разряда из уравнения баланса мощности ее можно считать постоянной [19-21]. Такое допущение позволяет получить кривую разряда в следующем виде:

$$U_{dc}(t) = U_{dc\,nom} - \frac{1}{C}\frac{3m}{4}\cdot I_{sa}\cdot t, \qquad (3)$$

где $U_{dc\,nom}$ - номинальное напряжение, В; C - емкость конденсатора, Ф; I_{sa} - активная составляющая тока статора, А; m - коэффициент модуляции ШИМ инвертора до провала напряжения.

На рис. 4 показана кривая выбега двигателя (2) и кривая разряда конденсатора ПЧ (1) для привода мощностью $P = 37$ кВт при напряжении ЗПТ $U_{dc} = 540$В и ёмкости конденсатора $C = 0.02$Ф. До возникновения в момент $t_1 = 5$с. симметричного провала напряжения глубиной 100% привод работал в номинальном режиме.

Если преобразователь не имеет защиты минимального напряжения, то конденсатор за короткое время полностью разряжается до нулевого уровня (кривая 1 рис. 4). Время разряда зависит от удельного значения емкости $\widehat{C} = C/P_{nom}$ и загруженности привода по мощности $\widehat{P} = P/P_{nom}$. Повторный пуск в этом случае возможен после полной остановки двигателя и предварительного заряда конденсатора.

Современные частотно-регулируемые приводы снабжены реле минимального напряжения, которое блокирует ключи инвертора при достижении напряжения конденсатора $U_{dc}(t)$ напряжения срабатывания реле U_{min} в момент t_{min}. Значение напряжения U_{min} выбирается из условия снижения бросков тока заряда до максимально допустимых значений токов входного преобразователя, значение времени t_{min}, как отмечалось выше, зависит от ёмкости конденсатора и режима работы привода. В номинальном режиме работы привода это время составляет порядка двух периодов напряжения сети $t_{min} \approx 40$мс., что значительно меньше длительности провалов напряжения [5,6]. После отключения инвертора двигатель переходит в режим свободного выбега (кривая 2 рис.4). При восстановле-

нии напряжения приходится осуществлять повторный пуск двигателя при неизвестной скорости вращения. Для уменьшения пусковых токов вращающегося двигателя, в системе управления приводом должен быть предусмотрен блок синхронизации модулирующего сигнала ШИМ инвертора с процессами, протекающими в выбегающем двигателе. Восстановление управляемости привода достигается сканированием двигателя с целью поиска частоты модулирующего сигнала по критерию минимума тока. Такой способ перезапуска требует заметного времени и не отличается высокой надежностью.

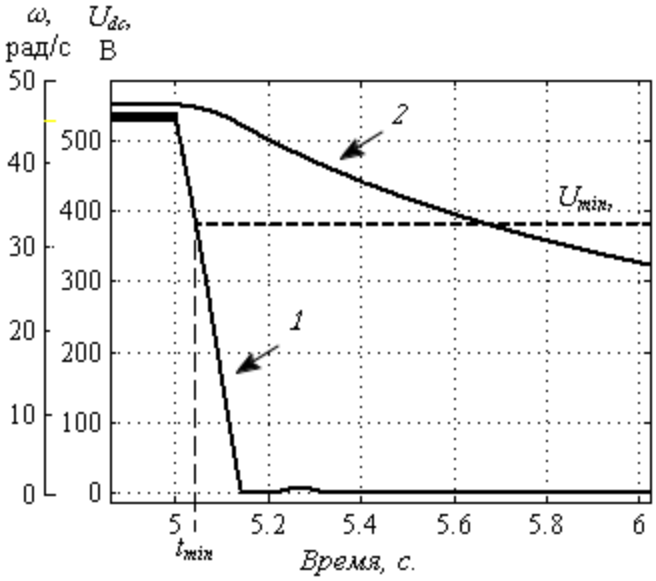


Рис. 4. Напряжение конденсатора (кривая 1) и частота вращения вала электродвигателя (кривая 2) при провале напряжения сети

Описанных выше проблем с перезапуском двигателя можно избежать, если сохранить управляемость привода на время провалов напряжения сети за счет поддержания напряжения звена постоянного тока за счет преобразования кинетической энергии вращающихся частей привода в электрическую энергию конденсатора. Управление этим процессом в рассматриваемом приводе (рис.1) достигается использованием внешнего контура регулирования напряжения звена постоянного тока, на который переключается внешний контур регулирования скорости вращения двигателя в момент появления провала напряжения.

4. Исследование работы привода в режиме рекуперации. Исследование разработанной системы управления проводилось при помощи компьютерной модели привода, построенной в среде Matlab/Simulink.

В модели были приняты следующие параметры привода: $P_{ном}$=37кВт, $U_{ф.н.}$=220 В, ω_S =45,2 рад/с, s=0.02, R_s=0.084 Ом, $L_{s\sigma}$=0.0009 Гн, R_r'=0,0564 Ом, $L_{r\sigma}'$ =0.0011 Гн, L_m=0.0109 Гн, U_{dc}=540 В, J=18 кг·м, C=22 мФ.

Регулятор напряжения ЗПТ в дополнительном контуре должен обеспечивать минимальную длительность переходного процесса, минимальное перерегулирование и максимальную точность. Совокупность требований, предъявляемых к разрабатываемой системе управления, приводит к необходимости использовать во внешнем контуре регулирования напряжения ПИД закон управления.

Настройка ПИД регулятора напряжения (рис.1) производилась по методу Зиглера – Никольса [22]. В результате были получены следующие параметры регулятора:

коэффициент пропорциональной составляющей Kp =6,07;

коэффициент интегральной составляющей Ki = 109,5 ;

коэффициент дифференциальной составляющей Kd = 0,215.

Результаты моделирования работы привода в режиме рекуперации представлены на рис. 5 и 6.

До аварии в сети привод работал с частотой вращения $\omega = 35.6\,\text{рад/с}$. В момент времени $t_1 = 5\text{с}$. произошел трёхфазный провал напряжения глубиной 100%

Если обнаружение провала напряжения производится по кривой разряда конденсатора $U_{dc}(t)$, то коммутация системы управления для перехода привода в режим рекуперации происходит, когда контролируемое напряжение $U_{dc}(t_1)$ сравняется с напряжением срабатывания реле рекуперации U_{rec} в момент t_1. Уставка U_{rec} выбирается из условия $U_{min} \le U_{rec} \le U_{dcnom}$, где U_{min} – уставка РМН.

Если обнаружение и идентификация типа провала напряжения осуществляется быстродействующим анализатором симметричных составляющих напряжения входе привода, тогда переход системы управления в режим рекуперации происходит без задержки во времени относительно момента возникновения провала напряжения. В этом случае блок рекуперации поддерживает напряжение ЗПТ на номинальном уровне. На рис. 5 представлены временные зависимости скорости вращения ротора, электромагнитного момента, среднего значения входного тока инвертора и активной составляющей тока двигателя, напряжения ЗПТ и осциллограмма тока фазы A, на рис. 6 – осциллограммы ток инвертора и токов фаз двигателя. Анализ полученных результатов позволяет выделить следующие особенности работы привода в режиме рекуперации. Переход в режим рекуперации сопровождается уменьшением электромагнитного момента до нулевого значения, изменением знака и последующим возрастанием в связи с необходимостью компенсации потерь энергии в сопротивлении статора. Активная составляющая тока статора и входной ток инвертора изменяются аналогичным образом. Изменение знака этих величин соответствует пере-

ходу привода от двигательного режима к генераторному режиму работы. Переход привода в режим рекуперации происходит в течение времени $t_s = 0.4$с.

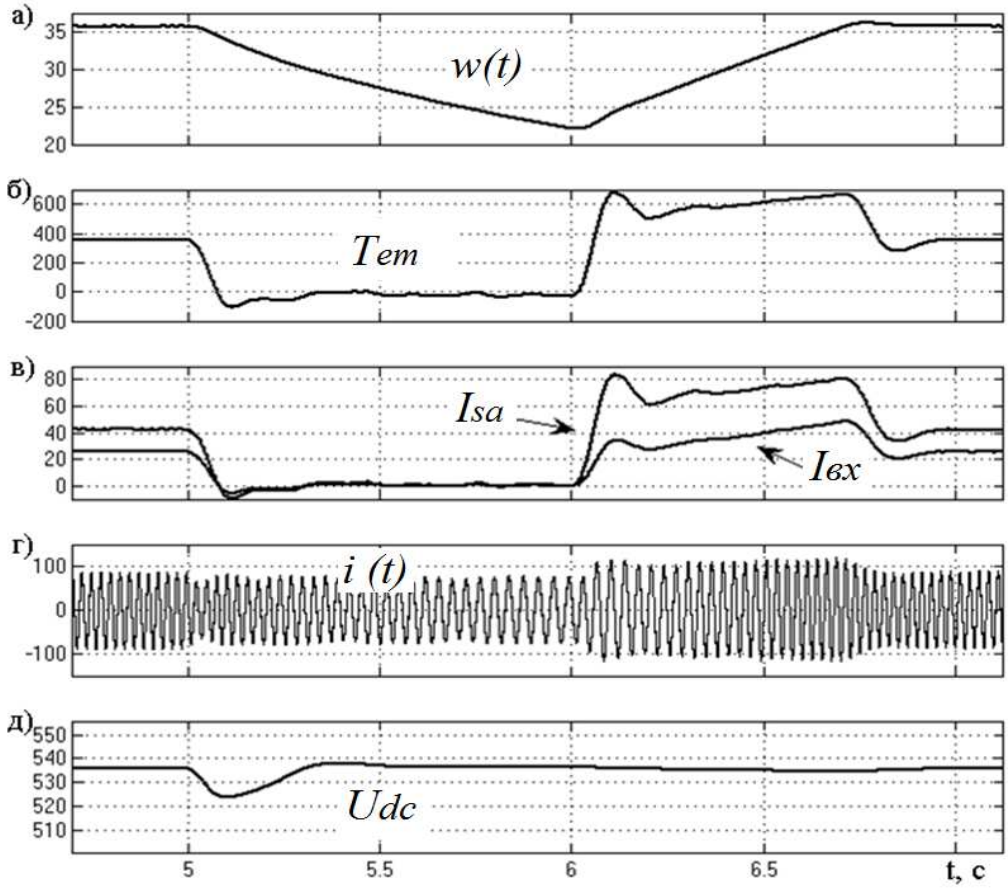


Рис. 5. Осциллограммы: а – скорости вращения двигателя $\omega(t)$***;***
б – электромагнитного момента $T_{em}(t)$***; в – активной составляющей тока статора*** $I_{sa}(t)$ ***и среднего значения тока инвертора*** $I_{вх}(t)$***;***
г – фазного тока статора $i(t)$***; д – напряжения ЗПТ*** $U_{dc}(t)$

Переходной процесс сопровождается снижением напряжения ЗПТ на 2%, которое затем восстанавливается до заданного значения U_{dcnom} и поддерживается на этом уровне до момента восстановления нормального режима сети. При этом перерегулирование не превышает 0,5%.

Особенностью работы привода в режиме рекуперации является форма входного тока инвертора $i_{вх}(t)$ (рис.6а), для которой харктерна симметрия относительно оси времени и равенство длительности проводящего состояния обратных диодоа λ и длительности проводящего состояния транзисторов моста инвертора, что примерно соответствует предельному режиму работы инвертрора [23]. Равенство среднего

значения тока на входе инвретора означает сохранение напряжения конденсатора ЗПТ на заданном уровне. Фазные токи двигателя в режиме рекуперации (рис. 6, б) носят реактивный характер. Амплитуда тока равна амплитуде реактивного тока статора в нормальном режиме до перехода привода в режим рекуперации.

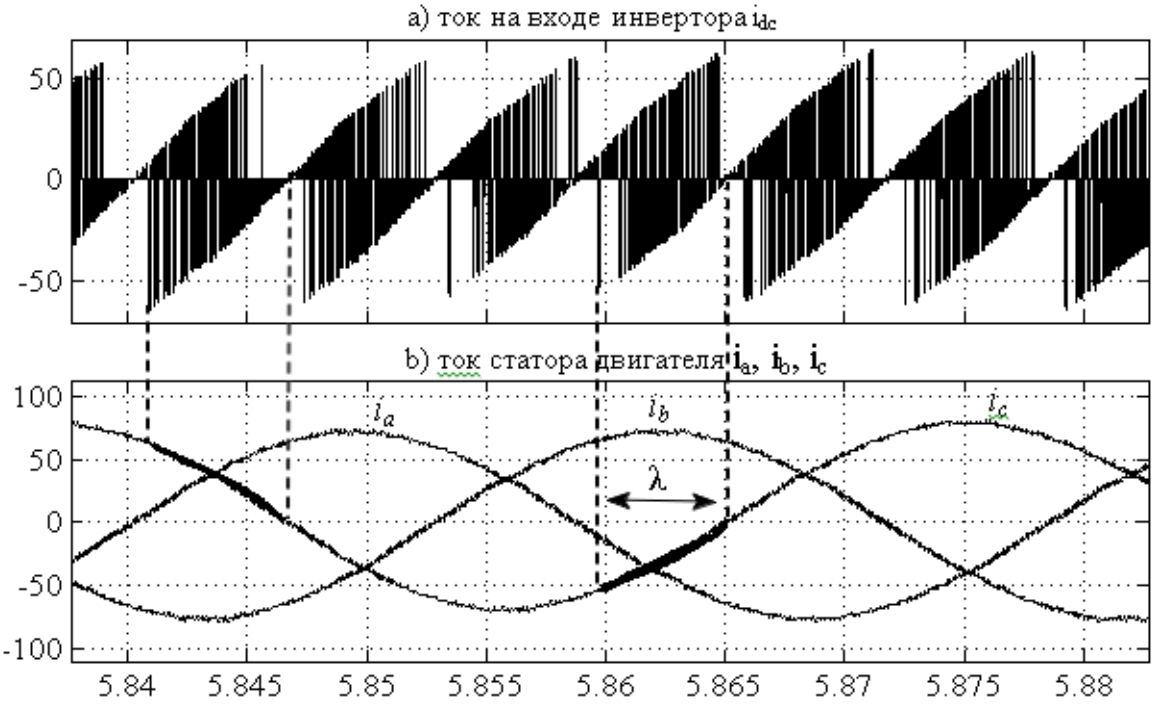


Рис. 6. Осциллограммы: а – входного тока инвертора; б – фазных токов двигателя

Приведенные кривые показывают, что при провале напряжения сети синхронизация преобразователя и двигателя не прерывается, что позволяет осуществить контролируемый повторный пуск в момент восстановления напряжения сети $t_2 = 6$с.. К моменту повторного пуска скорость вращения уменьшилась на 38% и составила $\omega(t_2) = 22$рад/с..

После восстановления напряжения система управления переходит к структуре, соответствующей нормальному режиму работы, и осуществляет разгон привода до скорости, которая была до возникновения провала напряжения. Необходимо отметить, что при повторном пуске потребляемый приводом ток не превышает значения тока в нормальном режиме работы более чем в 1,5 раза, что является максимально допустимым значением для большинства ЧРП. Отсутствие кратных бросков тока при повторном пуске снижает негативное влияние аварийного режима работы привода на полупроводниковые ключи преобразователя. Равномерная загруженность элементов преобразователя по току в условиях частого возникнове-

ния провалов напряжения позволяет сохранять нормальный тепловой режим этих элементов и в перспективе способствует увеличению срока эксплуатации.

Заключение. В работе исследована предложенная система скалярного управления асинхронным частотно-регулируемым электроприводом без датчика скорости, построенная по принципу подчиненного регулирования и реализующая режим рекуперации запасенной энергии привода для поддержания напряжения ЗПТ на номинальном уровне при возникновении провалов напряжения в сети. Приведены результаты компьютерного моделирования привода в нормальном и аварийном режиме, дано описание процессов, характерных для перехода в режим рекуперации, стационарного режима рекуперации и для повторного пуска. Показано, что разработанная система управления позволяет поддерживать напряжение ЗПТ на номинальном уровне при глубине провала напряжения 100% и длительности 1с. Использование в контуре регулирования напряжения ЗПТ ПИД – регулятора обеспечивает длительность переходного процесса в режим рекуперации 0,4с. и перерегулирование 0,5%. Во время провала напряжения сохраняется управляемость приводом, что позволяет после восстановления питания обеспечить плавный разгон двигателя от скорости 22рад/с до первоначальной скорости 35.6рад/с. и восстановление тем самым нормального режима работы привода. При повторном пуске вращающегося двигателя ток не превышает предельно допустимых значений.

Список литературы

1. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в сетях общего назначения [Текст]. Взамен ГОСТ 13109-97; введ. 2014.06.1. М.: Межгос. Совет по стандартизации, метрологии и сертификации; Москва: Изд-во стандартов, 20013. 16 с.

2. Корнилов Г.П. Ограничение провалов напряжения в сетях промышленных предприятий. // ЭСиК, 2014. №2. Т. 23. С. 44 - 48.

3. Теличко Л.Я., Басов П.М. Влияние провалов напряжения в распределительных сетях промышленных предприятий на работу современных регулируемых электроприводов // Электротехнические комплексы и системы управления, 2009. № 2. С. 16-20.

4. Ершов С.В., Жабин Б.А. Особенности определения провалов напряженияв системах электроснабжения // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Вып. 8. 2014. С. 97-102.

5. Гуревич Ю.Е., Файбисович ДЛ., Хвощинская З.Г. О бесперебойности электроснабжения промышленных потребителе // Электричество, 1995. № 8. С. 2-10.

6. Milutin P. Petronijevi´c, Borislav I. Jefteni´c, Nebojˇsa M. Mitrovi´c, and Vojkan Z. Kosti´c Voltage Sag Drop in Speed Minimization in Modern Adjustable Speed Drives // FACTA UNIVERSITATIS (NIˇS) SER.: ELEC. ENERG, 2006. V. 16. P. 231-237.

7. Djokic S.Ž´, Stockman K, Milanovic J.V´, Desmet J.J. M. and Belmans R. Sensitivity of AC Adjustable Speed Drives to Voltage Sags and Short Interruptions// IEEE Transactions on Power Delivery, 2005. 20(1). P. 494-505.

8. Joachim Holtz, Wolfgang Lotzkat Controlled AC Drives with Ride-Through Capability at Power Interruption // IEEE Transactions on Industry Applications.,1994. Vol. 30. No. 5. P. 1275-1283.

9. Annette von Jouanne Prasad N. Enjeti, Basudeb Banerjee Assessment of Ride-Through Alternatives for Adjustable-Speed Drives // IEEE Transactions on Industry Applications, 1999. V. 35, № 4. P. 908-916.

10. Deswal S.S., Ratna Dahiya, Jain D.K. Ride through topology of ASD's during power systems faults // Journal of Science, Informatics and Electrical engineering, 2008. V.2 (1). P. 2-10.

11. Holtz J. Sensorless Control of Induction Motor Drives // Proceedings of the IEEE, 2002. V. 90, № 8. P. 1359–1394.

12. Nagasekhar Reddy P. Sensorless control of induction motor using Simulink by direct synthesis technique / Reddy P. Nagasekhar, Reddy P. Linga, J. Amarnath // International Journal of Electrical Engineering, 2011. V. 4. № 1. P. 23–32.

13. Виноградов А.Б. Адаптивно-векторная система управления бездатчикового асинхронного электропривода серии ЭПВ / А.Б. Виноградов, А. Сибирцев, И. Колодин // Силовая электроника, 2006. №3. С. 50-55.

14. Пересада С.М. Сравнительное экспериментальное тестирование систем бездатчикового управления асинхронными двигателями / С.М. Пересада, С.Н. Ковбаса, А.Б. Воронко, Д.Л. Приступа // Електромеханічні і енергозберігаючі системи, 2012. Т. 19, № 3. С. 137-141.

15. Умурзакова А.Д. Косвенный контроль выходных механических переменных асинхронного электродвигателя в электроприводе: дис. на соискание уч. ст. канд. тех. наук: 05.09.03 / Умурзакова Анара Даукеновна; ТПУ; науч. рук. Ю.Н. Дементьев. Томск, 2015. 116 с.

16. Шонин.О.Б., Новожилов Н.Г., Крыльцов С.Б. Наблюдатель частоты вращения ротора в скалярной системе управления асинхронным электроприводом // Электротехнические системы и комплексы, 2016. №2(31). С. 15-19.

17. Rajagopalan Lakshmi Narayan Behavior of variable speed drives under influence of voltage sags: Master of engineering degree thesis: University of Wollongong, 1999. 158 p.

18. Виноградов А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока. Иваново: Изд-во ИГЭУ, 2008. 298 с.

19. Bose B. Power electronics and motor drives // Elsevier inc., 2008. P. 935.

20. Kurt Stockman Ride-through of adjustable speed drives during voltage dips / Frederik D'hulster, Kevin Verhaege, Marcel Didden, Ronnie Belmans// Electric Power Systems Research, 2003. 66. P. 49-58.

21. Kurt Stockman Voltage sag imunity test setup for induction motor/ Frederik D'hulster, Kevin Verhaege, Marcel Didden, Ronnie Belmans// Proc. of 11th International symposium on Power Electronics.(Ugoslavia, Novi Sad), 2001. P. 1 - 5.

22. Жмудь В.А. О методах расчетов ПИД – регуляторов//автоматика и программная инженерия, 2013. №2 (4). С. 118-124.

23. Гельман М.В. Преобразовательная техника: учебное пособие / М.В. Гельман, М.М. Дудкин, К.А. Преображенский // Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2009. 425 с.

Шонин Олег Борисович, д-р техн. наук, проф., ninosh_eltech@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург Санкт-Петербургский горный университет,

Новожилов Никита Геннадьевич, асп., nikita_novozhilov@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург Санкт-Петербургский горный университет,

Крыльцов Сергей Борисович, асп., kryltcov@outlook.com, Россия, Санкт-Петербург Санкт-Петербургский горный университет

ENHANCING THE STABILITY OF A SENSORLESS V/f CONTROLLED VFD UNDER VOLTAGE SAGS

O.B. Shonin, N.G. Novozhilov, S.B. Kryltcov

The paper is devoted to the study of a sensorless frequency-controlled asynchronous electric drive with a scalar control system in relation to the task of ensuring the drive operation when brownouts in the power grid occur. Controllability of the drive is kept through the translation of control system in a controlled kinetic energy recovery mode, which is used to maintain the voltage in the DC link of the frequency converter to the required level. The control system is designed on the principle of the subordinate regulation. In emergency mode, the external speed control loop is replaced by the control loop of DC bus voltage. The internal loop that regulates the active component of the stator current remains unchanged. The study of the drive with proposed control system under normal and emergency conditions is carried out by computer simulation in an environment MatLab Simulink.

Key worlds: variable-frequency drive, kinetic energy recovery, DC-link, active component of the stator current, voltage dip.

Shonin Oleg Borisovich, doctor of technical sciences, professor, ninosh_eltech@mail.ru, Russia, St Petersburg, Saint-Petersburg Mining University,

Novozhilov Nikita Gennadievich, postgraduate, nikita_novozhilov@mail.ru, Russia, St Petersburg, Saint-Petersburg Mining University,

Kryltcov Sergei Borisovich, postgraduate, kryltcov@outlook.com, Russia, St Petersburg, Saint-Petersburg Mining University

УДК 62-523

ВЫБОР КРИТЕРИЯ ОПТИМАЛЬНОСТИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ДВУХМАССОВОЙ СИСТЕМЫ ГЕНЕРАТОР-ДВИГАТЕЛЬ

П.Э. Подборский, Э.Н. Подборский

Анализируются системы управления электромеханическими системами на примере электропривода постоянного тока двухмассовой системы генератор-двигатель. Разработан критерий оптимальности и получена аналитическая формула регулятора, позволяющего учесть ограничения на координаты и входной сигнал. Учтено ограничение на скорость нарастания тока и исключены резкие переключения напряжения управления.

Ключевые слова: электропривод постоянного тока, оптимальное управление, критерий оптимальности, аналитическое конструирование регулятора.

При построении систем оптимального управления важнейшим этапом проектирования является выбор критерия оптимальности. При этом сформулированные требования к качеству регулирования довольно трудно перенести на конкретную математическую формулировку. Зачастую выбирают интегральную оценку качества переходных процессов и используют популярные функционалы. Однако данные критерии оптимальности лишь удобны математически:

- критерий оптимального быстродействия максимально упрощает подынтегральную функцию и при отсутствии ограничений на координаты и комплексных корней позволяет сразу знать вид оптимального управления. Неэффективность его использования показана в [1];

- критерий с линейной по фазовым координатам подынтегральной функцией позволяет для задачи со свободным правым концом при отсутствии ограничений на координаты вариационными методами определить оптимальное управление всего после решения двух задач Коши. Нецелесообразность использования данного критерия показывается в [2];

- квадратичный критерий приводит к линейному по фазовым координатам закону оптимального управления и т.д. Теория аналитического конструирования на основе данного функционала развита для электропривода в [3] и [4].

По оптимальному управлению, включающему вариационные методы, принцип максимума и аналитическое конструирование, было опубликовано огромное число материалов, основные результаты развития данной теории можно найти в работах Брайсона [5], Атанса и Фалба [6], Калмана [7], Квакернаака [8], Цитрона [9] и др.

Для реальных практических задач классические критерии часто не подходят, однако они часто принимаются за искомые без каких-либо серьезных обоснований и исследований. Более того, даже логически на первый взгляд правильно сформулированный критерий оптимальности на практике приводит к закону оптимального управления, не приемлемому для реализации. Далее исследуем подробно данные вопросы.

Постановка задачи. Разработать метод, позволяющий для двухмассовой системы генератор-двигатель электропривода постоянного тока вывести аналитическую формулу закона оптимального управления с прямым или косвенным учетом ограничений типа неравенств, как на управление (с исключением часто переключающейся его формы), так и на все координаты (включая скорость нарастания тока якоря).

Математическое описание объекта управления. Рассмотрим электропривод постоянного тока независимого возбуждения с неизменным потоком возбуждения. Питание двигателя осуществляется по цепи якоря от генератора постоянного тока с возбуждением от, например, тиристорного возбудителя. Математическая модель данной двухмассовой системы может быть представлена в следующем виде:

$$\begin{cases} K_{\text{в}} \cdot U_{\text{у}} = R_{\text{в}} \cdot i_{\text{в}} + L_{\text{в}} di_{\text{в}} / dt, \\ K_{\text{г}} \cdot i_{\text{в}} = R_a \cdot i_a + L_a di_a / dt + C \cdot \omega_1, \\ J_1 d\omega_1 / dt = M - M_{\text{у}}, \\ M_{\text{у}} = c_{12}(\varphi_1 - \varphi_2) + \beta_{12}(\omega_1 - \omega_2), \\ J_2 d\omega_2 / dt = M_{\text{у}}, \end{cases}$$

где $i_{\text{в}}$, i_a, ω_1, ω_2 – ток возбуждения, ток якоря и угловые скорости первой и второй массы; $U_{\text{у}}$ – напряжение управления; $K_{\text{в}}$, $K_{\text{г}}$ – коэффициенты передачи возбудителя и генератора; $R_{\text{в}}$, R_a, $L_{\text{в}}$, L_a – активные сопротивления и индуктивности обмоток возбудителя и якоря; J_1, J_2 – приведенные моменты инерции первой и второй массы; C – конструктивная постоянная; $M = C \cdot i_a$, $M_{\text{у}}$ – электромагнитный момент и упругий момент двухмассовой системы; c_{12}, β_{12}, φ_1, φ_2 – жесткость, вязкое трение и углы поворота первой и второй массы.

Если за ток возбуждения базовый $I_{\text{вб}}$ принять номинальный ток возбуждения, за ток якоря базовый $I_{\text{аб}}$ - максимальный (стопорный) ток якоря двигателя, за момент базовый $M_{б} = I_{\text{аб}} \cdot C$ - максимально допусти-

мый электромагнитный момент, за напряжение управление базовое $U_б$ - номинальное напряжение управления и за угловую скорость базовую $\omega_б$ - номинальную угловую скорость двигателя, то, введя следующие координаты в относительных единицах

$$x_0 = \frac{i_в}{I_{вб}};\ x_1 = \frac{i_a}{I_{aб}};\ x_2 = \frac{\omega_1}{\omega_б};\ x_3 = \frac{M_у}{M_б};\ x_4 = \frac{\omega_2}{\omega_б};\ u = \frac{U_у}{U_б},$$

получим электромеханическую систему в формализованном виде:

$$\begin{cases} \dot{x}_0 = -a_{00}x_0 + bu, \\ \dot{x}_1 = a_{10}x_0 - a_{11}x_1 - a_{12}x_2, \\ \dot{x}_2 = a_{21}x_1 - a_{23}x_3, \\ \dot{x}_3 = a_{31}x_1 - a_{32}x_2 - a_{33}x_3 - a_{34}x_4, \\ \dot{x}_4 = a_{43}x_3, \end{cases} \quad (1)$$

где

$$b = \frac{K_в \cdot U_б}{L_в \cdot I_{вб}};\ a_{00} = \frac{R_в}{L_в};\ a_{10} = \frac{K_г \cdot I_{вб}}{L_a \cdot I_{aб}};\ a_{11} = \frac{R_a}{L_a};\ a_{12} = \frac{C \cdot \omega_б}{L_a \cdot I_{aб}};$$

$$a_{21} = a_{23} = \frac{M_б}{J_1 \cdot \omega_б};\ a_{31} = \frac{\beta_{12}}{J_1};\ a_{32} = a_{34} = \frac{c_{12} \cdot \omega_б}{M_б};$$

$$a_{33} = \frac{\beta_{12}}{J_1 \cdot J_2} \cdot (J_1 + J_2);\ a_{43} = \frac{M_б}{J_2 \cdot \omega_б}.$$

В дальнейшем нам понадобится еще одна дополнительная координата $x_5 = \dot{x}_1$, представляющая собой производную по току якоря. В итоге получим еще одно дополнительное уравнение $\dot{x}_5 = -a_{50}x_0 - a_{51}x_1 + a_{53}x_3 - a_{55}x_5 + b_5u$ к системе (1), в котором $a_{50} = a_{10}a_{00}$, $a_{51} = a_{12}a_{21}$, $a_{53} = a_{12}a_{23}$, $a_{55} = a_{11}$, $b_5 = b_0a_{10}$.

Предварительный выбор критерия оптимальности. Поставим задачу произвести пуск двигателя до номинальной скорости (задача реверса или торможения решается аналогично). Чем быстрее двигатель наберет нужную скорость, тем выше его производительность, поэтому для наискорейшего по времени процесса пуска можно поставить задачу минимизации следующего функционала:

$$J = \int_0^t (|z_2 - x_2|)dt,$$

где z_2 – желаемое установившееся значение выходной координаты.

Знак модуля необходим для того, чтобы подынтегральная функция была всегда положительна, и минимум достигался при равенстве ее нулю, то есть при наискорейшем достижении равенства скорости двигателя желаемому номинальному значению. Иначе минимум будет при бесконечном отрицательном значении функционала, что будет достигаться при скорости

выше номинальной, что неприемлемо. Очевидно, чем выше входной сигнал, тем быстрее двигатель разгонится, и при управлении равном бесконечности он разгонится за время равное нулю, то есть мгновенно. Поэтому основное ограничение в системе должно быть на напряжение управления $|u| \le 1$. Предусмотрим максимально возможную физически десятикратную форсировку возбудителя. Понятно, что при этих условиях оптимальным управлением будет подача на вход максимально возможного сигнала, что приведет к многократному превышению током якоря допустимого максимального значения, недопустимому перерегулированию по току возбуждения и даже небольшому перерегулированию по скорости. То есть необходимо ограничить и все координаты системы $|x_i| \le 1$. Кроме того, во избежание возникновения коллекторного огня накладывается ограничение и на скорость нарастания тока якоря, в данном случае это 10 номиналов в секунду. Что касается ограничения на энергию управления, то на первый взгляд, очевидно, такие ограничения не нужны, т.к. это приведет к медленному росту скорости, причем до величины меньше номинальной, что неприемлемо. Такие ограничения нужны при управлении летательными аппаратами, где стоимость энергии (топлива) очень высока.

На рис. 1 показаны переходные процессы в полученной оптимальной системе управления. Видно, что максимально допустимый положительный входной сигнал подается всего на время 0.025 с. на время выхода скорости нарастания тока на максимально допустимое значение, и такое же время подается максимально допустимое отрицательное значение входа, когда эта скорость падает до нуля. То есть все возможности десятикратного форсирования действуют пренебрежимо незначительное время. Остальное же время движения на максимально допустимой скорости тока (примерно 0.125 с.) подается управление примерно в 4 раза меньшее допустимого. Далее управление начинает быстро знакопеременно переключаться между соответствующими максимальными значениями в течение всего оставшегося времени переходного процесса вплоть до установления скорости в номинальной величине (на рисунке из-за погрешностей вычисления и конечной величины дискретизации в 0.001 с. управление до максимальных значений при этих переключениях не доходит). Время переходного процесса (время вхождения скорости в 5%-ную зону от установившегося значения) равно 5,48 с., время достижения током максимально допустимого значения равно 0,16 с., энергия управления теоретически будет бесконечной, а на практике при конечной частоте переключений будет составлять недопустимо большое значение. В целом получается, что подробно сформулированный выше и логически обоснованный критерий оптимальности приводит к неприемлемому для реализации оптимальному управлению.

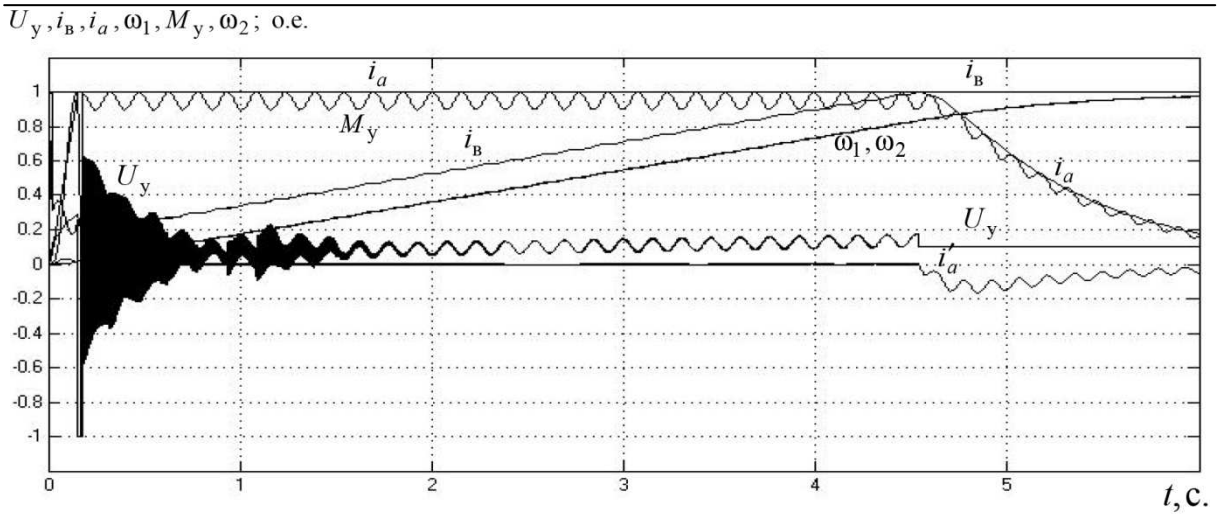


Рис. 1. Переходные процессы системы с ограничением всех сигналов без ограничения энергии управления

Анализ выбранного критерия оптимальности. Проанализируем подробнее оптимальные процессы в данной системе. На первом этапе подается максимальное положительное и затем максимально отрицательное управление, под действием которого происходит увеличение и затем некоторое уменьшение тока возбуждения. Под таким действием тока возбуждения скорость нарастания тока якоря возрастает до максимального значения, далее держится на максимуме и затем падает до нуля, обеспечивая тем самым наискорейшее достижение током якоря максимального значения. Далее на основном участке регулирования происходит разгон двигателя на максимальном токе. Ток якоря постоянен, а значит скорость (звено интегратора по сути) нарастает по линейному закону. Это в свою очередь определяет линейный закон нарастания отрицательной обратной связи противо-ЭДС, которая подается на апериодическое звено, отвечающее за ток якоря. В результате чтобы сохранить постоянство тока якоря, входной сигнал напряжения двигателя (то есть выходной сигнал ЭДС генератора) должен также линейно нарастать. А значит, ток возбуждения также нарастает линейно в течение всего времени, пока ток якоря постоянен. Но за ток возбуждения отвечает апериодическое звено, выход которого не может быть линейно возрастающим. Поэтому оптимальным управлением электропривода на таком участке будет переключающийся с бесконечной частотой входной сигнал напряжения с положительного максимально допустимого значения на отрицательное, причем отрицательное значение будет увеличиваться с каждым переключением по линейному закону. Кроме того, из-за колебаний упругого момента скорости движущихся масс и ток якоря также склонны к колебаниям. Поэтому для поддержания постоянного максимального значения тока якоря нужно менять соответственно входной сигнал. То есть часто переключающееся управление будет также иметь волнообразную огибающую с частотой колебаний упругого момен-

та, но в противофазе к нему. В конце переходного процесса управление становится равным номинальному при достижении током возбуждения номинального значения. Одновременно скорости достигают требуемого номинального значения при номинальном управлении и токе возбуждения.

Способы корректировки критерия оптимальности. Графики показывают, что нужно получить приемлемую для реализации форму входного сигнала, иначе говоря, избавиться от частопереключающейся его формы. Предлагаем три способа улучшения качества регулирования. В [1] уже упоминалось об обязательном введении в критерий оптимальности элемента, отвечающего за расход энергии управления, но с малым коэффициентом.

Поэтому *первый способ* заключается во введении в нашу систему такого элемента для подавления частых переключений. А для ограничения скорости тока введем такую максимальную форсировку, при которой эта скорость не превысит максимального значения. На рис. 2 показаны полученные переходные процессы при подобранных весовом коэффициенте при энергии управления 0.0001 и коэффициенте форсирования 3.15. Время переходного процесса равно 5.53 с., время достижения током максимального значения - 0.25 с. Видно, что чуть более чем трехкратного форсирования вполне достаточно для обеспечения требуемого ограничения скорости тока, сигнал управления при этом во время нарастания тока до максимума равен сначала максимально положительной, а затем максимально отрицательной величине.

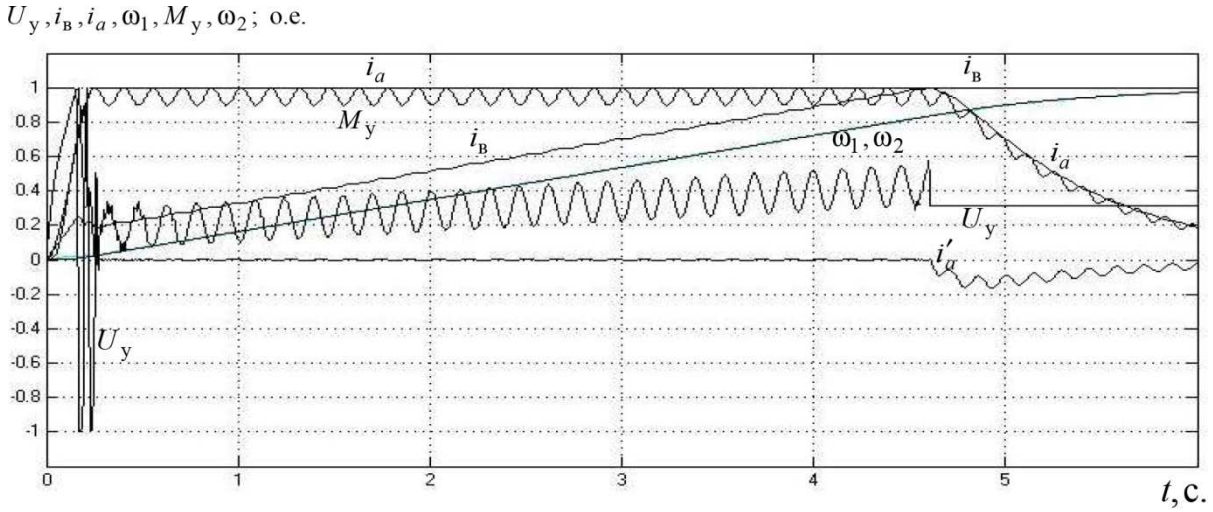


Рис. 2. Переходные процессы системы с замкнутой областью управления и всеми ограничениями

Второй способ заключается во введении минимизации энергии управления с таким коэффициентом, который обеспечивает как ограничение управления на уровне не выше максимального, так и ограничивает

скорость нарастания тока максимально допустимым значением, при этом еще и исключает часто переключающиеся формы этого сигнала. На рис. 3 показаны соответствующие результаты моделирования процесса пуска при подобранном весовом коэффициенте при энергии управления 0.009. Время переходного процесса составляет 5.49 с., время достижения током максимально допустимой величины также равно 0.2 с. Видно, что в течение времени достижения током максимума скорость его нарастания не превышает допустимого значения, а управление представляет сигнал с примерно 9.7-кратным форсированием.

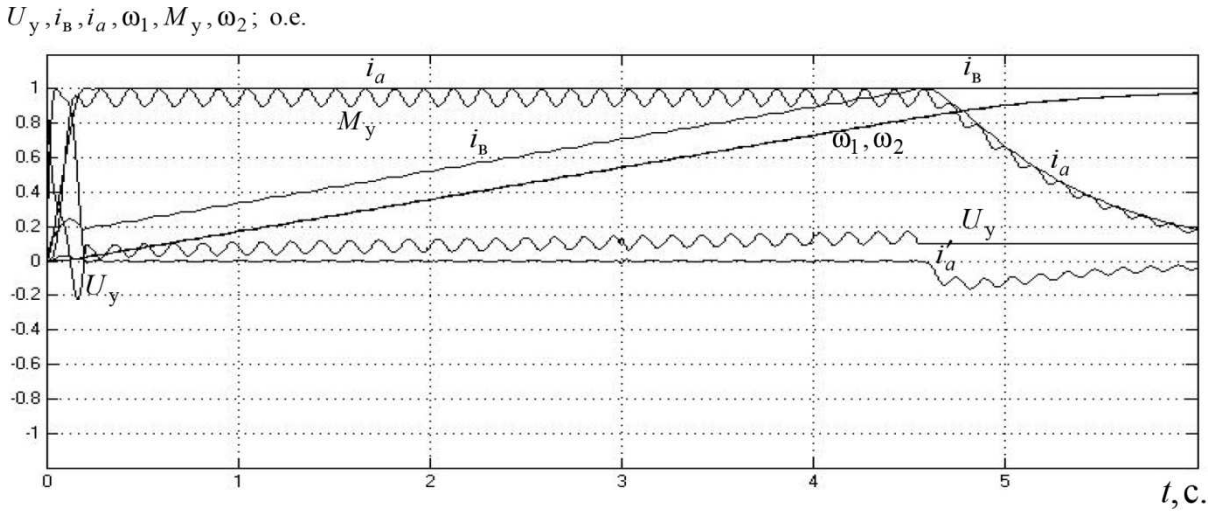


Рис. 3. Переходныне процессы системы с открытой областью управления и всеми ограничениями

Третий способ заключается во введении минимизации квадрата скорости тока якоря с весовым коэффициентом, который обеспечил бы как ограничение этой координаты максимальной величиной, так и исключил бы частопереключающую форму управления. На рис. 4 показаны соответствующие переходные процессы при весовом коэффициенте при квадрате скорости тока 0.0165. Время переходного процесса равно 5.51 с., время достижения током максимального значения 0.3 с. Скорость тока не превышает допустимого значения, при этом в начале переходного процесса управление подается с максимальной 10-кратной форсировкой.

Время достижения током максимального значения у всех способов примерно на треть больше, чем на рис. 2. Но такая разница оказывается незначительной, т.к. все способы дают примерно одинаковое время переходного процесса, причем это время незначительно больше минимального, показанного на рис. 2. Все способы надежно ограничивают скорость тока якоря и исключают частные переключения входного сигнала.

Заметим, что исследованная выше оптимальная система может быть получена только как система программного управления численным способом. На практике же для построения систем с обратной связью оптимального или предиктивного оптимального управления [10] желательно иметь аналитическую формулу регулятора, при этом учитывающую прямо или косвенно все ограничения. Для построения такого закона управления воспользуемся результатами [3] и [4].

Окончательный выбор критерия оптимальности. В качестве примера примем в классическом квадратичном функционале весовые коэффициенты при токе возбуждения, токе якоря, скоростях и энергии управления равными нулю, то есть будем минимизировать квадрат отклонения упругого момента от максимально допустимого значения и квадрат отклонения скорости тока от нулевого значения. В результате критерий оптимальности для нашего электропривода:

$$J = \int_0^t \left(q_i (z_i - x_i)^2 \right) dt = \int_0^t \left(q_3 (z_3 - x_3)^2 + q_5 x_5^2 \right) dt . \qquad (2)$$

где z_i – желаемые установившиеся значения координат; q_i – весовые коэффициенты.

После составления и преобразования уравнений Эйлера-Лагранжа получаем следующую систему неоднородных уравнений:

$$\begin{cases} \dot{x}_0 = -a_{00}x_0 + b_0\left(z_u + \dfrac{b_0}{2r}\cdot\lambda_0 + \dfrac{b_5}{2r}\cdot\lambda_5 \right), \\ \dot{x}_1 = a_{10}x_0 - a_{11}x_1 - a_{12}x_2, \\ \dot{x}_2 = a_{21}x_1 - a_{23}x_3, \\ \dot{x}_3 = a_{31}x_1 - a_{32}x_2 - a_{33}x_3 - a_{34}x_4, \\ \dot{x}_4 = a_{43}x_3, \\ \dot{x}_5 = -a_{50}x_0 - a_{51}x_1 + a_{53}x_3 - a_{55}x_5 + b_5 u \\ \dot{\lambda}_0 = 2q_0x_0 + a_{00}\lambda_0 - a_{10}\lambda_1 + a_{50}\lambda_5 - 2q_0z_0, \\ \dot{\lambda}_1 = 2q_1x_1 + a_{11}\lambda_1 - a_{21}\lambda_2 - a_{31}\lambda_3 + a_{51}\lambda_5 - 2q_1z_1, \\ \dot{\lambda}_2 = 2q_2x_2 + a_{12}\lambda_1 - a_{32}\lambda_3 - 2q_2z_2, \\ \dot{\lambda}_3 = 2q_3x_3 + a_{23}\lambda_2 + a_{33}\lambda_3 - a_{43}\lambda_4 - a_{53}\lambda_5 - 2q_3z_3, \\ \dot{\lambda}_4 = 2q_4x_4 + a_{34}\lambda_3 - 2q_4z_4, \\ \dot{\lambda}_5 = 2q_5x_5 + a_{55}\lambda_5 - 2q_5z_5 \end{cases} \qquad (3)$$

Решая систему (3) при соответствующих z_i, q_i и граничных условиях для задачи со свободным правым концом, получаем оптимальные траектории и управление, минимизирующие (2). Это соответствует реше-

нию для замкнутой области управляющего сигнала [4] и третьему представленному выше способу улучшения качества регулирования. Если пользоваться показанным выше первым или вторым способом улучшения качества регулирования, то решение для соответствующих замкнутой и открытой области управления строится, как показано в [4] и [3] соответственно. На рис. 5 показаны переходные процессы в данной системе.

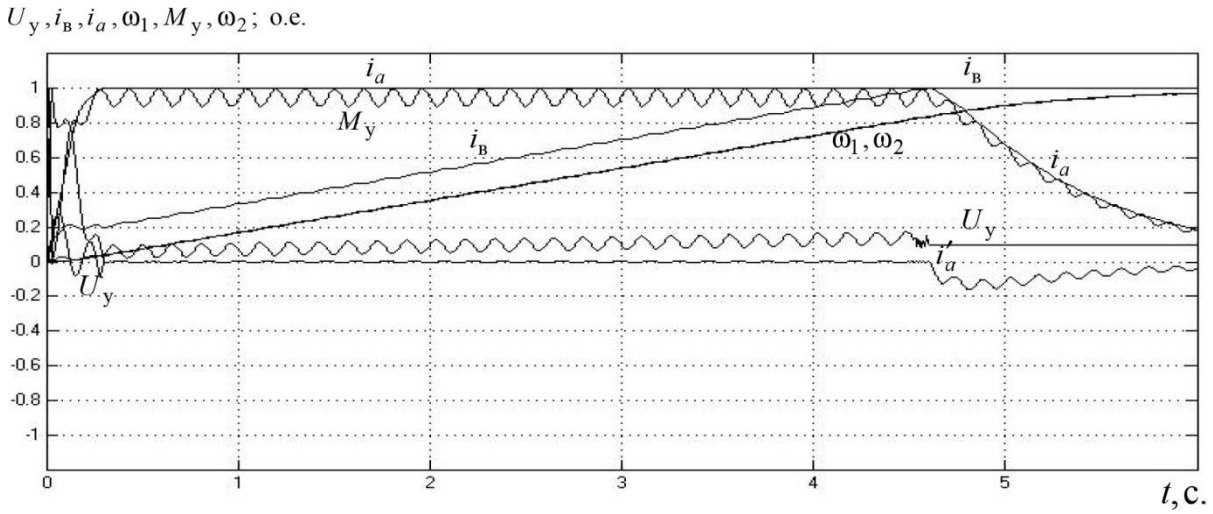


Рис. 4. Переходные процессы системы с минимизацией увадрата производной тока и всеми ограничениями

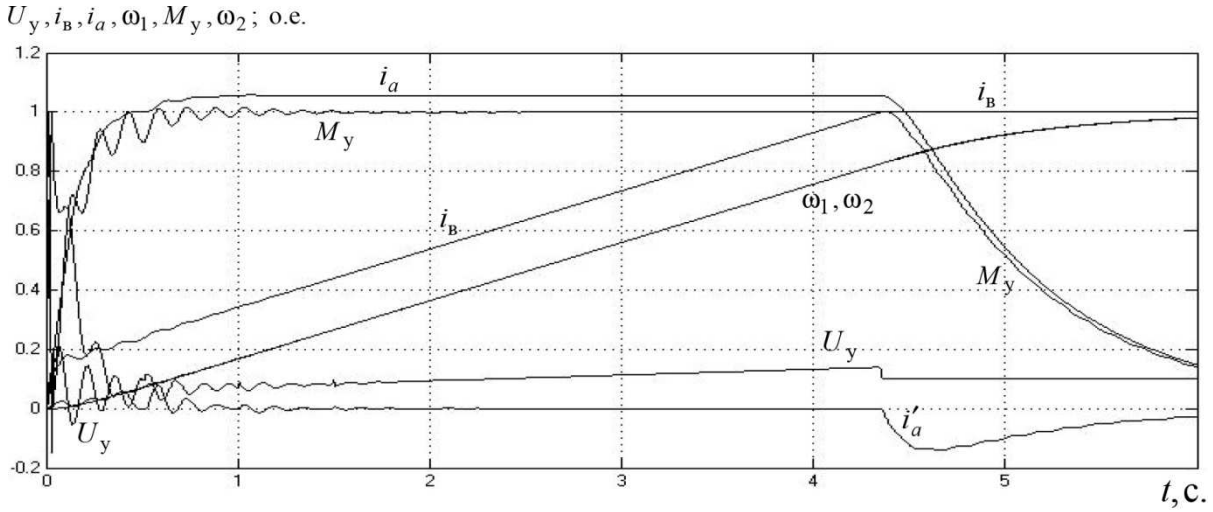


Рис. 5. переходны процессы системы с аналитически сконструированным результатом

Анализ полученных результатов. Вместо минимизации квадрата одной из скоростей (как это делается обычно) минимизация квадрата отклонения упругого момента от максимально допустимого значения z_3 *на первом участке* даст наиболее быстрое достижение упругим моментом максимальной величины в начале переходного процесса при перерегули-

ровании менее 2%. Быстрее достичь максимального значения можно только, увеличивая перерегулирование, в нашем случае считаем кратковременное превышение максимального значения на 2% приемлемым. В тех случаях, когда превышать максимальный уровень нельзя, можно ввести дополнительную аварийную отсечку, что будет также незначительным отходом от оптимальности. Если вместо упругого момента минимизировать квадрат отклонения тока якоря, то это может привести к опасным колебаниям упругого момента, поэтому это приемлемо только в одномассовой системе [3, 4]. *Второй участок* движения на максимальном токе и моменте можно считать оптимальным. *На третьем участке* данный критерий оптимальности держал бы ток и момент на максимальном значении и после достижения скоростями номинальных значений, что обеспечивает дальнейший разгон системы. Для обеспечения оптимальности этого участка, при достижении током возбуждения номинального значения переключаем входное напряжение на желаемое установившееся номинальное значение, что ограничит, как сам ток возбуждения, так и скорость движущихся масс номинальными значениями.

Вывод. Таким образом, разработан адекватный критерий оптимальности, соответствующий физическим требованиям к качеству функционирования системы на практике, математическая формулировка которого позволяет построить реализуемый на практике оптимальный управляющий сигнал. Имеем также точную аналитическую формулу, определяющую оптимальное управление электроприводом при прямом или косвенном учете ограничений на все координаты и входной сигнал. Учтены ограничения на скорость изменения тока якоря для исключения опасности возникновения коллекторного огня, а также исключены релейные частые переключения входного сигнала, что значительно повышает энергетические показатели системы управления.

Список литературы

1. Подборский П.Э. Критический анализ оптимальных систем максимального быстродействия [текст] / П.Э. Подборский, Э.Н. Подборский // Электромеханика, 2012. №. 5. С. 55 – 60.

2. Подборский П.Э. О нецелесообразности использования линейной по фазовым переменным задачи оптимального управления [текст] / П.Э. Подборский, Э.Н. Подборский // Вестник ДГУ, 2014. №. 1. С. 89 – 96.

3. Подборский П.Э. Аналитическое конструирование регуляторов электропривода одномассовой системы генератор-двигатель [текст] / П.Э. Подборский, Э.Н. Подборский // Вестник ВГУ, 2013. №.2. С. 42 – 47.

4. Подборский, П.Э. Аналитическое конструирование регуляторов электропривода одномассовой системы Г-Д. Учет ограничений типа неравенств [текст] / П.Э. Подборский, Э.Н. Подборский // Вестник ДГУ, 2014. №. 1. С. 81 – 88.

5. Bryson A.E. Jr., Ho Y.C. Applied Optimal Control. Hemisphere Publishing,Washington, D.C., 1975.

6. Athans M., Falb P.L. Optimal Control: An Introduction to the Theory and Its Applications. Dover, New York, 1966.

7. Kalman R.E. The theory of optimal control and the calculus of variations. University of California Press, Berkeley, 1963.

8. Kwakernaak H., Sivan R. Linear optimal control systems. John Wiley & Sons, Ltd, New York, 1972.

9. Citron S.J. Elements of Optimal Control. Holt, Rinehart and Winston, New York, 1969.

10. Rodriguez J., Cortes P. Predictive Control of Power Converters and Electrical Drives. John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, 2012.

Подборский Павел Эдуардович, канд. техн. наук, доц., panpodpe@mail.ru, Республика Хакасия, Саяногорск, Саяно-Шушенский филиал Сибирского федерального университета,

Подборский Эдуард Николаевич, канд. техн. наук, доц., panpodpe@mail.ru, Республика Хакасия, Саяногорск, Саяно-Шушенский филиал Сибирского федерального университета

CHOICE OF AN OPTIMALITY CRITERION
FOR ELECTRIC DRIVE OF TWO-MASS ENGINE-GENERATOR SYSTEM

P.Je. Podborski, Je.N. Podborski

Control of electromechanical systems with square-law cost function is analyzed on an example of the DC-drive for two-mass engine-generator system. The new optimum criterion is developed and the analytical formula of a regulator is received, this allows taking into account state coordinates and input signal constraints. Additionally restriction on increase of a current speed took into consideration and sharp switchings of control signal are excluded.

Key words: DC-drive, electromechanical system, one-mass system, control system, two points boundary problem, optimal control, cost function, linear quadratic regulator, LQR, quadratic functional.

Podborski Pavel Jeduardovich, candidate of technical sciences, docent, panpodpe@mail.ru, Republic of Khakassia, Sayanogorsk, Sayano-Shushensky Branch of Siberian Federal University,

Podborski Jeduard Nikolaevich, candidate of technical sciences, docent, panpodpe@mail.ru, Republic of Khakassia, Sayanogorsk, Sayano-Shushensky Branch of Siberian Federal University

УДК 621.311

КОМПЕНСАЦИЯ НЕСИНУСОИДАЛЬНЫХ ТОКОВ И ТОКОВ НЕСИММЕТРИИ В ЧЕТЫРЕХПРОВОДНЫХ СЕТЯХ НИЗКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

А.А. Белицкий, Я.Э. Шклярский

Исследуется влияние несимметрии и несинусоидальности на трехфазную четырехпроводную электрическую сеть. Также исследована электрическая сеть предприятия. Выявлено, что сеть несимметрична, спектр фазных токов содержит значительные гармонические составляющие, величина тока в нулевом провода превышает величины фазных токов. Выявлена необходимость создания критерия выбора компенсирующих устройств.

Ключевые слова: высшие гармоник, несимметрия фаз, нейтральный провод, перегрузка.

Сегодня достижения в области технологии создают большие преимущества для человека во всем мире. Все чаще и чаще в жизни человека используется современное оборудование, спроектированное с помощью передовых электронных технологий [1, 2, 3]. Однако этот факт провоцирует ухудшение качества электроэнергии. Речь идет о значительном влиянии современного электрооборудования на возникновение высших гармоник и несимметрии в электрической сети.

Отсюда следует, что одним из важных вопросов в области электроснабжения является анализ качества электроэнергии современных промышленных предприятий и непромышленных объектов.

В большинстве случаев ухудшение качества электроэнергии порождается самими потребителями в связи с использованием оборудования, содержащего нелинейные элементы [4, 5]. Это оборудование часто требует высококачественного электропитания для их нормальной работы. Но так как оно само является основным генератором нарушений, то в конечном итоге очевидно взаимовлияние работы оборудования и качества электроэнергии [6, 7].

В настоящее время энергопотребители представлены достаточно широким диапазоном как типов, так и потребляемых мощностей, начиная от ламп накаливания, стационарных компьютеров, электроприводов с частотным регулированием и заканчивая дуговыми печами и мощным медицинским оборудованием. Работа указанных приемников связана с возникновением высших гармоник и несимметрии, которые в свою очередь могут оказывать значительное влияние на работу остального оборудования [8].

Дополнительной проблемой при наличии высших гармоник и несимметрии является возникновение больших токов в нулевом проводнике в четырехпроводной сети, что может привести к аварийному режиму работы оборудования.

Разработка подхода к выбору средств по уменьшению токов нулевого провода позволит не только существенно снизить расходы на обслуживание электрической сети, но и уменьшить влияние несинусоидальных и несимметричных режимов работы на сеть в целом.

В табл. 1 приведены основные средства по уменьшению указанных выше явлений, применяемые в настоящее время [9], где АПФ – активный последовательный фильтр, АПрФ – активный параллельный фильтр, ГФ – гибридный фильтр.

Таблица 1

Основные средства по улучшению качества электроэнергии

№ п/п	Специфика применения	Тип фильтра			
		АПФ	АПрФ	ГФ из АПФ и ППрФ	ГФ из АПФ и АПрФ
1	Гармоники напряжения	+		+	+
2	Фликер напряжения	+	+		+
3	Провал напряжения	+	+	+	+
4	Стабилизация напряжения	+	+	+	+
5	Компенсация реактивной мощности		+	+	+
6	Гармоники тока		+	+	+
7	Компенсация тока нулевого провода		+	+	
8	Обеспечение симметрии		+		
9	Гармоники и стабилизация напряжения	+			+
10	Гармоники, фликер, провал и стабилизация напряжения	+			+
11	Гармоники тока и напряжения, стабилизация напряжения и компенсация реактивной мощности			+	+
12	Гармоники напряжения и компенсация реактивной мощности			+	+
13	Гармоники тока и компенсация реактивной мощности		+	+	+
14	Компенсация реактивной мощности, тока нулевого провода, гармоники тока и обеспечение симметрии		+		
15	Компенсация реактивной мощности, гармоники тока и обеспечение симметрии		+		+
16	Гармоники тока и обеспечение симметрии		+		
17	Компенсация реактивной мощности, тока нулевого провода и обеспечение симметрии		+		

Приведенные в табл. 1 средства представляют собой достаточно эффективные мероприятия по компенсации несимметрии и несинусоидальности. Однако, до сих пор, в этих условиях отсутствуют четкие рекомендации по уменьшению токов в нулевом проводе, значение которых может превышать значение фазного тока в несколько раз.

Отсюда следует, что для разработки устойчивого критерия по выбору средств, уменьшающих величину нулевого тока, следует провести системный анализ ситуаций, следствием которых является возникновение тока нулевого провода.

Методика. Высшие гармоники тока кратные трем (т.е. 3, 9, 15, 21 и т. д.), определяющие высокое значение коэффициента амплитуды и генерируемые однофазными нагрузками, имеют специфическое результирующее воздействие в трехфазных четырехпроводных системах. В сбалансированной (симметричной) трехфазной системе гармонические (синусоидальные) токи во всех трех фазах сдвинуты на 120 градусов по отношению друг к другу, и в результате сумма токов в нейтральном проводнике равна нулю.

Это утверждение остается справедливым для всех гармоник кроме гармоник кратных трем. В трехфазных сетях они сдвинуты на 360 градусов относительно друг друга, совпадают по фазе и образуют нулевую последовательность. Нечетные гармоники, кратные третьей, суммируются в проводнике нейтрали. С учетом того, что они составляют большую долю в действующем значении фазных токов, общий ток в нейтрали может превышать фазные токи.

Так, например, при доле 3-ей гармоники в фазном токе в 35%, ток нейтрали составит 105% от фазного тока. Отсюда можно сделать вывод, что при наличии в сети высших гармоник, кратных трем, ток в нейтрали может превышать фазные токи, что вызывает необходимость увеличения сечения проводников нейтрали трехфазных четырехпроводных систем, которое как правило составляет 0,5 сечения фазного проводника. Гармоники, кратные третьей, приводят к падению напряжения как в нейтрали, так и в фазных проводниках, искажая форму напряжения на других нагрузках, подключенных к этой сети.

Также не меньший вклад в ток нулевого провода вносит несимметричная нагрузка.

Несимметричные режимы в электрических сетях возникают по следующим причинам:

1) неодинаковые нагрузки в различных фазах;

2) неполнофазная работа линий или других элементов в сети;

3) различные параметры линий в разных фазах.

Нейтральный провод обеспечивает симметрию фазных напряжений приемника при несимметричной нагрузке.

Но при значительной несимметрии ток нулевого провода может превышать фазные токи, что создает проблему перегрузки нулевого провода и возможного его повреждения.

На рис. 1 для примера представлены временные диаграммы изменения фазных токов в ЛЭП [10], где наиболее загруженной является фаза «С», по которой протекает средний ток, равный 35,4 А. В фазах «А» и «В» ток, соответственно составляет 12,8 и 9,3 А. Ток нейтрали в среднем составил 25 А, что значительно превышает токи в фазах А и В.

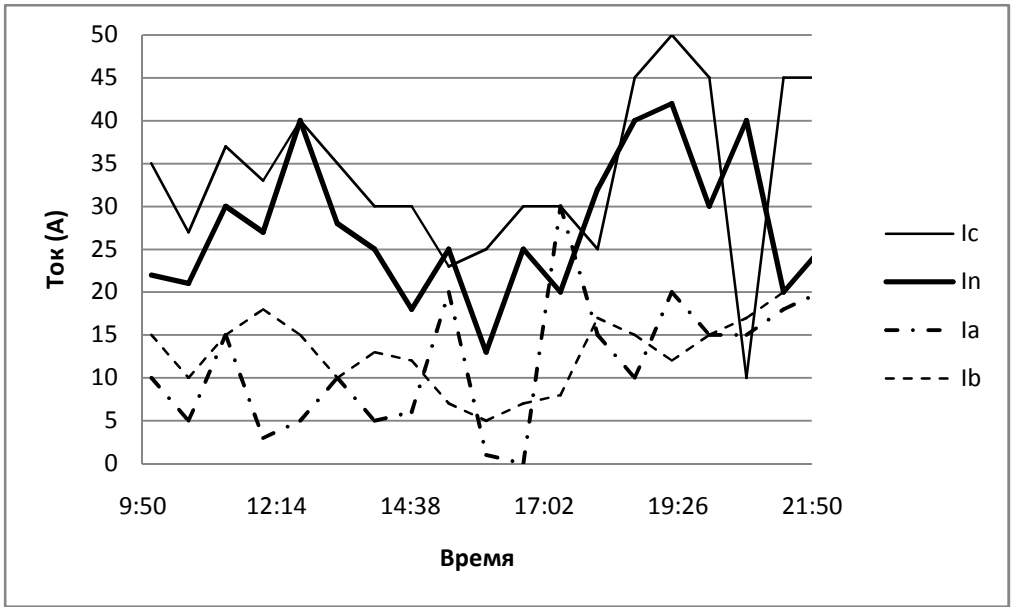


Рис. 1. Временная диаграмма изменения токов в ЛЭП:
I_a - ток в фазе А; I_b - ток в фазе В; I_c - ток в фазе С;
I_n - ток в нейтрали

Такой «перекос фаз» приводит к возникновению коэффициентов несимметрии токов по обратной (К2i) и нулевой (К0i) последовательностям. Для вышеприведенного примера их средние значения соответственно равны 0,47 и 0,45. Однако, в отличие от коэффициентов несимметрии по напряжению, коэффициенты несимметрии по току не нормируются.

Показателями КЭ, относящимися к несимметрии напряжений в трехфазных системах, являются коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности K2U и коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности K0U.

Для указанных показателей КЭ установлены следующие нормы:

- значения коэффициентов несимметрии напряжения по обратной последовательности K2U и несимметрии напряжения по нулевой последовательности K0U в точке передачи электрической энергии, усредненные в интервале времени 10 мин, не должны превышать 2 % в течение 95 % времени интервала в одну неделю;

- значения коэффициентов несимметрии напряжения по обратной последовательности K2U и несимметрии напряжения по нулевой последовательности K0U в точке передачи электрической энергии, усредненные в интервале времени 10 мин, не должны превышать 4 % в течение 100 % времени интервала в одну неделю.

Эксперимент. Ярким примером негативного влияния высших гармоник и несимметрии являются результаты исследований, проведенных авторами в электрической сети медицинского учреждения.

Исследованию подверглась четырехпроводная сеть 0.4 кВ, основной нагрузкой которой являлись приемники, представленной в табл. 2.

Таблица 2

Исследуемые приемники четырехпроводной сети

Тип нагрузки	Исполнение	Мощность
Магнито-резонансный томограф (МРТ)	Трехфазное, нагрузка симметричная	100 кВт
Компьютерный томограф (КТ)	Трехфазное, нагрузка несимметричная	50-80 кВт

Измерения проводились в узлах нагрузки, к которым подключена указанная в табл. 2 нелинейная нагрузка.

На рис. 2-3 представлены кривые тока на шинах 0,4 кВ.

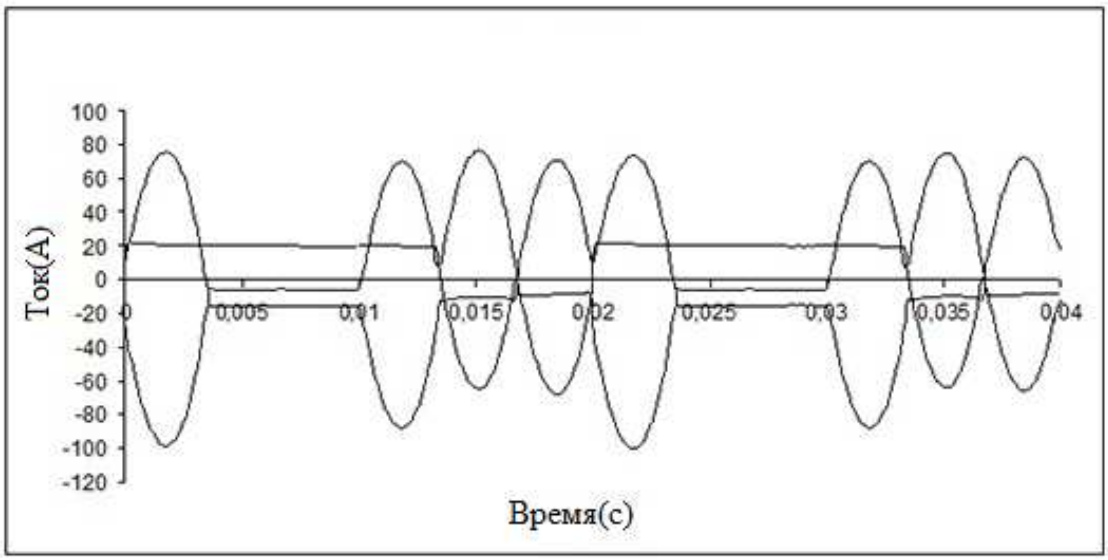


Рис. 2. Кривая тока в фазах МРТ

С помощью стандартной программы Matlab было произведено соответствующее разложение кривых тока в ряд Фурье, на основе чего были получены их спектры, представленные на рис. 4-5.

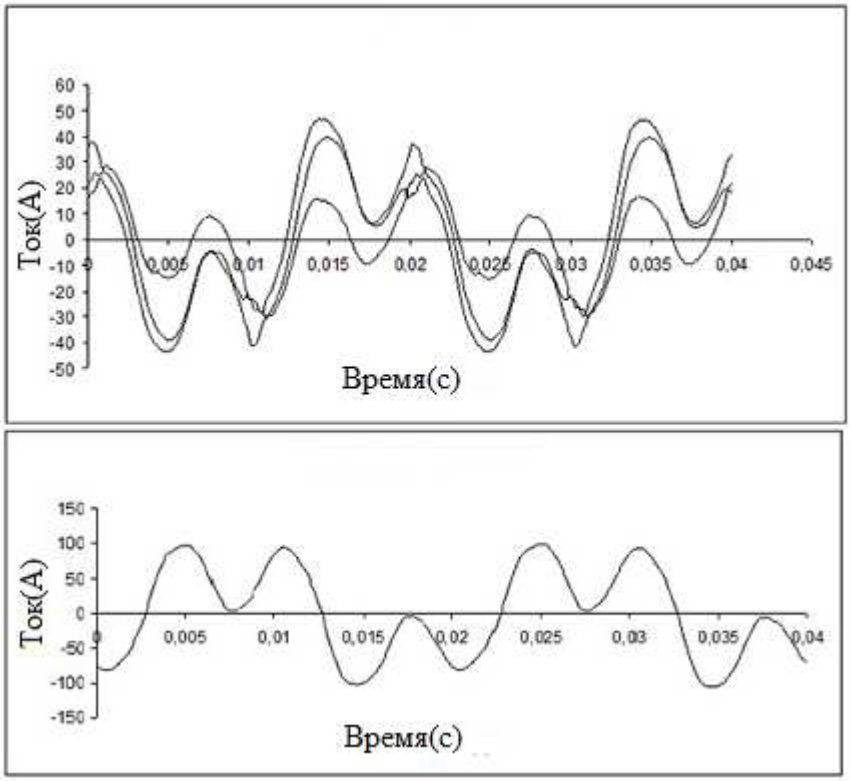


Рис. 3. Кривая тока в фазах и нулевом проводе КТ

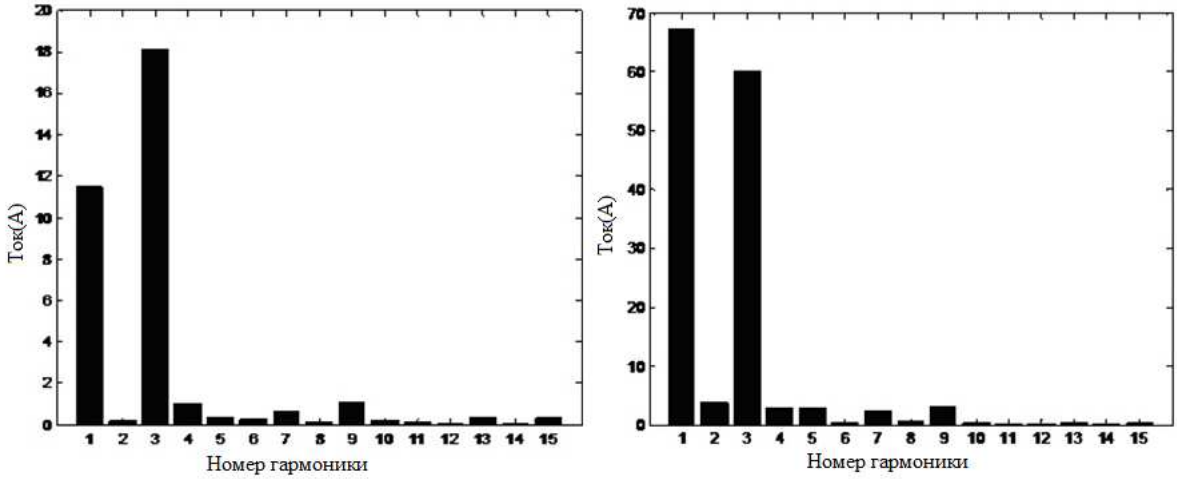


Рис. 4. Спектр тока в фазах и нулевом проводе КТ

Следует подчеркнуть, что суммарная нагрузка на фидере, на котором были произведены измерения, представляла собой комбинацию трехфазной и однофазной нагрузки.

Расчет коэффициентов несимметрии производился по методу симметричных составляющих. По графикам нагрузки были получены уравнения для каждой из фаз, из которых были выделены выражения для основной гармонической составляющей и математически найдены токи прямой,

нулевой и обратной последовательности. После чего по формулам (1) и (2) были найдены коэффициенты несимметрии по прямой и обратной последовательности.

$$K_{2I} = \frac{I_2}{I_1} \cdot 100, \quad (1)$$

где K_{2I} - коэффициент несимметрии тока по обратной последовательности, %; I_2 - ток обратной последовательности, А; I_1 - ток прямой последовательности, А.

$$K_{0I} = \frac{I_0}{I_1} \cdot 100, \quad (2)$$

где K_{0I} - коэффициент несимметрии тока по нулевой последовательности, %; I_0 - ток нулевой последовательности, А; I_1 - ток прямой последовательности, А.

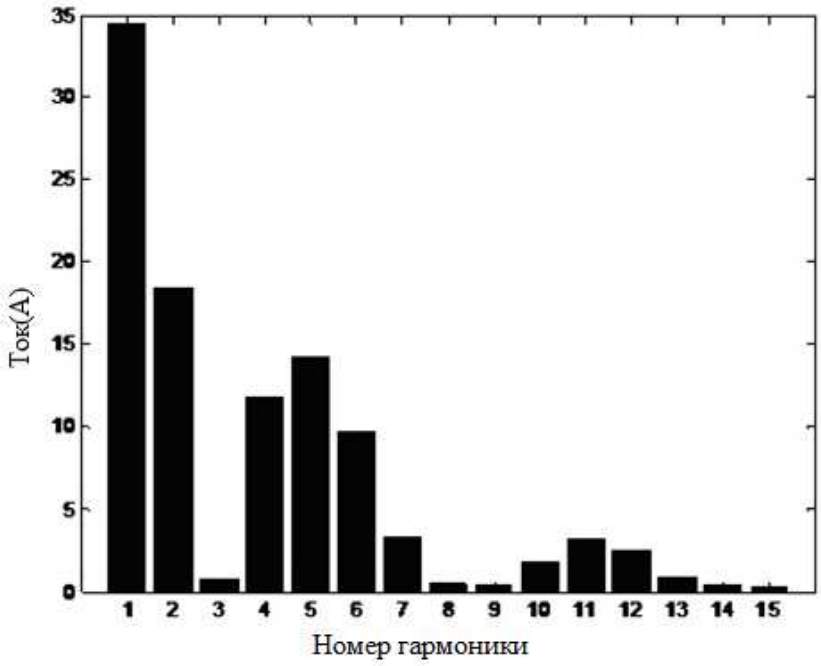


Рис. 5. Спектр тока МРТ

Анализ полученных результатов показал, что:

- значения обобщенного коэффициента несинусоидальности по напряжению не превышают 2.6% , что допускается нормативными документами [11]. Этот факт объясняется жесткими параметрами сети;

- значения коэффициента несинусоидальности по току составляют:

А) для КТ – 180%;

Б) для нулевого провода КТ – 100%;

В) для МРТ – 180%.

- потенциал нейтрали практически равен нулю, т. к. сеть выполнена с глухозаземленной нейтралью;

- фазные токи содержат 1, 3, 5, 7, 9, 11 гармоники. Из высших гармоник наиболее выражена третья;

- ток в нулевом проводе содержит кроме первой токи высших гармоник;

- коэффициент несимметрии по обратной последовательности для КТ составил 163.3%, по нулевой последовательности - 63,4%

Таким образом на основе исследования несимметричной сети при наличии нелинейной нагрузки была выявлена проблема по возникновению больших токов в нулевом проводе четырехпроводной сети. Причем существенным фактом является необходимость не только определения совместного влияния несимметрии и несинусоидальности, но и их доли в величине тока в нейтрали.

Поскольку нормированные показатели по несимметрии и несинусоидальности в стандартах приводятся в виде относительных коэффициентов, то выводы по проведенному исследованию следует распространять на все четырехпроводные сети, содержащие нелинейную и несимметричную нагрузки.

Выводы:

1) Причиной возникновения значительных величин тока в нулевом проводе могут быть как несинусоидальность фазной нагрузки, так и ее несимметрия, либо их совместное действие. Из примера, приведенного в статье, для несимметричной и нелинейной нагрузки мощностью 70 кВт коэффициент несимметрии по нулевой последовательности составил 63,4%, коэффициент несинусоидальности фазых токов – 180%, что привело к возникновению тока нулевого провода величиной 80 А с коэффициентом несинусоидальности 100%, причем величина тока нулевого провода превысила токи фаз в 1,5 раза. Очевидно, что такие выводы можно распространить на нагрузку любого предприятия, т.к. влияние несимметрии и несинусоидальности однотипно вне зависимости от мощности нелинейной и несимметричной нагрузки.

2) Выявлена необходимость изучения совместного влияния несимметрии и несинусоидальности нагрузки на ток в нулевом проводе с целью дальнейшей разработки критерия выбора средств их компенсации. Для нагрузки, рассмотренной в статье, вклад несинусоидальности в ток нулевого провода составил около 45 А, вклад несимметрии – 65 А, из чего можно сделать вывод, что при различных коэффициентах несинусоидальности и несимметрии их вклады будут различны. То есть критерий позволит выбрать средства компенсации искажений в зависимости от того, чей вклад в ток нулевого провода будет значительнее.

Список литературы

1. Shonin O.B., Pronin M.V., Vorontsov A.G., Gogolev G.A. The Features of a Drive System for Pump-Storage Plant Applications based on the use of Double-Fed Induction Machine with a Multistage-Multilevel Frequency Converter: Proceedings of 15-th International Power Electronics and Motion Control Conference, EPE-PEMC 2012. Novi Sad, Serbia, 2012. P. DS1b.7-1 – DS1b.7-8.

2. Ivanchenko D.I., Belsky A.A. Simulation of Dynamic Operating Modes of a Hybrid Wind Power Plant: AENSI Journals / Advances in Environmental Biology. №8(13). Jordan, 2014. P.464–467.

3. Voityk I.N., Kopteva A.V. Noncontact measurement method for assessing oil quality and quantity in main pipeline: International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS-2015). Tomsk. Russia, 2015.

4 Shklyarskiy Y.E., Yakovleva E.V. Concept for electric power quality indicators evaluation and monitoring stationary intellectual system development // International Journal of Applied Engineering Research. Vol. 11. N. 6, 2016. P. 4270-4274.

5. Bardanov A.I., Skamyin A.N. Mathematical Modeling of Power in the Presence of High Harmonics // 2015 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS), 2015. P. 1-3.

6. Добуш В.С. Анализ способов и средств компенсации высших гармоник// Современные научные исследования и инновации, 2015. № 5-2 (49). С. 55-59.

7. Скамьин А.Н. Алгоритмы выбора средств компенсации высших гармоник в сетях горного предприятия // Известия ВУЗов «Горный журнал». № 8. 2012. С. 80-84.

8. Ramos M. An Assessment of the Electric Power Quality and Electrical Installation Impacts on Medical Electrical Equipment Operations at Health Care Facilities. American Journal of Applied Sciences. 6(4), 2009. P. 638-645.

9. Om Prakash Mahela, Abdul Gafoor Shaik Topological aspects of power quality improvement techniques: A comprehensive overview, Renewable and Sustainable Energy Reviews. 58, 2016. P. 1129–1142.

10. Гантулга Дамдинсурэнгийн Способы нормализации качества и снижения потерь электрической энергии в сельских распределительных сетях 0.38 кВ Монголии: дис. канд. техн. наук. Иркутский гос. аграрный университет. Иркутск, 2015.

11. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Стандартинформ, 2014.

Шклярский Ярослав Элиевич, д-р техн. наук, доц., зав. кафедрой, js-10@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский горный университет,

Белицкий Антон Арнольдович, асп., belitckiy.anton@gmail.com, Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский горный университет

COMPENSATION OF NON-SINUSOIDAL CURRENTS AND ASSYMETRY CURRENTS IN FOUR-WIRE LOW-VOLTAGE NETWORK

A.A. Belitskiy, Y.E. Shklyarskiy

In the article the impact of phase unbalance and harmonics in the three-phase four-wire electrical network was carried out. The electrical network in the object is investigated. Some statements were revealed: the unbalance of network; phase currents spectrum contains significant harmonics; neutral wire current is much higher than the value of the phase currents; the necessity of creating a criterion for choosing the compensating device.

Key words: Harmonics, phase unbalance, the neutral wire, overload.

Shklyarskiy Yaroslav Elievich, doctor of technical science, docent, head of department, js-10@mail.ru, Russia, Saint-Petersburg, Saint-Petersburg Mining University,

Belitskiy Anton Arnoldovich, postgraduate, belitckiy.anton@gmail.com, Russia, Saint-Petersburg, Saint-Petersburg Mining University

УДК 681.51

СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНОГО ПО ТОЧНОСТИ РЕГУЛЯТОРА СКОРОСТИ ВЕНТИЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Т.З. Нгуен, Ч. Кхань, В.В. Сурков

Рассмотрены вопросы аналитического конструирования оптимального по точности регулятора скорости синхронного двигателя с датчиком положения ротора (вентильного электропривода) для следящих систем, инвариантных к действиям внешних дестабилизирующих факторов и изменению параметров систем. Показана структурная схема системы управления скорости вентильного электропривода. Приводятся результаты математического моделирования характеристик системы в различных режимах работы.

Ключевые слова: вентильный двигатель, оптимальная точность, аналитическое конструирование, следящая система.

Основными задачами технического прогресса являются максимальная механизация и автоматизация производственных процессов. В решении поставленных задач играют непосредственную роль системы автоматического регулирования (САР) скорости двигателей и оптимальные следящие приводы. Оптимальные системы дают возможность для дальнейшего повышения производительности труда, улучшения качества продукции, уменьшение расхода электроэнергии, параллельно с этим повышают надежность в работе.

Главной целью данной работы - проверить синтезированые оптимальные по точности законый управления током, скоростью.

Воспользуемся уравнениями Горева-Парка в координатах *d,q* [2] для синхронного двигателя при токе возбуждения $I_f = const$:

$$\begin{cases} R \cdot i_d + L \cdot \dfrac{di_d}{dt} - \lambda \cdot L \cdot \omega \cdot i_q = u_d; \\ R \cdot i_q + \lambda \cdot L \cdot \dfrac{di_q}{dt} + L \cdot \omega \cdot i_d + M \cdot I_f \cdot \omega = u_q; \\ J \cdot \dfrac{d\omega}{dt} - m_{эм} = -m_н; \\ \dfrac{3}{2} \cdot [M \cdot I_f \cdot i_q - L \cdot (1-\lambda) \cdot i_d \cdot i_q = m_{эм}, \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} u_d = \dfrac{2}{3} \cdot [u_A \cdot \cos(\upsilon) + u_B \cdot \cos(\upsilon - \rho) + u_C \cdot \cos(\upsilon + \rho); \\ u_q = \dfrac{2}{3} \cdot [u_A \cdot \sin(\upsilon) + u_B \cdot \sin(\upsilon - \rho) + u_C \cdot \sin(\upsilon + \rho), \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} i_d = \dfrac{2}{3} \cdot [i_A \cdot \cos(\upsilon) + i_B \cdot \cos(\upsilon - \rho) + i_C \cdot \cos(\upsilon + \rho); \\ i_q = \dfrac{2}{3} \cdot [i_A \cdot \sin(\upsilon) + i_B \cdot \sin(\upsilon - \rho) + i_C \cdot \sin(\upsilon + \rho), \end{cases} \quad (3)$$

где υ – угол поворота ротора синхронного двигателя, $\upsilon = \int \omega dt + \upsilon_0$; $\rho = 120^0$ - угол сдвига осей фазных обмоток двигателя относительно друг друга; R – активное сопротивление обмотки статора двигателя; L – коэффициент индукции по продольной оси двигателя; λ – коэффициент явнополюсности; J – момент инерции вращающихся масс; ω – скорость вращения ротора синхронного двигателя; M – коэффициент взаимоиндукции между обмоткой статора и ротора; $m_{эм}$ – электромагнитный момент вращения вала двигателя; $m_н$ – момент нагрузки на валу двигателя.

Из уравнений (1) следует, что синхронный двигатель представляет собой объект регулирования с двумя управляющими воздействиями: u_d и u_q.

Далее проведём синтез двух каналов d и q регулятора тока i_d и i_q. Воспользовавшись теорией аналитического конструирования регуляторов [4] или более простой в использовании, изложенной в [1] уравнении, запишем наиболее точный и одновременно оптимальный по быстродействию закон управления для регулятора тока i_d и i_q:

$$\begin{aligned} u_d &= U_m \cdot sign(i_{dзад} - i_d) = U_m \cdot sign(k \cdot i_{dзад} - k \cdot i_d) = U_m \cdot sign(u_{dзад} - k \cdot i_d); \\ u_q &= U_m \cdot sign(i_{qзад} - i_q) = U_m \cdot sign(k \cdot i_{qзад} - k \cdot i_q) = U_m \cdot sign(u_{qзад} - k \cdot i_q), \end{aligned} \quad (4)$$

где U_m – напряжение питания преобразователя; $i_{dзад}$, $i_{qзад}$ или $u_{dзад}$, $u_{qзад}$ – заданные значения сигналов управления для регулятора тока i_d и i_q соответственно; k – коэффициент пропорциональности, $k > 0$.

Переменные в координатах *d,q* выражаются через переменные в реальных координатах *A, B, C* посредством соотношений (2), (3). Например, фиктивным токам i_d, i_q соответствуют реальные фазные токи i_A, i_B, i_C.

Воспользовавшись соотношениями (2), (3), найдем, что разностям $u_{dзад} - k \cdot i_d$ и $u_{qзад} - k \cdot i_q$ соответствуют разности $u_{Aзад} - k \cdot i_A$, $u_{Bзад} - k \cdot i_B$, $u_{Cзад} - k \cdot i_C$ каждой фазы двигателя и оптимальным управлениям (4) в координатах *d,q* соответствуют фазные управления

$$\begin{aligned} u_A &= U_m \cdot sign(u_{Aзад} - k \cdot i_A); \\ u_B &= U_m \cdot sign(u_{Bзад} - k \cdot i_B); \\ u_C &= U_m \cdot sign(u_{Cзад} - k \cdot i_C), \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь

$$u_{Aзад} = k \cdot i_{Aзад},\ u_{Bзад} = k \cdot i_{Bзад},\ u_{Cзад} = k \cdot i_{Cзад}. \quad (6)$$

Трехфазный регулятор тока работает следующим образом. Напряжение задания $u_{вх}$ (сигнал управления по току) преобразуется модулятором в напряжение прямоугольной формы повышенной частоты (500 – 20000 Гц) с амплитудным значением, равным $u_{вх}$ и подается на обмотку возбуждения датчика положения ротора синхронного двигателя, например, сельсина, ротор которого механически соединен с ротором синхронного двигателя. Сигнал с обмоток синхронизации сельсина подается на трехфазный демодулятор, на выходе которого появляется напряжение задания на оптимальный регулятор:

$$\begin{cases} u_{Aзад} = k_1 \cdot u_{вх} \cdot \sin[\upsilon + \theta]; \\ u_{Bзад} = k_1 \cdot u_{вх} \cdot \sin[(\upsilon - \rho) + \theta]; \\ u_{Cзад} = k_1 \cdot u_{вх} \cdot \sin[(\upsilon + \rho) + \theta], \end{cases} \quad (7)$$

где k_1 – общий коэффициент преобразования модулятора, датчика положения ротора синхронного двигателя и демодулятора, $k_1 = 1$; υ – угол поворота ротора синхронного двигателя, $\upsilon = \int \omega dt + \upsilon_0$; θ – угол установки датчика положения ротора синхронного двигателя относительно ротора синхронного двигателя.

Воспользовавшись соотношениями (2) и (7), найдем $u_{dзад}$ и $u_{qзад}$ регулятора токов (4), соответствующие заданиям (7):

$$u_{dзад} = k_1 \cdot u_{вх} \cdot \sin(\theta);$$
$$u_{qзад} = k_1 \cdot u_{вх} \cdot cos(\theta), \quad (8)$$

При этом оптимальные управления (4) примут вид:

$$u_d = U_m \cdot sign[k_1 \cdot u_{вх} \cdot \sin(\theta) - \cdot k \cdot i_d];$$
$$u_q = U_m \cdot sign[k_1 \cdot u_{вх} \cdot cos(\theta) - k \cdot i_q]. \quad (9)$$

Из (9) следует, что при установке датчика положения ротора в нулевое положение ($\theta = 0$):

$$u_d = U_m \cdot sign[k \cdot i_d];$$
$$u_q = U_m \cdot sign[k_1 \cdot u_{вх} - k \cdot i_q], \quad (10)$$

Регулятор тока канала *d* стабилизирует ток i_d на нулевом уровне оптимально по быстродействию и поддерживает его оптимально по точности так, что $i_d = 0$. При этом уравнения (5) с учетом (6), (7) при $\theta = 0$ приводятся к виду:

$$\begin{cases} u_A = U_m \cdot sign[k_1 \cdot u_{вх} \cdot \sin(\upsilon) - k \cdot i_A]; \\ u_B = U_m \cdot sign[k_1 \cdot u_{вх} \cdot \sin(\upsilon - \rho) - k \cdot i_B]; \\ u_C = U_m \cdot sign[k_1 \cdot u_{вх} \cdot \sin(\upsilon + \rho) - k \cdot i_C], \end{cases} \quad (11)$$

Вначале синтезируем оптимальный по точности регулятор тока i_d, взяв первый уравнение системы (1). Поскольку это уравнение первого порядка, то оптимальное управление по данному входу равно: $u_d = -sign(i_d)$ или вводя задание, имеем: $u_d = sign(0 - i_d)$. В результате действия этого регулятора система (1) преобразуется к виду:

$$\begin{cases} R \cdot i_q + \lambda \cdot L \cdot \dfrac{di_q}{dt} + M \cdot I_f \cdot \omega = u_q; \\ J \cdot \dfrac{d\omega}{dt} = \dfrac{3}{2} \cdot M \cdot I_f \cdot i_q - m_H, \end{cases} \quad (12)$$

По каналу скорости мы имеем систему второго порядка. Определим уравнение оптимальное по точности, используя функциональное уравнение: $\dot{\psi} = f(X) + \varphi(X) \cdot u$ [1]. Для этого выразим i_q из второго уравнения (12), подставим в первое и перенесемпроизводные величин влево от знака равенства:

$$\dot{\psi} = \frac{di_q}{dt} + \frac{2 \cdot J \cdot R}{3 \cdot M \cdot i_f \cdot \lambda \cdot L} \cdot \frac{d\omega}{dt} = -\frac{M \cdot I_f \cdot \omega}{\lambda \cdot L} + \frac{U_m}{\lambda \cdot L} \cdot u_q, \quad (13)$$

Причем целая условие: $|-\dfrac{M \cdot I_f \cdot \omega}{\lambda \cdot L}| \leq \dfrac{U_m}{\lambda \cdot L}$

Из выражения (13) определяем управление:

$$u_q = U_m \cdot \text{sign}(\omega_{зад} - \omega - k \cdot i_q) = U_m \cdot sign(u_{qзад} - k_2 \cdot k \cdot i_q), \quad (14)$$

$$u_{qзад} = u_{\omega зад} - k_2 \cdot \omega, \qquad (15)$$

$$k = \frac{3 \cdot M \cdot I_f \cdot \lambda \cdot L}{2 \cdot J \cdot R}, \; [k] = \frac{1}{A \cdot c}.$$

$\omega_{зад}$ или $u_{\omega зад} = k_2 \cdot \omega_{зад}$ – заданное значение сигнала управления для регулятора скорости; k_2 – коэффициент пропорциональности, $k_2 > 0$, $[k_2] = B \cdot c$; U_m – напряжение питания преобразователя.

Подставляя (14) в (15), получим управление в отклонениях для регулятора скорости:

$$u_q = u_{вх} = U_m \cdot sign(u_{\omega зад} - k_2 \cdot \omega - k_2 \cdot k \cdot i_q), \qquad (16)$$

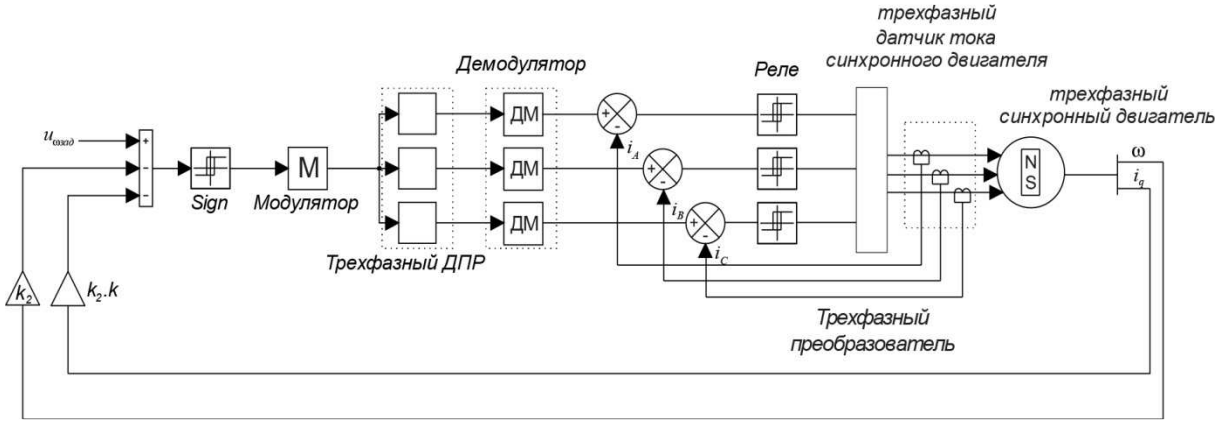


Рис. 1. Структурная схема оптимальной по точности с ВД

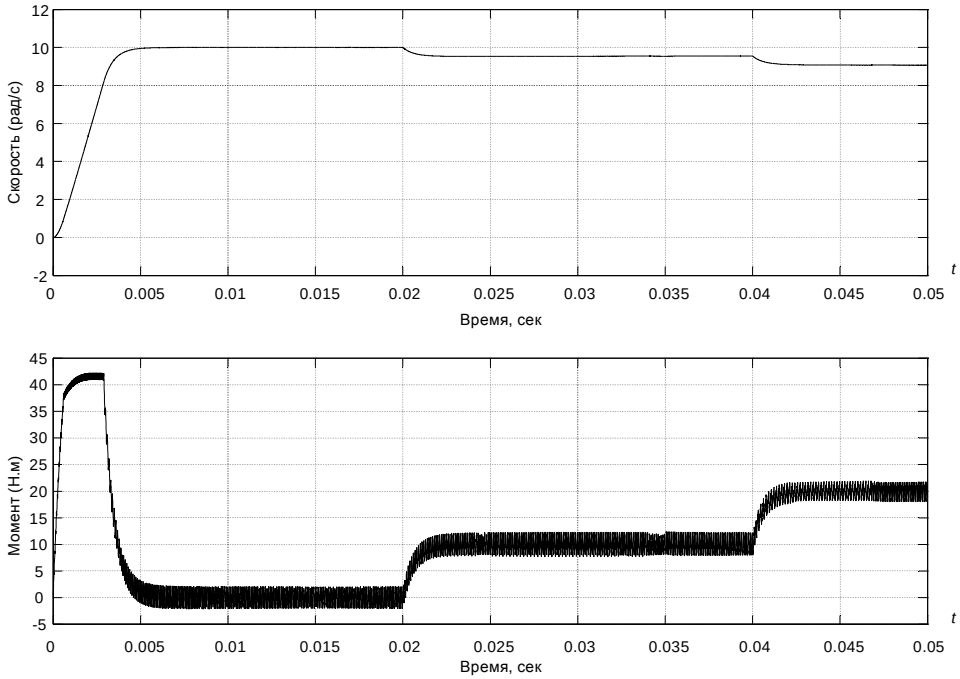


Рис. 2. Переходный процессы моделирования ВД с оптимальным по точности

Точность работы современных систем автоматического регулирования обычно ограничивается ошибкой системы. Предлагаемый способ позволяет получить оптимальную по точности скорость вращения вентильного двигателя инвариантную (не зависящую) от изменяющегося момента нагрузки и свести ошибку систем автоматического регулирования к нулю (теоретически). Это повышает эффективность работы систем автоматического регулирования и расширяет их функциональные возможности.

Список литературы

1. Сурков В.В., Сухинин Б.В. и др. Аналитическое конструирование оптимальных регуляторов по критериям точности, быстродействию, энергосбережению. Тула: Изд-во ТулГУ, 2005. 300 с.

2. Горев А.А. Переходные процессы синхронной машины. М.: ГЭИ, 1950.

3. Сухинин Б.В., Сурков В.В., Цырук С.А., Феофилов Е.И. Оптимальное по точности (быстродействию, энергосбережению) управление электромеханическими объектами [Текст]. Тула: Изд-во ТулГУ, 2014. 140 с.

4. Красовский А.А. Системы автоматического управления полетом и их аналитическое конструирование. М.: Наука, 1973. 558 с.

5. Патент 2404504 Российская Федерация. Способ управления вентильным двигателем и следящая система для его осуществления / Сухинин Б.В., Сурков В.В., Егоров А.Ю., Сурков А.В. Домнин А.Н.; заявитель и патентообладатель Тульский государственный университет. № 2009131225; заявл. 17.08.09; опубл. 20.11.2010.

Нгуен Тиен Зунг, асп., nguyentiendung108@gmail.com, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Чан Кхань, асп., khanh89hd@gmail.com, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Сурков Виктор Васильевич, д-р техн. наук, проф., ivts.tulgu@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

SYNTHESIS OPTIMAL FOR ACCURACY OF THE SPEED REGULATOR SYNCHRONOUS MOTOR

T.D. Nguyen, T. Khanh, V.V. Surkov

Address issues of analytical constructing optimal accuracy speed controller with synchronous motor rotor position sensor (valve electric) for witness systems, invariantto action external destabilizing factors and modifying systems. Shows the block diagram of the speed control system of valve electric actuator. Results of mathematical modeling of characteristics of the system in different operating regimes.

Key words: engine, torque motor, the optimum accuracy.

Nguyen Tien Dung, postgraduate, nguyentiendung108@gmail.com, Russia, Tula, Tula State University,

Tran Khanh, postgraduate, khanh89hd@gmmail.com, Russia, Tula, Tula State University,

Surkov Victor Vasilevich, doctor of technical science, professor, ivts.tulgu@rambler.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 681.513

СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНОГО ПО ТОЧНОСТИ РЕГУЛЯТОРА ПРИВОДА С ЛЮФТОМ РЕДУКТОРА И ДИНАМИЧЕСКОЙ НАГРУЗКОЙ В ВИДЕ КОЛЕБАТЕЛЬНОГО ЗВЕНА

В.В. Сурков, Фам Ван Ты

Рассматривается аналитическое конструирование оптимальной по точности следящей системы управления приводом постоянного тока с люфтом редуктора и колебательной нагрузкой в механической передаче.

Ключевые слова: аналитическое конструирование, оптимальная точность, люфт, динамическое звено, колебательное звено, структурная схема, подчиненное управление.

В различных системах слежения за подвижными объектами часто возникает задача определения закона оптимального по точности управления приводом при наличии «люфта» и динамической нагрузки в механической передаче.

Для исследования и анализа влияния люфта на работу следящего привода с динамической нагрузкой, а также с целью упрощения, не влияющего на сущность решения, представим двигатель постоянного тока в виде инерционного звена с люфтом редуктора [1] и колебательным звеном на выходном валу привода, уравнения возмущенного движения которого (в соответствии с теорией А.М. Ляпунова):

$$\begin{cases} p\varphi_{Д} = \dfrac{К_{р} \cdot К_{ТП}}{СФ} \cdot u_{у}, \\ p\varphi_{Л} = -K^{V}\varphi_{Л} + K^{V}\varphi_{Д} + a_{Л}^{V}, \\ \varphi_{Н}(p) = \dfrac{1}{T^{2}p^{2} + 2\xi Tp + 1}\varphi_{Л}(p). \end{cases} \quad (1)$$

Здесь $K_р = 1/1000$, $K_{ТП} = 3$, $СФ = 0.052$ $В \cdot с$; T - постоянная времени звена, $T = 1/\omega_0$; ω_0 - собственная частота незатухающих колебаний звена; ξ - степень затухания (успокоения).

$$K^v = \begin{cases} K, & v = 1, \\ 0, & v = 2, \\ K, & v = 3; \end{cases} \quad a_л^v = \begin{cases} -K \cdot x_л, & v = 1, \\ 0 & v = 2, \\ K \cdot x_л, & v = 3. \end{cases} \quad v = \begin{cases} 1, & x > x_л, \\ 2, & |x| \le x_л, \\ 3, & x < -x_л, \end{cases} \qquad (2)$$

где v - номер участка (зоны) рабочей характеристики нелинейного элемента «люфт»; $x_л = 0.0007$ рад - ширина полузоны люфта, $K \to \infty$.

В данном примере я выявил что, влияния люфта редуктора на статические и динамические характеристики следящего привода справедливы для систем первого порядка с люфтом, т.е. с колебательным звеном двигателя.

Воспользовавшись результатами работы [1], запишем оптимальный по точности закон управления для координаты $\varphi_Л$ привода (1) с люфтом:

$$u_у = U_м \cdot \text{sign}(\varphi_{ЗЛ} + x_Л \cdot \text{sign}(\varphi_{ЗЛ} - \varphi_Л) - \varphi_Д) \qquad (3)$$

Здесь Uм = 9 В, $\varphi_{ЗЛ}$ - входное или задающее воздействие для координаты $\varphi_Л$,. Структурная схема системы слежения за координатой $\varphi_Л$ объекта (1) с люфтом приведена на рис. 1.

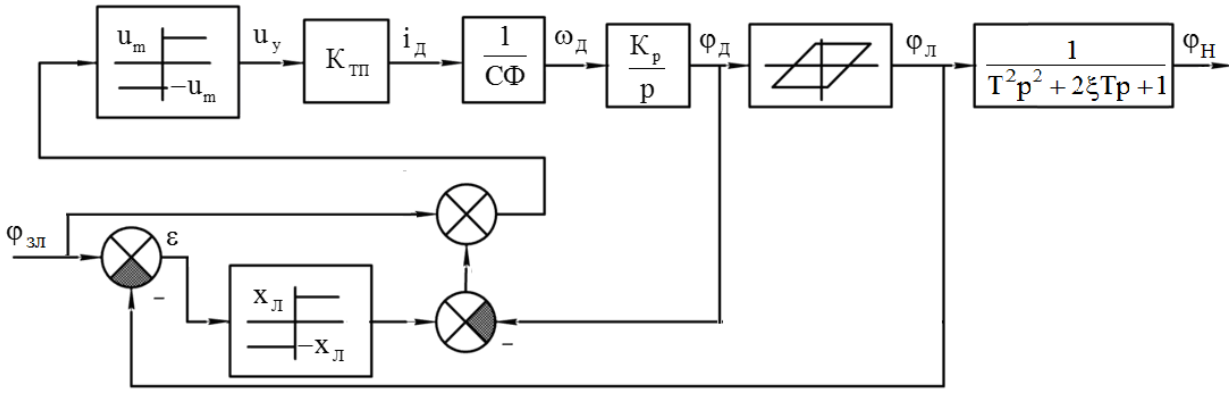


Рис. 1. Структурная схема оптимальной следящей системы за координатой $\varphi_Л$ с компенсацией люфта

Рассмотрим далее объект (1) рис 1, в котором люфт скомпенсирован так, что $\varphi_Л = \varphi_Д$:

В действительности даже в самом простейшем случае, когда безлюфтовый исполнительный механизм угла поворота выходного вала представлен двигателем постоянного тока с управлением по якорной цепи, он имеет первый порядка. В случае использования двигателя с динамической нагрузкой в виде колебательного звена, систему можно представить следующим системой уравнений:

$$\begin{cases} p\varphi_{Д} = \dfrac{K_{р} \cdot K_{ТП}}{СФ} \cdot u_{уН}, \\ p\varphi_{Н} = \varphi_{И}, \\ p\varphi_{И} = -\dfrac{1}{T^2}\varphi_{Н} - \dfrac{2\xi}{T}\varphi_{И} + \dfrac{1}{T^2}\varphi_{Д}. \end{cases} \quad (4)$$

Здесь $p \equiv \dfrac{d}{dt}$.

Введем следующие обозначения:

$$K = \frac{K_{р} \cdot K_{ТП}}{СФ}, a = -\frac{1}{T^2}, b = -\frac{2\xi}{T}, c = \frac{1}{T^2}$$

тогда:

$$\begin{cases} p\varphi_{Н} = \varphi_{И}, \\ p\varphi_{И} = a \cdot \varphi_{Н} + b \cdot \varphi_{И} + c \cdot \varphi_{Д}, \\ p\varphi_{Д} = K \cdot u_{уН}. \end{cases} \quad (5)$$

Здесь $u_{уН}$ - управление для координаты $\varphi_{Н}$. Для системы (5), воспользовавшись работой [2], запишем функциональное уравнение (скорость проникновения поверхности переключения):

$$\dot{\psi}_1 = \dot{\varphi}_{Н} + A\dot{\varphi}_{И} + B\dot{\varphi}_{Д} = \varphi_{И} + A(a \cdot \varphi_{Н} + b \cdot \varphi_{И} + c \cdot \varphi_{Д}) + B \cdot K \cdot u_{уН}$$
$$= A \cdot a \cdot \varphi_{Н} + (A \cdot b + 1) \cdot \varphi_{И} + A \cdot c \cdot \varphi_{Д} + B \cdot K \cdot u_{уН}$$

Функция переключения первого интервала:

$\psi_1 = \varphi_{Н} + A \cdot \varphi_{И} + B \cdot \varphi_{Д}$. при постоянных значениях A,B > 0 .

Управление для отклонений:

$$u_{уН} = -\text{sign}(\psi_1) = -\text{sign}(\varphi_{Н} + A\varphi_{И} + B\varphi_{Д}).$$

или для реальных координат:

$$u_{уН} = -\text{sign}\left[\varphi_{Н} - \varphi_{Нзад} + A \cdot (\varphi_{И} - \varphi_{Изад}) + B \cdot (\varphi_{Д} - \varphi_{Дзад})\right]$$

Для установившегося режима работы, когда все производные равны нулю (фактически для установившихся значений или заданий):

Из первого уравнения следует, что при $\dot{\varphi}_{Н} = 0$, $\varphi_{Изад} = 0$. А из второго уравнения следует, что при $\varphi_{И} = 0$, $a \cdot \varphi_{Нзад} + b \cdot \varphi_{Изад} + c \cdot \varphi_{Дзад} = 0, \Rightarrow \varphi_{Нзад} = \varphi_{Дзад}$. При этом:

$$u_{уН} = \text{sign}\left[\varphi_{Нзад} - \varphi_{Н} - A \cdot (\varphi_{И} - \varphi_{Изад}) - B \cdot (\varphi_{Д} - \varphi_{Дзад})\right]$$
$$= \text{sign}\left[(1 + B) \cdot \varphi_{Нзад} - \varphi_{Н} - A \cdot \varphi_{И} - B \cdot \varphi_{Д}\right]$$
$$= \text{sign}\left(\varphi_{Нзад} - \frac{\varphi_{Н} + A \cdot \varphi_{И}}{1 + B} - \frac{B}{1 + B} \cdot \varphi_{Д}\right).$$

$$\Rightarrow u_{уН} = \text{sign}\left[\left(\varphi_{Нзад} - \frac{\varphi_Н + A\cdot\varphi_И}{1+B}\right)\cdot\frac{1+B}{B} - \varphi_Д\right]$$

Рассмотрим далее объект (1) рис 1, в котором люфт скомпенсирован так, что $\varphi_Л = \varphi_Д$:

$$\Leftrightarrow u_{ун} = \text{sign}\left[\left(\varphi_{Нзад} - \frac{\varphi_Н + A\cdot\varphi_И}{1+B}\right)\cdot\frac{1+B}{B} - \varphi_Л\right]. \qquad (6)$$

Условие устойчивости движения на первом интервале к $\psi_1 = 0$

$$\left|A\cdot a\cdot\varphi_Н + (A\cdot b+1)\cdot\varphi_И + A\cdot c\cdot\varphi_Д\right| \le B\cdot К$$

$$\Leftrightarrow \frac{\left|A\cdot a\cdot\varphi_Н + (A\cdot b+1)\cdot\varphi_И + A\cdot c\cdot\varphi_Д\right|}{B\cdot К} \le 1$$

Функция переключения второго интервала:

$$\psi_2 = \frac{A\cdot a\cdot\varphi_Н + (A\cdot b+1)\cdot\varphi_И + A\cdot c\cdot\varphi_Д}{B\cdot К}$$

$$\text{При } \psi_1 = 0 \Rightarrow \varphi_Н = -(A\cdot\varphi_И + B\cdot\varphi_Д)$$

$$\Rightarrow \psi_2 = \frac{-A\cdot a\cdot(A\cdot\varphi_И + B\cdot\varphi_И) + (A\cdot b+1)\cdot\varphi_И + A\cdot c\cdot\varphi_Д}{B\cdot К}$$

$$= \frac{(A\cdot b+1-A^2\cdot a)\cdot\varphi_И + (A\cdot c - A\cdot a\cdot B)\cdot\varphi_Д}{B\cdot К}$$

$$\dot{\psi}_2 = \frac{(A\cdot b+1-A^2\cdot a)\cdot\dot{\varphi}_И + (A\cdot c - A\cdot a\cdot B)\cdot\dot{\varphi}_Д}{B\cdot К}$$

$$= \frac{(A\cdot b+1-A^2\cdot a)\cdot(a\cdot\varphi_Н + b\cdot\varphi_И + c\cdot\varphi_Д) + (A\cdot c - A\cdot a\cdot B)\cdot К\cdot u}{B\cdot К}$$

$$= \frac{(A\cdot b+1-A^2\cdot a)\cdot(-a\cdot(A\cdot\varphi_И + B\cdot\varphi_Д) + b\cdot\varphi_И + c\cdot\varphi_Д) + (A\cdot c - A\cdot a\cdot B)\cdot К\cdot u}{B\cdot К}$$

$$= \frac{(A\cdot b+1-A^2\cdot a)\cdot\left[(b - A\cdot a)\cdot\varphi_И + (c - B\cdot a)\cdot\varphi_Д\right] + (A\cdot c - A\cdot a\cdot B)\cdot К\cdot u}{B\cdot К}$$

Условие устойчивости движения на первом интервале к $\psi_2 = 0$

$$\left|(A\cdot b+1-A^2\cdot a)\cdot\left[(b - A\cdot a)\cdot\varphi_И + (c - B\cdot a)\cdot\varphi_Д\right]\right| \le (A\cdot c - A\cdot a\cdot B)\cdot К$$

$$\Leftrightarrow \frac{\left|(A\cdot b+1-A^2\cdot a)\cdot\left[(b - A\cdot a)\cdot\varphi_И + (c - B\cdot a)\cdot\varphi_Д\right]\right|}{(A\cdot c - A\cdot a\cdot B)\cdot К} \le 1$$

Функция переключения третьего интервала:

$$\psi_3 = \frac{(A\cdot b+1-A^2\cdot a)\cdot\left[(b - A\cdot a)\cdot\varphi_И + (c - B\cdot a)\cdot\varphi_Д\right]}{(A\cdot c - A\cdot a\cdot B)\cdot К}$$

При $\psi_2 = 0 \Rightarrow \varphi_И = \dfrac{-A \cdot c + A \cdot a \cdot B}{A \cdot b + 1 - A^2 \cdot a} \cdot \varphi_Д \Rightarrow \psi_З = \dfrac{1}{A \cdot K} \cdot \varphi_Д$

Записываем закон оптимального по точности управления объекта (3) с учотом ограничений ψ_2 и ψ_3

$$\Rightarrow u_{уН} = \text{sign}\left[\text{sign}\left[\text{sign}\left[\left(\varphi_{Н зад} - \frac{\varphi_Н + A \cdot \varphi_И}{1+B}\right) \cdot \frac{1+B}{B} - \varphi_Л\right] - \psi_2\right] - \psi_3\right]. \quad (7)$$

Применяя метод подчиненного управления и используя оптимальное управление (7) для координаты $\varphi_Н$, составим структурную схему системы подчиненного слежения за координатой $\varphi_Н$ (рис. 2). Из рис. 2 следует, что

$$\varphi_{ЗЛ} = u_{уН}. \quad (8)$$

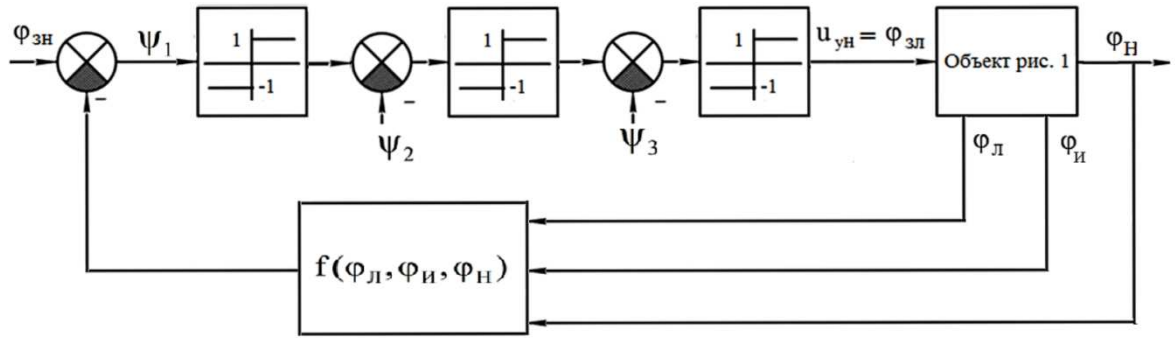


Рис. 2. Структурная схема подчиненного оптимального регулятора для объекта (1) с компенсацией люфта. $f(\varphi_Л, \varphi_И, \varphi_Н)$ ***- сигнал обратной связи по координатам*** $\varphi_Л, \varphi_И, \varphi_Н$

Объединяя формулы (3), (7), (8) и упрощая, получим оптимальное по точности подчиненное управление объектом (1) с компенсацией люфта в механической колебательной передаче:

$$\begin{cases} u_у = U_м \cdot \text{sign}(\varphi_{ЗЛ} + x_Л \cdot \text{sign}(\varphi_{ЗЛ} - \varphi_Л) - \varphi_Д), \\ \varphi_{ЗЛ} = u_{уН}, \\ u_{уН} = \text{sign}\left[\text{sign}\left[\text{sign}\left[\left(\varphi_{Н зад} - \dfrac{\varphi_Н + A \cdot \varphi_И}{1+B}\right) \cdot \dfrac{1+B}{B} - \varphi_Л\right] - \psi_2\right] - \psi_3\right]. \end{cases}$$

или

$$u_y = U_м \cdot sign\left[\begin{array}{l} sign\left[sign\left[sign\left[\left(\varphi_{H\,зад} - \dfrac{\varphi_H + A \cdot \varphi_И}{1+B}\right) \cdot \dfrac{1+B}{B} - \varphi_Л\right] - \psi_2\right] - \psi_3\right] - \varphi_Д + \\ + x_Л \cdot sign\left[sign\left[sign\left[sign\left[\left(\varphi_{H\,зад} - \dfrac{\varphi_H + A\varphi_И}{1+B}\right)\dfrac{1+B}{B} - \varphi_Л\right] - \psi_2\right] - \psi_3\right] - \varphi_Л\right] \end{array}\right]. \quad (9)$$

На рис. 3 изображены осциллограммы задающего воздействия $\varphi_{Нзад}(t)$ на вход системы синусоидального входного сигнала и выходного сигнала $\varphi_{Н}(t)$ с $\varphi_{Нзад}\,\max = 0.0003$ рад, максимальное значение сигнала управления преобразователем $U_m = 9$ В, при этом управляющий сигнал $\left|u_y\right| \le 1$. Полученные путем моделирования на программу Матлаб (simulink).

При: T=1, $\xi = 0.7 \Rightarrow a = -1, b = -1.4, c = 1.$

A=0.01, B=1. K=0.0577, $\varphi_{Нзад} = 0.0003\sin(0.01 \cdot t)$

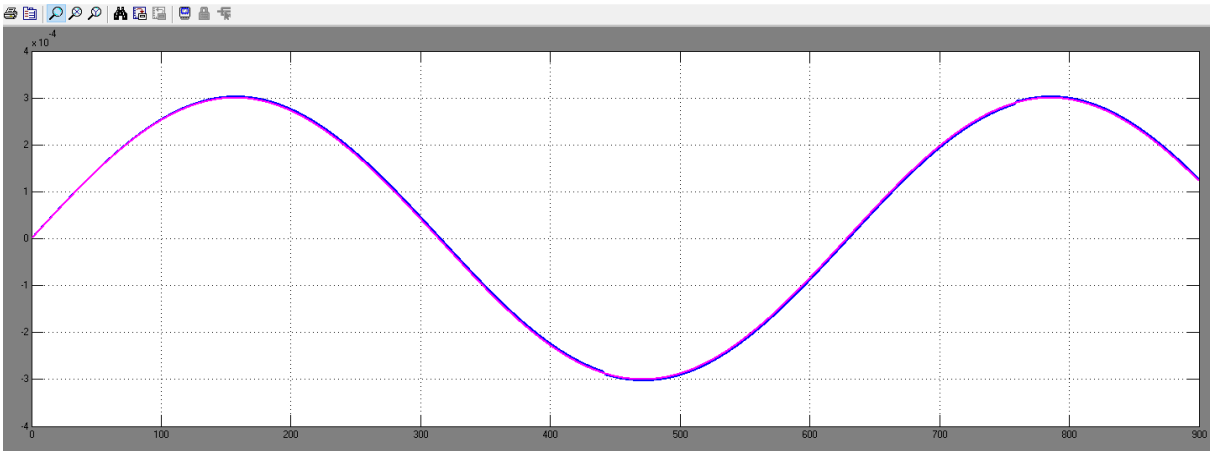


Рис. 3. Осциллограмма сигналов на входе и выходе оптимального привода с люфтом редуктор между динамическими связями

На осциллограмме изображены два сигнала: на входе и выходе привода. Как видно синусоиды накладываются друг на друга и полностью идентичны по форме, фазе и амплитуде, что подтверждает правильность определения оптимального управления объектом с учетом люфта редуктора между динамическими связями.

Список литературы

1. Ловчаков В.И., Сухинин Б.В., Сурков В.В. Нелинейные системы управления электроприводами и их аналитическое конструирование. Тула: ТулГУ, 1999. 164 с.

2. Сухинин Б.В., Сурков В.В., Цырук С.А., Феофилов Е.И. Оптимальное по точности (быстродействию, энергосбережению) управление электромеханическими объектами [Текст]. Тула: Изд-во ТулГУ, 2014. 140 с.

Фам Ван Ты, магистр, anhtutula.king@gmail.com, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Сурков Виктор Васильевич, д-р техн. наук, проф., vvs150747@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

SYNTHESIS OF OPTIMUM ACCURACY REGULATOR FOR THE DRIVE WITH REDUCTOR GAP AND DYNAMIC LOAD IN THE FORM OF OSCILLATORY LINK

V.V. Surkov , Pham Van Tu

Analytical designing optimum on accuracy of a watching control system by a drive of a direct current with nonlinearity of type "baklash" a reducer and oscillatory loading in mechanical transfer is considered.

Key words: analytical designing, optimum accuracy, backlash, a dynamic link, the block diagramme, the subordinated management.

Pham Van Tu, master, anhtutula.king@gmail.com, Russia, Tula, Tula State University,

Surkov Victor Vasilevich, doctor of technical science, professor, vvs150747@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University

ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ РЕЗАНИЕМ

УДК 621.9

ДИСКРЕТНАЯ МОДЕЛЬ ДВИЖЕНИЯ СТРУЖКИ ПО ПЕРЕДНЕЙ ПОВЕРХНОСТИ РЕЖУЩЕГО КЛИНА

Г.В. Шадский, О.А. Ерзин, С.В. Сальников

Показано, влияние электрического тока форсирует на процесс группового движения элементов стружки. Установлено что, интенсификация резания электрическим током объясняется, в том числе, и повышением вероятности фрагментации стружки на меньших значениях скорости резания. Это открывает широкие возможности для анализа условий стружкообразования в условиях интенсификации процесса резания импульсами электрического тока.

Ключевые слова: сила резания, режущий клин, положение режущей кромки, интенсификация, разрушение материала.

Известно, что эффективность резания в значительной степени определяется процессами в зоне вторичного деформирования. Динамическая картина процесса резания представляет собой устойчивую периодическую последовательность разрушения удаляемого с заготовки слоя металла и преобразования его в элементы стружки (рис.1) [1,2,3,4].

В течение периода образования элемента, составляющие силы резания проходят фазы роста и падения, причем в противоположных фазах, что сопровождается циклическим изменением угла действия силы резания при постоянных значениях передних углов режущих клиньев. Это, естественным образом отражается в изменении условий трения по передней поверхности при образовании и движении по ней элементов стружки [1]. Отмечено, что фаза колебаний главной составляющей силы резания является достаточно информативным сигналом о процессе стружкообразования.

В большинстве случаев резание широкого класса обрабатываемых материалов характеризуется образованием сегментной стружки, о чем свидетельствует большое число исследований (рис.1) [5,6,7,8]. Коэффициент сегментации зависит от режимов резания и характеристик обрабатываемо-

го материала. Элементы имеют ярко выраженную форму, причем наибольшему деформированию подвергается материал на границах соседних элементов. Их связь обладает несколько отличными свойствами, чем основной материал. В соответствии с таким дискретным представлением стружки, движение ее элементов по передней поверхности режущего клина может быть проиллюстрировано схемой, показанной на рис. 1. Его отличие от известного дискретного представления [9] заключается в следующем: 1) Цепочка движущихся взаимосвязанных элементов имеет существенно меньшую размерность; 2) Параметры элементов этой системе определяются макроразмерами; 3) Дальнедействующие упругие связи меду элементами проявляются в значительно меньшей степени; 4) При движении элементов возможно адгезионное схватывание с поверхность режущего клина или даже приваривание [3]; 5) На выходе цепочки из зоны контакта с режущим клином к ней присоединена инерционная масса, которая хотя и состоит из группы элементов, но в условиях свободного движения ее можно рассматривать как единое целое; 6) Коэффициент трения вдоль передней поверхности изменяется в соответствии с распределением температуры вдоль нее.

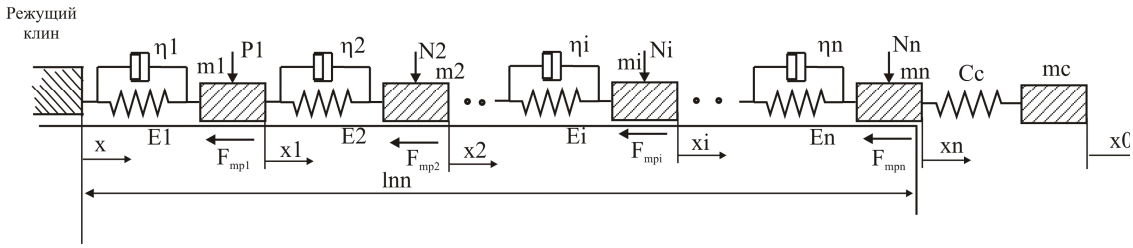


Рис. 1. Модель движения элементов стружки по передней поверхности режущего клина

Движение элементов цепочки, образующей сегментную стружку, по передней поверхности режущего клина предложено описывать следующей системой уравнений:

$$\begin{aligned}
&E_1 x + \eta_1 \dot{x} = F_{mp1} + (E_1 + E_2)x_1 + (\eta_1 + \eta_2)\dot{x}_1 - E_2 x_2 - \eta_2 \dot{x}_2 + m_1 \cdot \ddot{x}_1;\\
&E_i x_{(i-1)} + \eta_i \dot{x}_{(i-1)} = F_{mpi} + (E_i + E_{(i+1)})x_i + (\eta_i + \eta_{(i+1)})\dot{x}_i -\\
&- E_{(i+1)} x_{(i+1)} - \eta_{(i+1)} \dot{x}_{(i+1)} + m_i \cdot \ddot{x}_i;\\
&E_n x_{(n-1)} + \eta_n \dot{x}_{(n-1)} = F_{mpn} + (E_n + C_c)x_n + \eta_n \dot{x}_n - C_c x_0 + m_n \cdot \ddot{x}_n;\\
&C_c(x_n - x_0) = m_c \cdot \ddot{x}_0,
\end{aligned} \qquad (1)$$

где m_i –масса i-го элемента стружки; F_{mpi} –сила трения при движении элемента по передней поверхности режущего клина; x_i –перемещение i-го элемента стружки; E_i, η_i - модуль упругости Юнга и коэффициент вязкого

трения i-го элемента стружки; m_c, C_c –масса и жесткость свободного конца стружки; l_{nn} –длина линии контакта стружки с передней поверхностью режущего клина.

Силу трения для всех элементов стружки, находящихся в контакте с режущим клином, определим следующим образом:

$$F_{mpi} = \mu_i \cdot N_i = \mu_i \cdot m_i g, \qquad i = 2...n;$$

$$F_{mp1} = \mu_1 \cdot P_1 = \mu_1 \cdot (m_1 g + N_{\gamma 1}); \tag{2}$$

$$N_{\gamma 1} = \sqrt{2}\tau_p \frac{S_o b_r}{\sin\beta \cdot \sin\varphi} \sin(45^o + \beta - \gamma); \mu_i = \begin{cases} \mu_{ni} & при\ |\dot{x}_i| \approx 0\ ; \\ \mu_{\partial i} \cdot sign(\dot{x}_i) & при\ |\dot{x}_i| > 0, \end{cases}$$

где $N_{\gamma 1}$- нормальная составляющая силы, действующих на первый, формируемый элемент стружки; τ_p-сопротивление обрабатываемого материала пластическому сдвигу[10]; γ - передний угол режущего клина; $\mu_{ïi}$,$\mu_{äi}$ – коэффициенты трения покоя и движения элемента по передней поверхности режущего клина соответственно, $i = 1...n$.

Движение задающей поверхности определим через направление движения стружки

$$x = V_p \cos(45^o + \beta - \gamma) \cdot t. \tag{3}$$

Коэффициент трения движения зависит от температуры поверхности режущего клина и изменяется в пределах длины линии контакта. Для его моделирования воспользуемся известными результатами исследований коэффициента трения и распределения температуры по передней поверхности режущего клина [10]. Примем в качестве аппроксимирующей функции выражение следующего вида:

$$\mu_d(x) = \mu_{d0} / f_\theta(x);\ f_\theta(x) = \begin{cases} (1 + \psi(V_p, S_o, b_r) \cdot (2x / l_{nn})^{0.5}), & if\ x \le l_{nn}/2); \\ (1 + \psi(V_p, S_o, b_r) \cdot (2x / l_{nn})^{-0.6}), & if\ x > l_{nn}/2), \end{cases} \tag{4}$$

где: $\psi(V_p, S_0, b_r)$-функция условий резания, характеризующая относительное значение максимальной температуры трения; μ_{d0} - коэффициент трения, соответствующий температуре пластических деформаций в условной плоскости сдвига, определяется по среднему его значению для заданных условий обработки [10].

Параметры элементов определяются режимами резания, свойствами обрабатываемого материала, характеристиками инструмента. Для определения толщины и массы элементов воспользуемся рассмотренным выше подходом и в частности оценкой размеров зоны предразрушения по периоду релаксации упруго деформируемого состояния материала и времени образования плоскости сдвига [11] тогда

$$l_{xi} = \frac{V_p}{K_{Lct}} T_{cd}; \qquad m_i = \frac{\rho_M \cdot S_0 \cdot b_r \cdot V_p \cdot T_{cd}}{\sin\varphi}, \qquad (5)$$

где l_{xi}, m_i - толщина и масса элементов стружки; ρ_M - плотность обрабатываемого материала.

Для перехода к дискретным координатам в (3) будем считать

$$\mu_{di} = \frac{\mu_d(x_i) + \mu_d(x_{i+1})}{2}; x_i = il_{xi}; \qquad N_x = ent(\frac{l_{nn}}{l_{xi}}); \qquad i = 1...N_x, \qquad (6)$$

где N_x- число элементов стружки, находящихся в контакте с режущим клином.

Поскольку свойства материала, как отмечалось выше, изменяются только в узкой области в окрестности плоскости сдвига в системе уравнений (1) будем использовать номинальные характеристики обрабатываемого материала, а коэффициент вязкого трения определим, как долю от сухого трения

$$\eta_i = \eta = (0{,}1....0{,}2)\mu_{d0} N_{\gamma 1} T_{cd} / l_{x1}. \qquad (7)$$

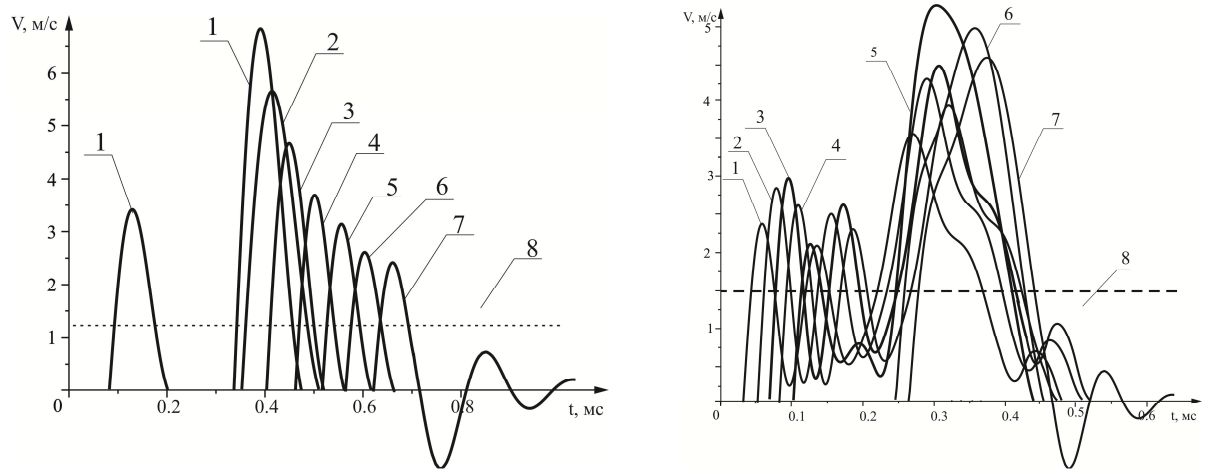
Для условий резания широкого круга материалов в зависимости от подачи $l_{xi} = (2{,}0..12.0) \cdot 10^{-5}$м, $N_x = 5...9$. Проведенные оценочные расчеты показали, что они практически не зависят от скорости резания, в значительной степени определяются подачей, углом наклона плоскости сдвига и характеристиками обрабатываемого материала. Это хорошо согласуется с известными исследованиями образования сегментной стружки [1,3,5,7].

При использовании для интенсификации резания дискретного электрического воздействия приняты ранее предложенные зависимости модуля упругости и коэффициента трения покоя от величины тока [9].

Полученное решение системы (1) при $N_x = 7$ и отсутствии свободного конца стружки аналогично дискретному представлению движения материала вдоль плоскости сдвига [9] рис. 2.

Из полученных зависимостей видно, что элементы с линии контакта выдвигаются поочередно, электрическое воздействие способствует ускорению формирования группового движения всех элементов, что позволяет рассматривать их как единое целое. Из приведенных графиков видно, что в тех условиях, когда последующий элемент «убегает» от предыдущего его скорость существенно возрастает, увеличение амплитудных значений скоростей приводит к уменьшению времени трогания последующих элементов. Однако, эти зависимости не отражают момент взаимодействия оторвавшегося последнего элемента цепочки от передней поверхности режущего клина. Наибольший интерес с точки зрения вида формируемой стружки представляет момент начала движения последнего элемента цепочки, находящейся на линии контакта стружки с режущим клином. В на-

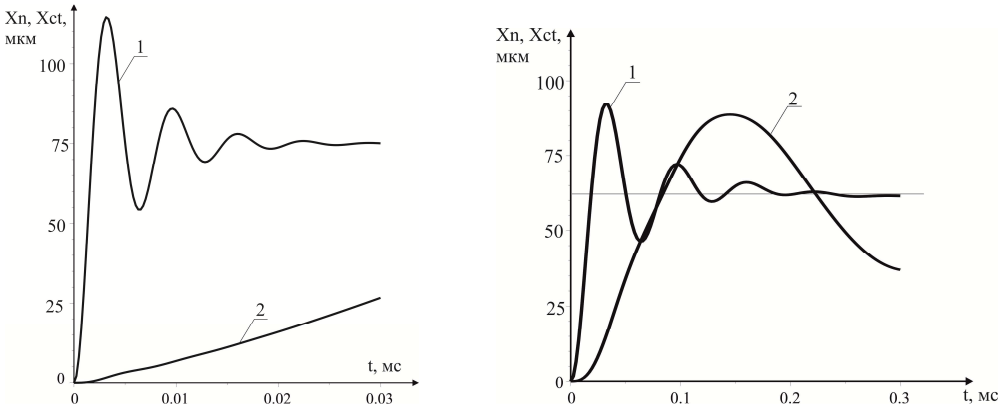
чальной фазе он выходит из контакта и совершает свободное движение. На рис.3 представлены результаты математического моделирования движения последнего элемента и свободного конца стружки.



а ***б***

Рис. 2. Динамика изменения скорости элементов, находящихся на линии контакта с режущим клином при скорости резания V_p ***=2,5м/с: а – без ток; б – при*** $I_A = 1000A$

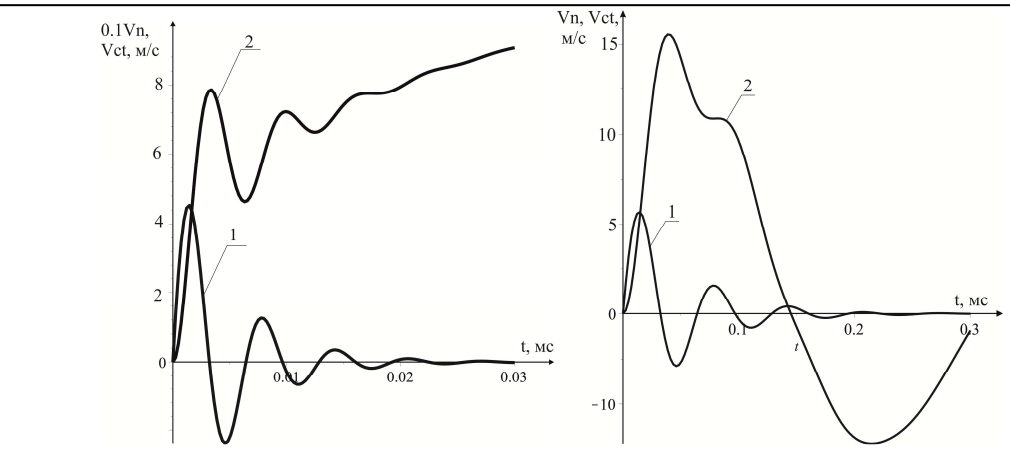
Полученные результаты показывают, что приложение электрического тока форсирует процесс группового движения элементов стружки, находящихся на линии контакта с передней поверхностью режущего клина, увеличивая, таким образом, импульс силы на свободный конец стружки. Он приводит к возникновению растягивающих напряжений и больших динамических разрывающих нагрузок между последним элементом и свободным концом стружки. Таким образом, интенсификация резания электрическим током объясняется, в том числе, и повышением вероятности фрагментации стружки на меньших значениях скорости резания.



координаты элементов ***координаты элементов***

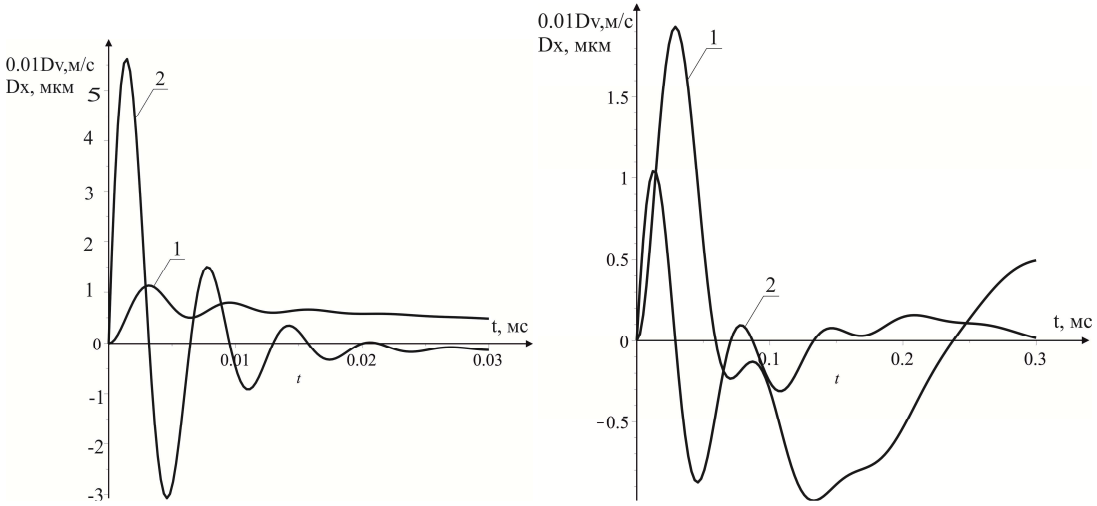
а ***б***

Рис. 1. Динамика движения элементов стружки при скорости резания V_p ***=2,5м/с (начало)***



скорости элементов
в

скорости элементов
г



разности координат и скоростей элементов стружки
д

разности координат и скоростей элементов стружки
е

Рис. 3. Динамика движения элементов стружки при скорости резания V_p ***=2,5м/с: а, в, д – без тока; б, г, е – с током*** $I_A = 1000A$***:***

1 – последний элемент цепочки; 2 – свободный конец стружки
3 – разности координат; 4 – разности скоростей элементов стружки
(окончание)

Предложенный подход открывает широкие возможности для анализа условий стружкообразования в условиях интенсификации процесса резания импульсами электрического тока.

Работа выполнена в рамках проекта РФФИ 16-48-710339 р_а «Развитие теории высокоэффективных процессов направленного разрушения материалов, основанных на принципах пространственно временной адаптации вектора воздействия по состоянию упругопластического деформирования зоны предразрушения».

Список литературы

1. Евсеев Л.Л. Расчет оптимальной скорости резания по коэффициенту динамичности процесса стружкообразования //СТИН. 1994. № 4. С. 41- 43.

2. Евсеев Л.Л. Исходные положения и зависимости для расчета характеристик динамики процесса резания металлов // Вестник машиностроения. 1995. №12. С. 1,3,7.

3. Волков Д.И., Проскуряков С.Л. Разработка модели процесса резания с учетом цикличности формирования стружки // Вестник УГАТУ. Машиностроение. Уфа: Изд-во УГАТУ, 2011. Т15, №3(43). С. 72-78.

4. Артамонов Е.В., Васильев Д.В. Патент RU 2535839 C2 на изобретение мпк B23B 1/00, B23B 25/06. Способ определения оптимальной скорости резания. 20/10/2014. Бюл.№29. 6 с.

4. О взаимосвязи работоспособности режущих элементов и вида стружки Артамонов Е.В., Васильев Д.В. Омский научный вестник. 2013. № 3 (123). С. 59-61.

5. Кушнер В.С. Теория стружкообразования: монография / В.С. Кушнер, О.Ю. Бургонова. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2011. 176 с.

6. Полетика М.Ф. Контактные нагрузки на режущих поверхностях инструмента. М.: Машиностроение, 1969. 150 с.

7. О связи деформационных параметров стружкообразования с характеристиками колебаний при резании А.В. Гусев, В.В. Закураев , «Технологии машиностроения» (Вектор науки ТГУ (Томск). 2015. No 3-1 (33-1)), 2015.

8. Рыжкин А.А., Климов М.М., Сергеев Р.В. Особенности стружкообразования при обработке сталей твердыми сплавами с износостойкими покрытиями. Вестник Донского государственного университета (ДГТУ). 2001. Т.1. №1. С. 47-53.

9. Шадский Г.В., Сальников С.В. Математическое описание процесса управления разрушением материа-ла в зоне резания // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2014. Вып. 11. Ч. 2. С. 395-402.

10. Силин С.С. Расчет оптимальных режимов на основе изучения процессов резания методами теории подобия // Сб. науч. тр./ЯПИ. Ярославль. 1968. С. 43–64.

11. Сальников В.С., Шадский В.Г., Ерзин О.А. Идентификация параметров состояния зоны резания // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2009. Вып. 4. С. 244-253.

Шадский Геннадий Викторович, д-р техн. наук, проф., stanki@uic.tula.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Ерзин Олег Александрович, канд. техн. наук, erzin79@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Сальников Сергей Владимирович, асп., sergeysalnikov@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

MANAGEMENTS OF PROCESS OF STRUZHKOBRAZOVANIYA

G.V. Shadsky, O. A. Erzin, S.V. Salnikov

The control system of process of a struzhkoobrazovaniye is presented. It is established that the most significant effect on his parameters and stability render: the modes of cutting, the characteristic of nonlinearity, property of the processed material, and a cutter time constant. Earlier received results about possibility of the breaking-off accelerations which are the reason of sampling of shaving on separate elements are confirmed.

Key words: struzhkoobrazovaniye, the cutting wedge, an intensification, material destruction, elasto-plastic deformation.

Shadsky Gennady Victorovich, doctor of technical science, professor, stanki@uic.tula.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Erzin Oleg Aleksandrovich, candidate of technical science, docent, erzin79@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Salnikov Sergey Vladimirovich, postgraduate, sergeysalnikov@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 624.92

ФОРМИРОВАНИЕ КОНТРОЛЬНЫХ СЕЧЕНИЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВИНТОВЫХ СТРУЖЕЧНЫХ КАНАВОК МНОГОЗУБОГО ФАСОННОГО ИНСТРУМЕНТА

М.В. Ушаков, И.А. Воробьев, А.В. Доронин

Рассмотрены вопросы обеспечения требуемой формы профиля винтовой стружечной канавки на всей длине рабочей части многозубого фасонного инструмента. Предложен подход к заданию профиля винтовой стружечной канавки, расположенной на сложной производящей поверхности концевого инструмента, обеспечивающий постоянство геометрических параметров стружечной канавки в каждом контрольном сечении. Даны зависимости, устанавливающие связь системы координат инструмента и системы координат контрольного сечения.

Ключевые слова: контрольное сечение, винтовая стружечная канавка.

В процессе проектирования и изготовления многозубого фасонного инструмента (фрез, разверток и т.п.) необходим контроль линейных и геометрических параметров стружечных канавок в различных точках зуба, что связано с изменением их формы и размеров. Обычно контроль производится в нескольких так называемых контрольных сечениях.

Для вышеуказанного осевого инструмента обычно форма канавки задается параметрами γ, h, $r_к$ и ν (γ - передний угол, h – глубина стружечной канавки, $r_к$ – радиус скругления дна стружечной канавки, ν - угол развала канавки) γ, h, r и ν [1] (рис. 1).

Параметры γ и ν определяются из справочных рекомендаций, ориентируясь на условия процесса обработки, и постоянны для любого контрольного сечения:

$$h = 2 \cdot r + \Delta_{\text{пер}} + 0.5...1,$$

где $\Delta_{\text{пер}}$ – размер, предусматриваемый для переточек по задней поверхности;

$$r = \sqrt{\frac{S \cdot k_{\text{зап}}}{\pi}},$$

где S – площадь срезаемого слоя; $k_{зап}$ – коэффициент заполнения стружечной канавки.

Обычно S пропорциональна длине окружности торцового сечения производящей поверхности инструмента:

$$S = a \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot n_{\Sigma},$$

где a – толщина срезаемого за один оборот слоя припуска; n_{Σ} - число оборотов инструмента, совершаемого при срезании припуска.

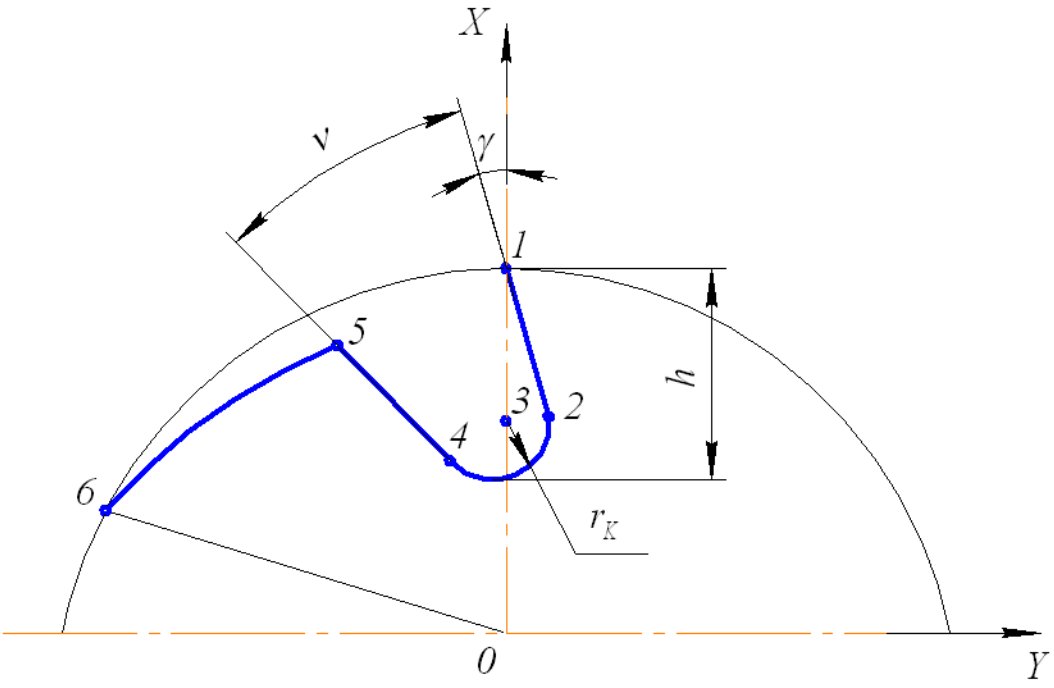


Рис. 1. Одна из рекомендуемых форм стружечной канавки

Срезанный металл располагается в стружечной канавке касательно к ее поверхности, потому форма канавки должна задаваться в сечении, перпендикулярном этой поверхности или, как принято в [1], перпендикулярно режущей кромки (рис. 2).

Обычно производящая поверхность инструмента задается в осевой плоскости его системы координат (рис. 3).

В большинстве случаев профиль таких инструментов состоит не более чем из 3…4 участков, описываемых отрезками наиболее технологичных кривых, таких как отрезок прямой, дуга окружности, участок спирали и т.п. Обычно переход от одного участка к другому происходит плавно, без переломов, что соответствует равенству первых производных конца одного и начала другого участков. Участки задаются наборами параметров, однозначно описывающих каждый участок в системе координат инструмента (например, для дуги окружности: координаты точек начала и конца дуги, координаты центра дуги, форма дуги – выпуклая или вогнутая). Подобное задание позволяет определять радиус r осевого сечения производящей поверхности при любом заданном параметре Z сечения:

$$r = f(Z). \qquad (1)$$

При формировании контрольного сечения одним из его элементов является линия сечения производящей поверхности, которая совместно с профилем стружечной канавки позволяет визуально судить о прочности инструмента. Кроме этого, при формировании стружечной канавки инструментом второго порядка ее контроль также проводится визуально (под

инструментальным микроскопом) за счет оценки «слепка канавки», либо оценки шлифа контрольной детали. Данное сечение также является основным при оценке качества обработки инструмента при моделировании процесса изготовления инструмента. Это требует установления взаимосвязи параметров канавки, представленных как в системе координат инструмента, так и в системе координат контрольного сечения.

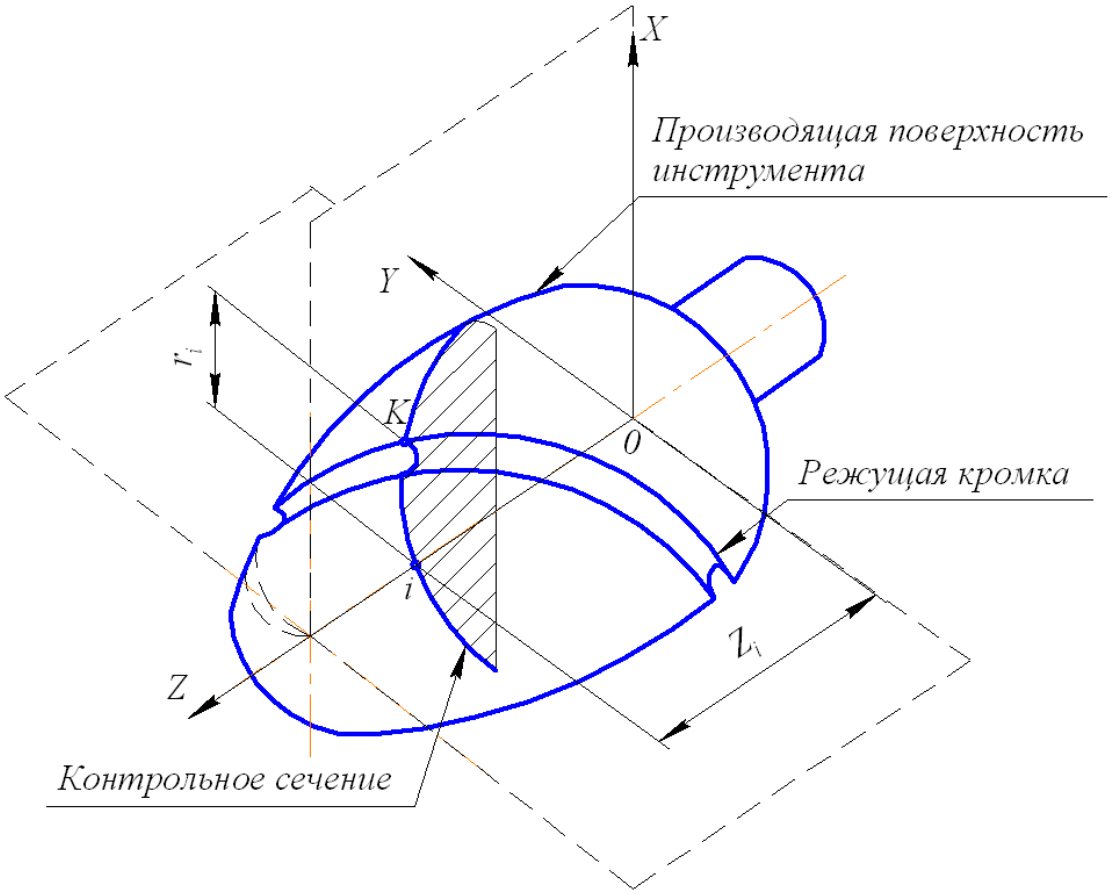


Рис. 2. Формирование контрольного сечения в системе координат XYZO инструмента

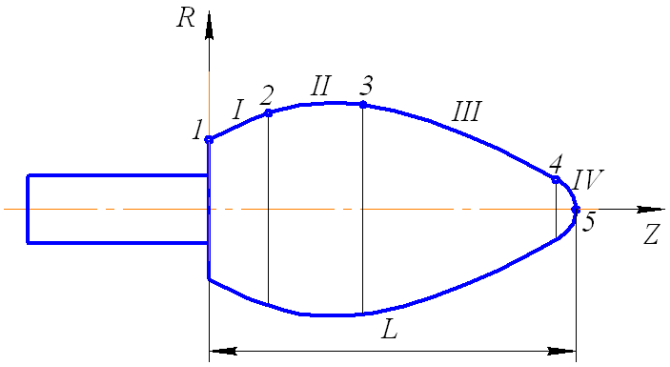


Рис. 3. Представление осевого сечения фрезы в виде отрезков элементарных математических кривых, описывающих профиль на определенных участках

Если предположить, что рассматривается осевое сечение стружечной канавки на расстоянии L_i от торца инструмента (рис.4), то ему соответствует система координат $X_2Y_2Z_2O_2$:

$$\begin{cases} X_2 = X \\ Y_2 = Y \\ Z_2 = Z - L_i \end{cases}.$$

Переход к системе координат $X_1Y_1Z_1O_1$, связанной с точкой пересечения режущей кромки торцовым сечением дает следующую связь:

$$\begin{cases} X_1 = X_2 - r_i \\ Y_1 = Y_2 \\ Z_1 = Z_2 \end{cases},$$

где r_i – радиус торцового сечения производящей поверхности.

При известной зависимости (1) возможно определение угла касательной к профилю производящей поверхности, как $tg\eta = \frac{dr}{dZ}$, и система координат $X_4Y_4Z_4O_4$, лежащая в плоскости, касательной к производящей поверхности в точке O_4, опишется как:

$$\begin{cases} X_4 = X_1 \cdot \cos\eta - Z_1 \cdot \sin\eta \\ Y_4 = Y_1 \\ Z_4 = X_1 \cdot \sin\eta + Z_1 \cdot \cos\eta \end{cases}.$$

Если угол $\beta_{пр}$ наклона стружечной канавки задан относительно оси Z инструмента, то в плоскости, касательной в заданной точке к производящей поверхности, данный угол составит:

$$tg\beta = tg\beta_{\text{пр}} \cdot \cos\eta.$$

Систему координат, лежащую в плоскости, касательной к производящей поверхности и проходящую перпендикулярно направлению режущей кромки $X_5Y_5Z_5O_5$, можно отобразить как:

$$\begin{cases} X_5 = X_4 \\ Y_5 = Y_4 \cdot \cos\beta - Z_4 \cdot \sin\beta \\ Z_5 = Y_4 \cdot \sin\beta + Z_4 \cdot \cos\beta \end{cases}.$$

Фактически системой контрольного сечения будет являться система координат, у которой центр будет лежать на оси Z:

$$\begin{cases} X_6 = X_5 + U \\ Y_6 = Y_5 \\ Z_6 = Z_5 \end{cases},$$

где $U = \frac{r_i}{\cos\eta}$.

Произведя подстановки можно получить:

$$\begin{cases} X_6 = (X - r_i)\cdot\cos\eta + (Z - L_i)\cdot\sin\eta + U \\ Y_6 = Y\cdot\cos\beta - [(X - r_i)\cdot\sin\eta + (Z - L_i)\cdot\cos\eta]\cdot\sin\beta \\ Z_6 = Y\cdot\sin\beta + [(X - r_i)\cdot\sin\eta + (Z - L_i)\cdot\cos\eta]\cdot\cos\beta \end{cases}. \quad (2)$$

Контрольное сечение будет соответствовать координатной плоскости $Z_6 = 0$.

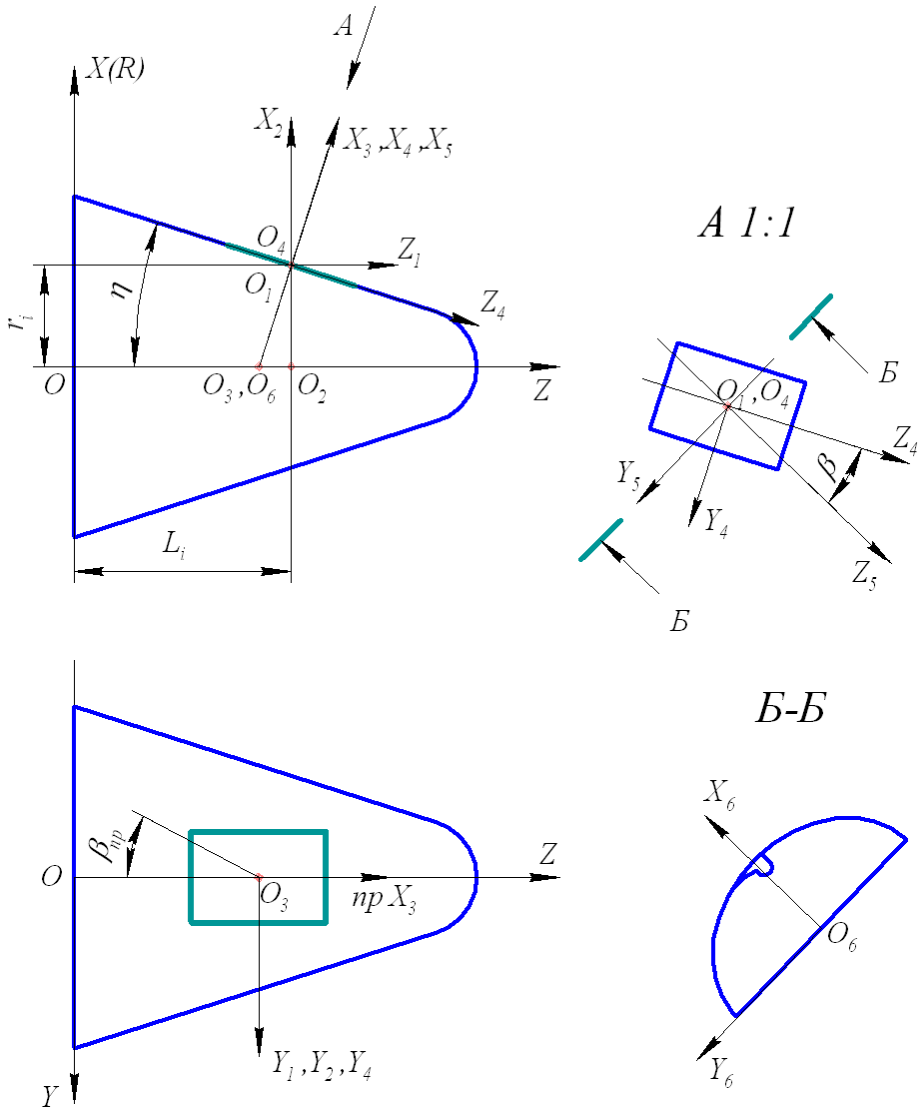


Рис. 4. Схема установления связи системы координат инструмента и контрольного сечения

При формировании линии пересечения производящей поверхности контрольным сечением необходимо воспользоваться зависимостями перехода из системы координат контрольного сечения в систему координат инструмента. Данные зависимости могут быть получены преобразованием зависимостей (2):

$$\begin{cases} X = \dfrac{X_6 + K_3 - U}{\cos\eta} + r_i \\ Y = Y_6 \cdot \cos\beta \\ Z = L_i - \dfrac{Y_6 \cdot \sin\beta}{\cos\eta} - \dfrac{(X_6 - U) \cdot tg\eta}{\cos\eta} \\ K_3 = \left(\dfrac{Y_6 \cdot \sin\beta}{\cos\eta} - \dfrac{(X_6 - U) \cdot tg\eta}{\cos\eta} \right) \cdot \sin\eta \end{cases} . \quad (3)$$

В контрольном сечении в пределах 1 и 4 четвертей с шагом Δt задается угол t в пределах -90° до +90° (рис. 5). Для каждого угла выстраивается радиальная линия:

$$\begin{cases} X_6 = R_{\text{сеч}} \cdot \cos t \\ Y_6 = R_{\text{сеч}} \cdot \sin t \\ Z_6 = 0 \end{cases}, \quad (4)$$

где $R_{\text{сеч}} = \Delta P(j-1)$.

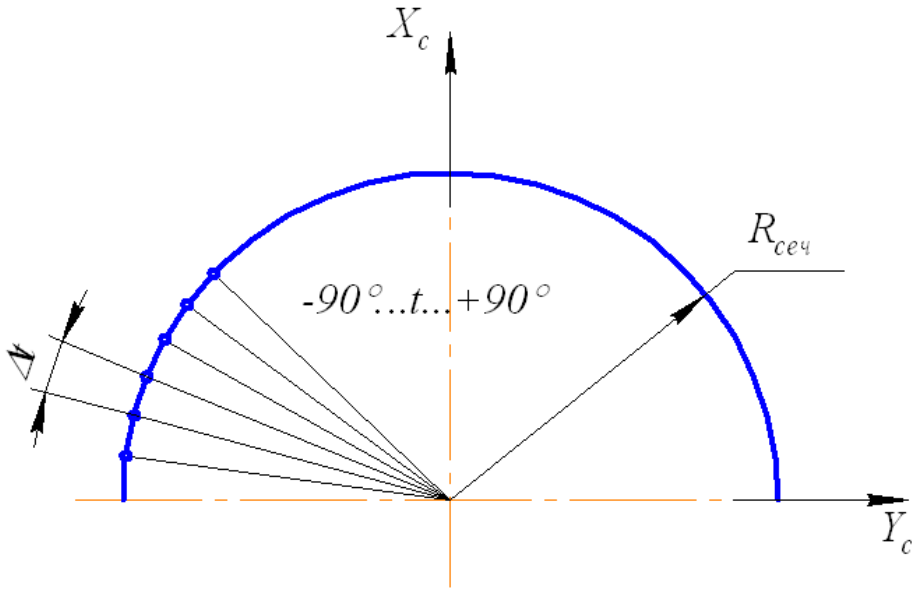


Рис. 5. Угловое положение точек сечения

Изменяя параметр $R_{сеч}$ с шагом ΔR и подставляя полученные значения в зависимости (3) и (4), определяют параметры точек Z и $r_i = \sqrt{X^2 + Y^2}$. Сравнивая данные параметры с параметрами осевого сечения (1) производящей поверхности, выбирают те $R_{сеч}$, у которых данные параметры совпадают. Данные $R_{сеч}$ со своими углами t формируют линию сечения производящей поверхности контрольным сечением.

Список литературы

1. Семенченко И.И. Проектирование режущих инструментов / И.И. Семенченко, В.М. Матюшин, Г.Н. Сахаров. М.: Машиностроение, 1962. 952 с.

Ушаков Михаил Витальевич, д-р техн. наук, проф., imstulgu@pochta.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Воробьев Илья Александрович, канд. техн. наук, доц., imsilya@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Доронин Андрей Васильевич, ведущий инженер, imsda@rambler.ru, Россия, Тула, АО «Энергострой»

THE FORMATION OF THE CONTROL CROSS SECTIONS TO DETERMINE THE PARAMETERS OF HELICAL FLUTES END SHAPED TOOL

M.V. Ushakov, I.A. Vorobev, A.V. Doronin

The questions provide the desired profile shape spiral flute on the entire length of the working part end shaped tool. An approach to the job profile of a helical flute, situated on a complex generating end surface of the tool, ensuring consistency of geometrical parameters flute in each control section. The dependence of establishing communication tool coordinate system and the control section of the coordinate system.

Key words: control section, helical flutes.

Ushakov Michael Vitalevich, doctor of technical science, professor, imstulgu@pochta.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Vorobev Ilya Alexandrovich, candidate of technical science, docent, imsilya@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Doronin Andrey Vasilyevich, lead engineer, imsda@rambler.ru, Russia, Tula, AC «Energostroy».

УДК 621.9.06

ПРОИЗВОДСТВО БОРФРЕЗ В РФ: ИСТОРИЧЕСКИЕ, ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ

В.В. Истоцкий, В.Б. Протасьев, А.Е. Виноградов

Рассмотрены четыре этапа развития производства борфрез. Акцентировано внимание на ключевых моментах развития технологических процессов и обстоятельств, влияющих на их совершенствование. Сформированы перспективы развития этих инструментов.

Ключевые слова: машиностроение, производство, борфреза.

В производстве борфрез исторически, можно выделить четыре этапа, каждый из которых отражал практические и теоретические возможности соответствующего отрезка времени.

Профессор И.И. Семенченко [1] считает борфрезы прародителями всех фрезерных инструментов. Показывая эскиз так называемой «земляники» (рис. 1), он одновременно указывает, что зубья инструмента образуются насеканием с помощью зубила ручным способом, и что русское название инструмента («земляника»), доказывает сопричастность к его производству русских инструментальщиков.

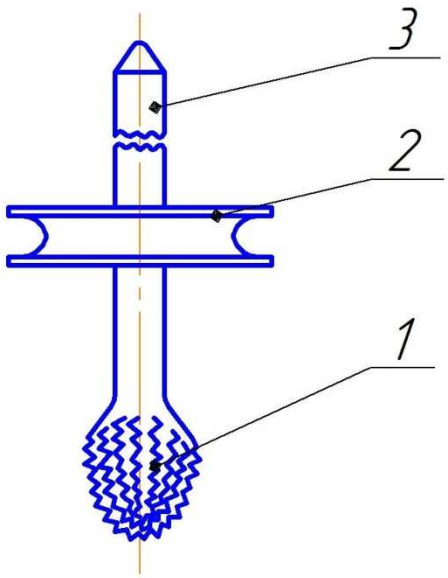


Рис. 1. Старинная фреза – «земляника»: 1 – режущая часть; 2 – приводной шкив; 3 – приводной вал

На первом этапе не стоял вопрос о нормировании параметров инструментов, они более эксклюзивные, как и оружие, при изготовлении которого они использовались.

Важную роль в обеспечении работоспособности борфрез играло мастерство насекальщика зубьев – он интуитивно, основываясь на своём опыте, выбирая место расположения зубьев, их направленность и геометрию, выполнял условия профилирования, которым сейчас уделяется особое внимание в инструментальном производстве.

Высокое качество русского огнестрельного и холодного оружия косвенно свидетельствует о совершенстве используемого режущего инструмента.

Второй этап характеризуется формирование зубьев с использованием фрезерных операций. Из-за сложности приспособлений, применяемых для обработки зубьев, борфрезы изготавливаются, в основном, прямозубыми.

Такая технология снижала качество инструментов, поскольку прямые зубья не обеспечивают равномерность процесса резания и приходилось снижать частоту вращения инструментов, но её положительной стороной стала возможность использования для обработки зубьев фрез с диаметрами, порядка 50…80 мм, что обеспечивало их достаточную стойкость.

Борфрезы изготавливались из инструментальных сталей. После фрезерования зубьев выполнялась термообработка (закалка), позволяющая обеспечить твёрдость до HRC 60…62. В целом, производство отличалось высокой трудоёмкостью и нестабильностью. Изготовление винтовых зубьев вызывало многочисленные трудности, начиная с того, что теории профилирования, доступной для практического применения не существовало (она появилась [2] в 60…70-ых годах 20-го века), и заканчивая кинематической сложностью и недостаточной жёсткостью станочных приспособлений.

Для выполнения винтовых зубьев была только одна возможность – уменьшение диаметров фрез, используемых для формирования зубьев. Это было тупиковое направление, но инструментальная промышленность СССР в годы Отечественной войны всё-таки обеспечила выпуск борфрез, решив эту задачу, большим количеством инструментов, чем их качеством.

Третий этап связан с появлением твёрдых сплавов и необходимостью его использования при изготовлении борфрез. Шлифование зубьев «по целому» было практически неприемлемо – алмазные круги не отличались достаточным качеством, имелся дефицит в этих инструментах и способов правки алмазных кругов, то есть восстановления их профиля при износе, доступных для широкого использования не было разработано. Использование твёрдых сплавов тем не менее способствовало скачкообразному повышению объёмов производства борфрез. Причинами послужил и неограниченный спрос на продукцию и, главное, возможность обработки зубьев на так называемых пластифицированных заготовках. Такие заготов-

ки с низкой прочностью, но достаточной для формирования зубьев, позволяли производительно формировать зубья на режущей части инструментов, а потом «докатать» их до требуемой твёрдости 87…90 HRA.

Такие борфрезы получили неофициальное название «чёрных» и они в 50…60-ых годах прошлого века производились в серийных объёмах на многих машиностроительных предприятиях СССР и своим качеством, соответствовали действующим тогда стандартам и ТУ.

В СССР, а далее в РФ несомненны приоритет в производстве «чёрных» борфрез принадлежит Серпуховскому инструментальному заводу (СИЗ), который освоил массовое производство этих инструментов с помощью оригинальных копировальных приспособлений на универсально-заточных станках, где вместо шлифовальных кругов устанавливались фрезы с диаметром более 20 мм.

СИЗ не только грамотно организовал производство, но и популяризовал свои достижения свои достижения в специальных условиях. К сожалению, в настоящее время эти ценные научные работы утеряны, как и отличная техническая библиотека этого завода.

Условно выделенный нами третий этап характерен выполнением условий профилирования за счёт использования фрез, формирующих винтовые зубья с диаметрами не более 20 мм, а практически – 10…12 мм. Малые диаметральные размер фрез позволяли выполнять все условия профилирования [2]:

- обеспечить общую касательную в точках соприкосновения заготовки и формообразующего инструмента;
- получить точечный, а не линейный контакт инструмента и заготовки на участках с так называемой отрицательной кривизной профиля (то есть вогнутых участков);
- избежать вторичных контактов указанных взаимодействующих тел.

На режущий части борфрез при выполнении этих условий отсутствовали так называемые подрезы, отрицательно сказываются на качестве инструментов.

С появлением многокоординатных шлифовально-заточных станков с ЧПУ, начался четвёртый этап в производстве борфрез. Зубья стали вышлифовывать «по целому» на заготовках, режущая часть которых имела необходимую для эксплуатации твёрдость до 91 HRA.

Борфрезы с вышлифованными «по целому» зубьями получили название «светлых», и они сразу доказали свои преимущества – более высокие работоспособность, качество обработанной поверхности и удобство эксплуатации.

Нельзя забывать, что борфрезы используются преимущественно в ручных инструментах с частотой вращения до 40 000 мин $^{-1}$. Радиальное биение зубьев, которое у «чёрных» борфрез доходило до 0,2 мм затрудня-

ло работу, а «светлые» фрезы, у которых эта величина не превышала 0,2 мм, получили очевидное преимущество и обеспечило безопасную эксплуатацию.

В работах [3,4] подробно рассмотрены все вопросы формирования зубьев фасонных борфрез, а оценку условий профилирования предлагается выполнять с использованием 3D-моделей изготавливаемых инструментов.

Эта современная методика позволяет решать и метрологические задачи - контролировать геометрические параметр инструментов:

- передние и задние углы зубьев на всей длине режущей части;
- радиус скругления во впадине зубьев;
- углы подъёма винтовой режущей кромки и многое другое.

В рамках четвертого этапа окончательно было доказано преимущество шлифовальных кругов (рис. 2) с профилями, образованными только прямыми линиями перед фасонными инструментами второго порядка. Такие инструменты. К сожалению, имеют «слабые» места в виде так называемых вершин, которые при шлифовании получают преимущественный износ.

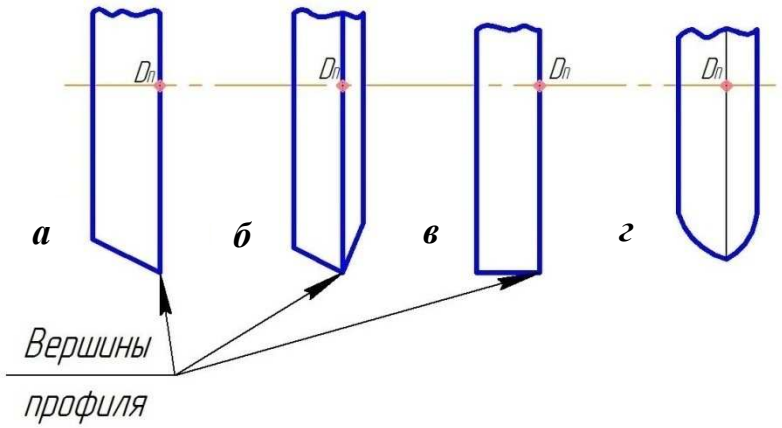


Рис. 2. Профили шлифовальных кругов, используемые при формировании зубьев: а – одноразовой формы 1V1; б - двухголовой формы 1Е1; в – плоский круг формы 1А1; г – фасонный круг

С помощью 3D-моделей, изготавливаемых борфрез появилась возможность оценки последствий износа шлифовальных кругов. Оказалось, что при незначительной глубине зубьев (0,2…1,5 мм) – износ кругов при вершине (рис. 3) существенно и негативно влияет на значения передних и задних углов, снижая работоспособность инструментов.

Внося изменения, соответствующие износу кругов в 3D-модель шлифовального круга, удаётся на виртуальных аналогах станков с ЧПУ с использованием реальной управляющей программы (УП) получать 3D-модель изготавливаемого инструмента и устанавливать период стойкости кругов, выраженный в количестве изготовленных инструментов.

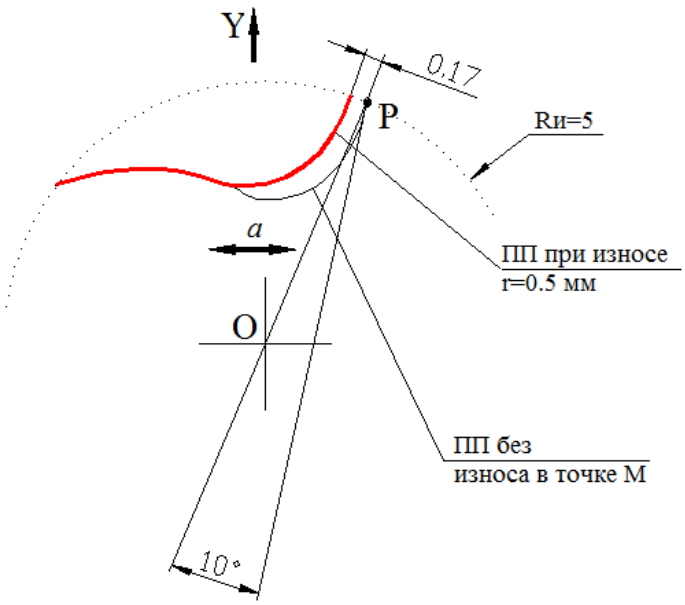


Рис. 3. Износ шлифовальных кругов при вершине

Этот период зависит от размеров борфрезы, глубины и числа зубьев и колеблется в пределах 20…40 мм инструментов, с незначительной вариацией их эксплуатационных характеристик.

Дальнейшее развитие производства борфрез по мнению авторов имеет следующие перспективы:

- формирование 3D-моделей с помощью сканирования реальных фрез, а не использование виртуальных объектов, получаемых при взаимодействии 3D-моделей заготовок и шлифовальных кругов;
- повышение качества заготовок твердосплавных борфрез путём уменьшения размеров зерен порошков перед спеканием;
- использование оборудования, обеспечиваемого точность и стабильность технологических процессов;
- совершенствование операционного и приёмного контроля в том числе с использованием тактильных и мультисенсорных измерений на координатно-измерительных машинах;
- изготовление инструментов для обработки неметаллических материалов, в первую очередь, современных углепластиков.

Список литературы

1. Семенченко И.Н. Режущие инструменты. Проектирование и производство. Том 1. НКМ СССР. Госуд. Научно-технолог. Изд-во машиностроительной литературы, 1938.

2. Лашнев С.И., Юликов М.И. Расчёт и конструирование металлорежущих инструментов с применением ЭВМ. М.: Машиностроение, 1975.

3. Протасьев В.Б., Истоцкий В.В. Проектирование фасонных инструментов, изготавливаемых с использованием шлифовально-заточных станков с ЧПУ. М.: ИНФРА-М, 2011. 128 с.

4. Илюхин С.Ю., Хандожко А.В., Стешков А.Е. Разработка технической документации на сложнопрофильные инструменты, изготавливаемые на заточных станках с ЧПУ // Известия ТулГУ. Сер. Машиностроение, Вып. 2., Инструментальные системы – прошлое, настоящее, будущее: труды международной научно-технической конференции. Тула: Изд-во ТулГУ, 2003 С. 233-240.

Истоцкий Владислав Викторович, канд. техн. наук, доц., imstulgu@pochta.ru, Россия, Чехов, НПП «РИТ-Инжиниринг»,

Протасьев Виктор Борисович, д-р техн. наук, проф., imstulgu@pochta.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Виноградов Александр Евгеньевич, асп., imstulgu@pochta.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

MANUFACTURE OF ROTARY BURRS IN RUSSIA: HISTORICAL, THEORETICAL AND TECHNOLOGICAL ASPECTS

V.V. Istockiy, V.B. Protasev, A.E. Vinogradov

Considered four stages of development of production of rotary burrs. The attention is focused on the key aspects of the development of technological processes and circumstances that affect their improvement. Generated prospects for the development of these tools.

Key words: engineering, production, sorpresa.

Istockiy Vladislav Victorovich, candidate of technical sciences, docent, v_ist@mail.ru, Russia, Chehov, JSC "RIT-Engineering",

Protasev Victor Borisovich, doctor of technicale sciences, professor, imstulgu@pochta.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Vinogradov Aleksandr Evgenyevich, postgraduate, imstulgu@pochta.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 621.9

ДИНАМИКА ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ ПРИ ВАРИАЦИИ ПЕРЕДНЕГО УГЛА РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

Г.В. Шадский, В.С. Сальников, О.А. Ерзин

Рассмотрены вопросы влияния переднего угла режущего инструмента на силы резания. Для повышения эффективности процесса резания предложено использовать самонастраивающеюся систему позволяющую, стабилизировать условия резания путем управления кинематическим передним углом в соответствии с направлением равнодействующей силы резания.

Ключевые слова: интенсификация процесса резания, процесс разрушения, упругопластическое деформирование, управление процессом, пространственно-временное согласование.

Уменьшение переднего угла увеличивает коэффициент усадки стружки и работу стружкообразования. Это приводит к увеличению всех составляющих силы резания. Однако влияние переднего угла резца на силы P_z, P_y и P_x неодинаково [2,4,5,11,12]. Уменьшение положительного и увеличение отрицательного угла γ наиболее сильно сказывается на росте осевой силы. Радиальная и окружная силы возрастают в меньшей степени (рис. 1).

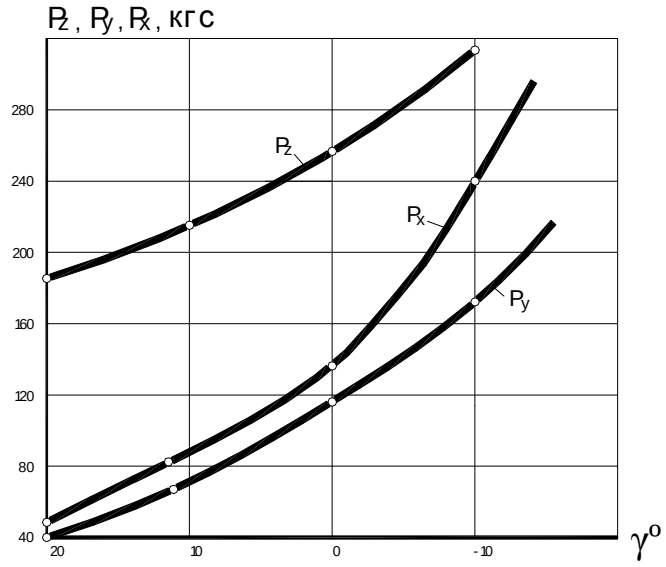


Рис. 1 Силовые характеристики процесса резания при точении детали из стали 40 (f=60°; t=4мм; s=0,285мм/об; v=40м/мин)

Экспериментальные данные о влиянии угла действия на угол сдвига получены при свободном резании стали 20Х со скоростью 0,7 м/мин при постоянном переднем угле 20° (рис. 2) [4,5,7]. Изменение угла действия

обеспечивалось применением различных смазывающих жидкостей и изменением шероховатости передней поверхности инструмента. При этом изменялся коэффициент трения μ стружки с передней поверхностью инструмента и угол трения ρ, которые связаны зависимостью $\mu = tg\rho$. Поскольку в данном случае передний угол оставался постоянным, то зависимость Θ(ω) характеризует «чистое» влияние угла действия.

Физический смысл влияния угла действия на процесс стружкообразования заключается в том, что его изменение характеризует изменение напряженного, а, следовательно, и деформированного состояния зоны стружкообразования.

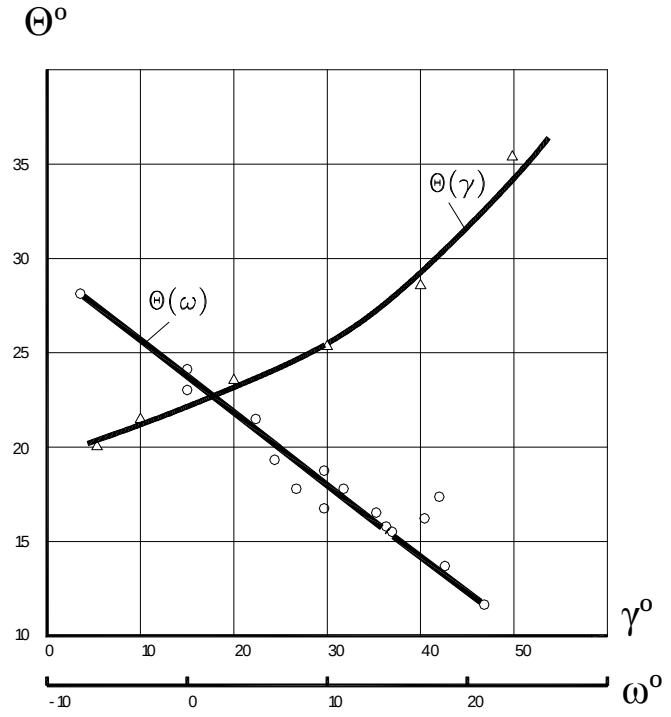


Рис. 2. Положение плоскости сдвига (ω=0°) и влияние угла действия на угол сдвига (γ=20°) при свободном резании стали 20Х

Если угол действия увеличивается, то это означает, что вектор силы стружкообразования повертывается против часовой стрелки. В том же направлении поворачиваются оси главных напряжений и вся картина напряженного и деформированного состояния. Соответственно повертывается условная плоскость сдвига и уменьшается угол сдвига Θ. В результате увеличиваются деформация обрабатываемого материала, усадка стружки, сила резания и т. д.

Изменение угла действия можно было осуществить также путем варьирования переднего угла. Но в этом случае на угол сдвига сразу влияло бы два фактора – угол действия и передний угол. Иначе говоря, передний угол влиял бы на процесс стружкообразования двумя путями: косвенно (через угол действия) и непосредственно.

Чтобы экспериментально выявить непосредственное влияние переднего угла на процесс стружкообразования, необходимо при изменении переднего угла обеспечивать постоянство угла действия подбором соответствующего коэффициента трения на передней поверхности инструмента.

Результаты таких экспериментов при постоянном угле действия ω=0 свидетельствуют о том, что непосредственное влияние переднего угла на угол сдвига велико, хотя и не столь значительно, как влияние угла действия.

С увеличением переднего угла возрастает угол сдвига и соответственно уменьшается деформация обрабатываемого материала в зоне стружкообразования.

Физический смысл непосредственного влияния переднего угла на процесс стружкообразования заключается в следующем: передний угол определяет направление схода стружки. Чем больше передний угол, тем меньше угол между векторами скорости резания и скорости стружки, т.е. тем меньше изменяется направление движения обрабатываемого материала при его превращении в стружку. Так как направление движения обрабатываемого материала изменяется в результате сдвигов в зоне стружкообразования, то при увеличении переднего угла деформация в зоне стружкообразования уменьшается.

Систем сил, действующих на элемент стружки и резец (рис. 3).

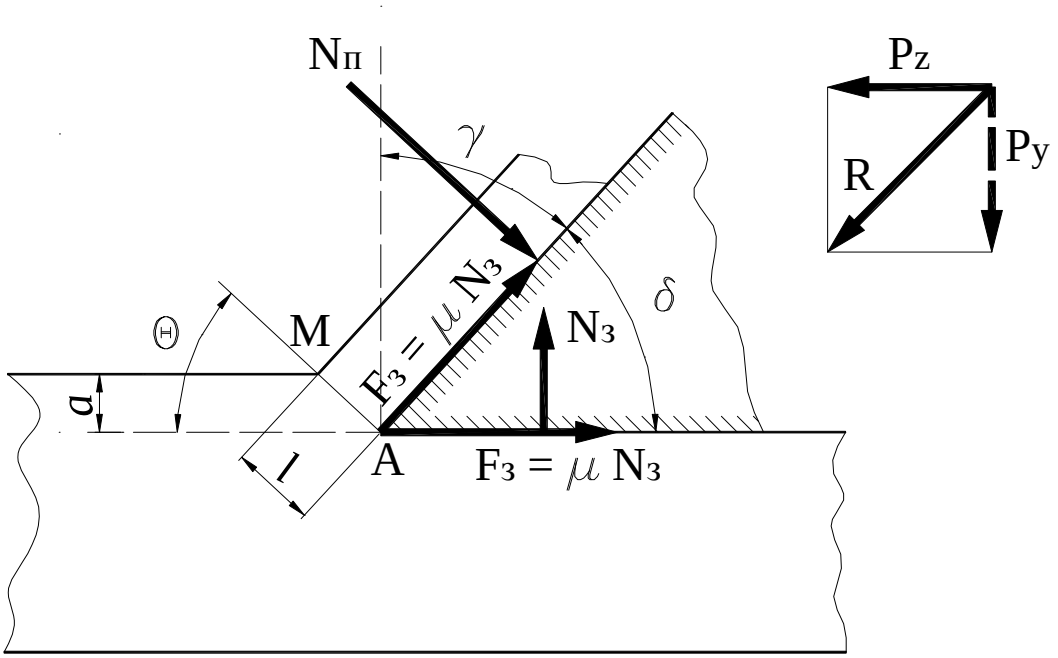


Рис. 3. Схема сил, действующих на элемент стружки и резец

Проецируя все силы на направления P_z и P_y, из условия равновесия получим [1, 11]:

$$P_z = N_n \cdot (\sin\delta + \mu \cdot \cos\delta) + \mu \cdot N_з; \quad (1)$$

$$P_y = N_n \cdot (\mu \cdot \sin\delta - \cos\delta) + \mu \cdot N_з, \quad (2)$$

откуда,

$$N_n = \frac{P_z - \mu \cdot N_з}{\sin\delta + \mu \cdot \cos\delta}, \quad (3)$$

где P_z – сила, перемещающая резец; N_n и $N_з$ – нормальные силы на передней и задней гранях резца; F_n и $F_з$ – силы трения на передней и задней гранях резца.

Известно, что сила N_n частью отворачивает стружку, сила же $F_n = \mu \cdot N_n$ ее осаживает, и обе силы в совокупности производят сдвиг вдоль плоскости скалывания АМ под углом скалывания Θ к направлению движения резца.

Принято считать [1,4,5], что сдвигу элемента стружки препятствует также нормальная к плоскости скалывания сила N, вызывающая силу трения $F_g = \mu 1 \cdot N$, где $\mu 1$ - коэффициент внутреннего трения обрабатываемого металла.

Очевидно, скалывание произойдет там, где сопротивление сдвигу будет наименьшим, а значит, и при наименьшем значении P_z. Это возможно при угле скалывания Θ, соответствующем наибольшему значению знаменателя. Приравнивая производную знаменателя по Θ нулю, находим величину Θ:

$$\Theta = 90° - (\frac{\rho + \rho_1 + \delta}{2}), \quad (4)$$

где δ – угол резания ($\delta = 90° - \gamma$); ρ – угол трения стружки по резцу; $\rho 1$ – угол внутреннего трения.

Резание металлов представляет собой процесс деформации сжатием и сдвигом снимаемого слоя металла при наличии элементов течения в стружке [1,4,5]. Из уравнения (4) следуют выводы: угол сдвига Θ уменьшается и, следовательно, усадка стружки, сопротивление резанию увеличиваются с возрастанием угла резания δ (или с уменьшением переднего угла γ), возрастанием углов трения ρ и $\rho 1$.

На рис. 4 представлен план сил. Равнодействующая сила

$$R = \frac{P_{сдв}}{\cos(\Theta + \rho - \gamma)} = \frac{\sigma_{сдв} \cdot a \cdot b}{\cos(\Theta + \rho - \gamma) \cdot \sin\Theta}, \quad (5)$$

где $P_{сдв}$ – сила сдвига; $\sigma_{сдв}$ – напряжение сдвига; a и b – толщина и ширина среза.

Значительно сложнее определяется угол трения и коэффициент трения μ. Обычный метод экспериментального определения величины μ с помощью графика зависимости P_z и P_y от толщины среза а и экстрапо-

лирования значений P_z и P_y на нулевую величину а сложен и не всегда дает надежные результаты. Поэтому его приближенное значение иногда рассчитывают по формуле (4), если принять $\rho 1 = 0$. Тогда получим

$$\rho = 90° - (2 \cdot \Theta - \gamma),$$
$$\mu = tg\rho = ctg(2 \cdot \Theta - \gamma). \qquad (6)$$

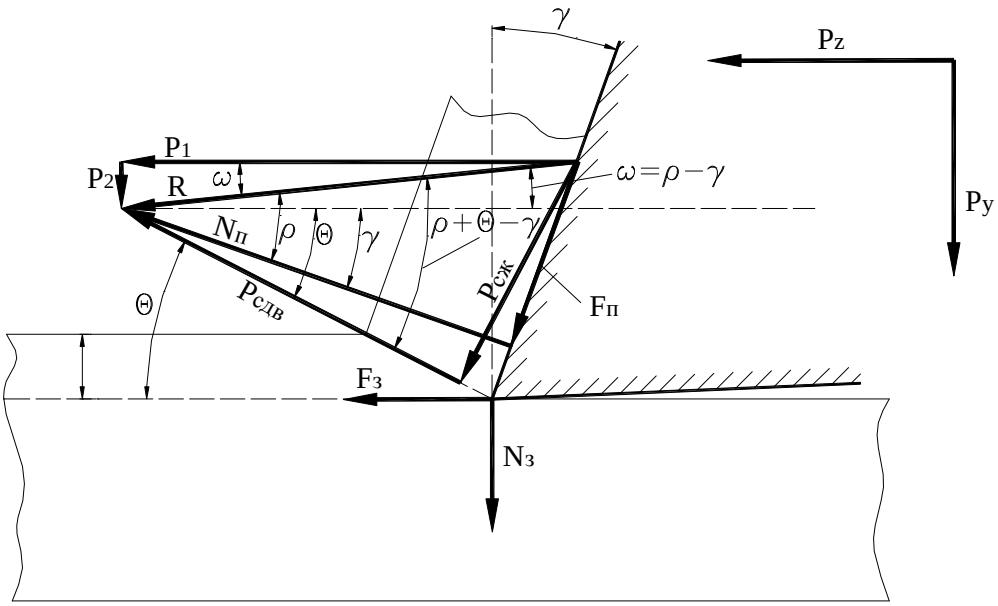
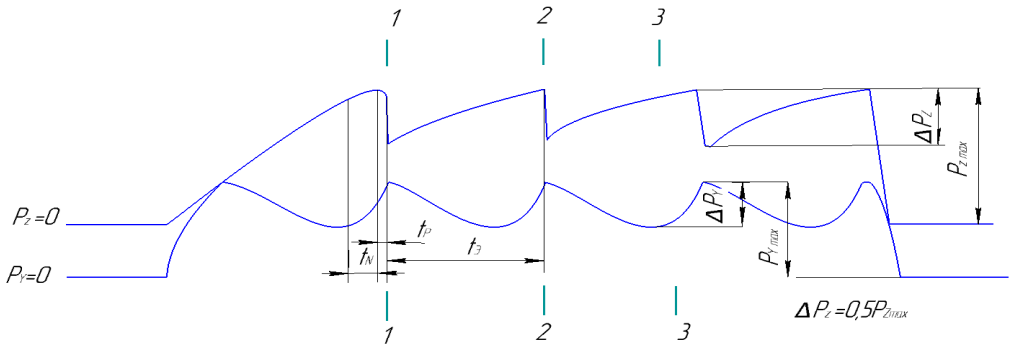


Рис. 4. План составляющих сил резания

Для представления полной динамической картины процесса резания необходима устойчивая периодическая последовательность поэлементного разрушения удаляемого с заготовки слоя металла, это достигается снятием результатов скоростной съемки [6,7,8,7,10] и подтверждено данными осциллографирования [3,7] при разных условиях резания металлов. Вышесказанное представлено на схеме элементообразования стружки (рис. 5). Эти данные позволяют предложить иное описание динамики стружкообразования, а именно последовательное разделение элементов стружки на три фазы [2].



а

Рис. 5. Динамическая картина процесса резания с удалением с заготовки слоя металла (начало)

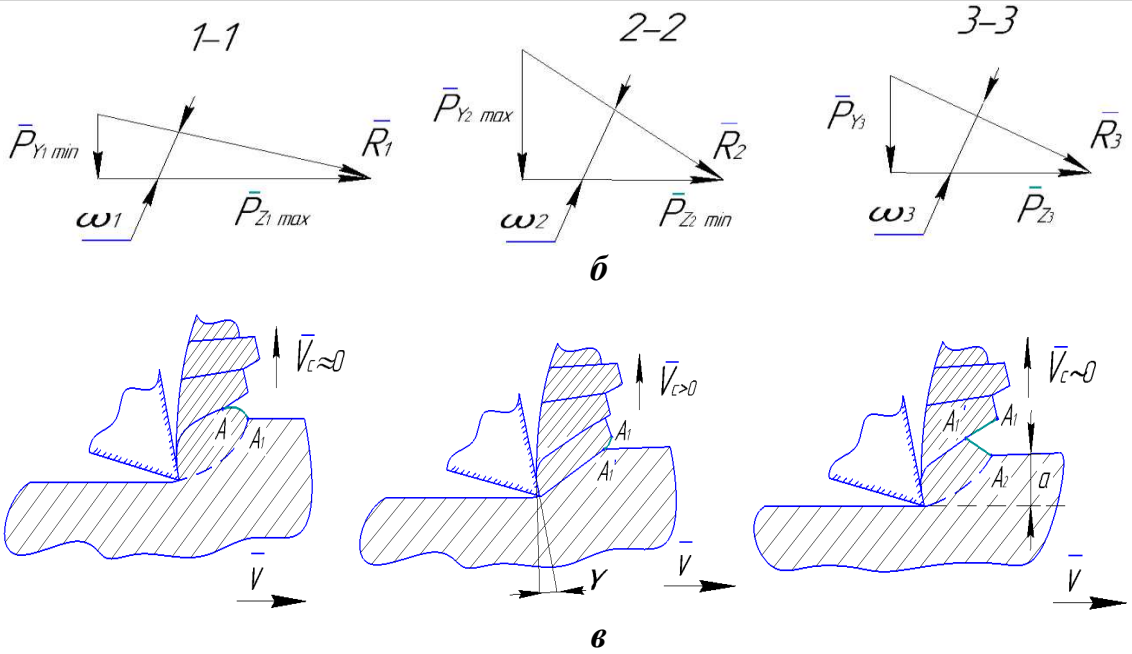


Рис. 5. Динамическая картина процесса резания с удалением с заготовки слоя металла (окончание)

Первая фаза (рис.5 (1-1)) соответствует упругому предельному деформированию элемента стружки, внешний контур фазы ограничивается дугой A1A. Главная составляющая P_z силы резания R достигает максимального значения за время t_N упругого нагружения, которая в свою очередь зависит от скорости v резания. В этой фазе достигнуты минимальные значения таких характеристик, как угол ω действия силы резания и радиальная составляющая P_y силы резания, что касается скоростных характеристик, то скорость стружки V_c по отношению к передней грани режущего клина приближенно равна нулю.

Вторая фаза (рис. 5 (2-2)) обусловлена сдвигом образовавшегося элемента стружки на линии A1'A1 , а так же перемещением его по передней грани режущего клина. Во второй фазе наблюдается превышение скорости стружки по отношению к скорости резания на величину скорости упругого разгружения металла образовавшегося элемента стружки. За время t_P разгружения в этой фазе начинается формирование нового элемента стружки из металла клина, который находится под линией сдвига A1'A1. Соотношение сил можно видеть на рис. 2.

Третья фаза (рис. 5. (3-3)) представлен частью периода $t_Э$, образования элемента, в этой фазе протекает упругопластическое формирование элемента стружки от состояния второй фазы к элементам стружки фазы 1-1.

За время образования стружки, силы, существующие в зоне резания подвержены циклическим изменениям, характеристика которых заключается в следующем. Составляющие силы резания (рис. 5, а) имеют постоянное направление своего действия. Фазы роста и падения составляющих взаимопротивоположны. Колебания главной составляющей не превышают половины ее максимального значения [3,7]. Циклические изменения угла ω (рис. 5, б) возможны в том случае, когда постоянны передние углы у режущих клиньев [3,7], что находит свое отражение в изменении условий трения при образовании элементов стружки. Последнее поясняется алгебраической формулой [4]:

$$\omega = \gamma(R, \omega) + \varphi \qquad (7)$$

где φ - угол трения на передней поверхности режущего клина, град.

Анализируя исследования [3,4,5,7,12] сил резания можно сказать, что количественно силы определяются основными параметрами, при процессе резания: b - ширина срезаемого слоя металла, которая оказывает линейные влияния; σ_B - предел прочности; a - толщина срезаемого слоя металла; ω – угол действия силы резания; V – скорость влияющая на величину сил резания, а так же и на место положения и характер зависимостей сил.

Рассмотрим механическую систему, состоящую из рычага, имеющего точку опоры и возможность поворота под воздействием сил P и сγ (рис. 6).

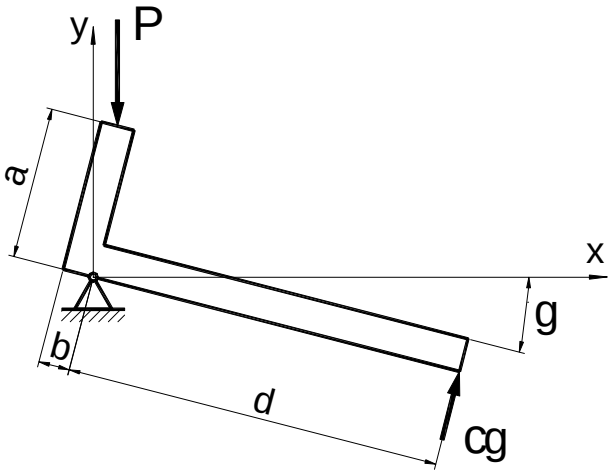


Рис. 6. Идеалистическая модель инструмента с поворотным элементом

Под воздействием силы P рычаг стремится повернуться по часовой стрелке. Это возможно только в том случае, если выполняется условие: $a \cdot \sin\gamma - b \cdot \cos\gamma > 0$. Сила P гармонически изменяется во времени по закону: $P = A(1 + \sin\omega t)$ принимая значения от 0 до 2A (рис. 7).

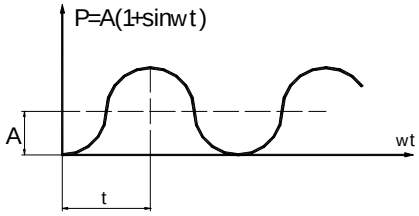


Рис. 7. График изменения силы P во времени

Противодействие силе P оказывает сила cg, которая линейно зависит от угла γ. На значение угла γ наложено ограничение $15^0 \le \gamma \le 30^0$, причем при достижении значения $\gamma = 30°$ происходит обнуление значения силы P с последующим возрастанием ее по вышеприведенному закону. Данная схема моделирует идеальное изменение силы резания по закону синуса, ее воздействие на вершину резца, в результате чего происходит поворот элемента резца, приводящий к увеличению значения переднего угла. Условие обнуления силы P при достижении значения $\gamma = 30°$ реализует отделение элемента стружки с уменьшением силы резания и возвратом элемента резца в исходное положение.

Многие параметры процесса механической обработки, такие как, например, механические свойства обрабатываемого материала, температура в зоне обработки, геометрические характеристики режущей части инструмента и т. д. не являются постоянными, а меняются на протяжении всего процесса резания. В результате этого становится актуальной задача отслеживания этих изменений и их компенсаций для получения оптимальных результатов при наименьших затратах энергии и материальных ресурсов. Одним из таких решений может служить следующая самонастраивающаяся система (рис. 8).

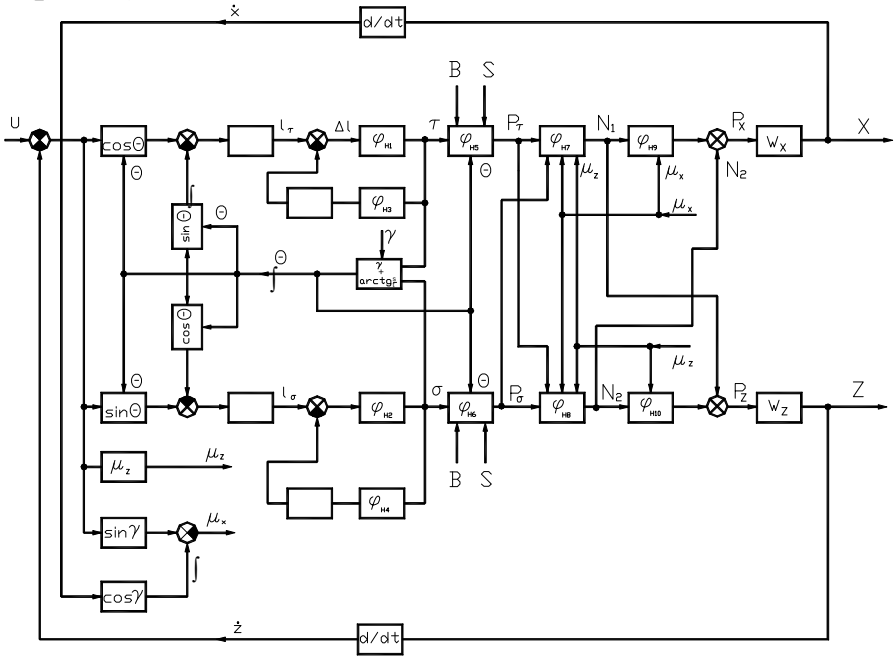


Рис. 8. Структурная схема системы резец – процесс резания

Данная система реализует зависимости (1-6). В структуре схемы можно выделить две аналогичные по своему составу и назначению ветви, содержащие преобразование параметров в проекциях на оси X и Z соответственно.

Обозначение и назначение основных звеньев сведем в таблицу.

Обозначение и назначение основных звеньев системы

Обозначение	Назначение звена
∫	интегрирующее звено
φн1	оператор преобразования перемещения резца в касательные напряжения
φн2	оператор преобразования перемещения резца в нормальные напряжения
φн3	оператор преобразования касательных напряжений в скорость деформации
φн4	оператор преобразования нормальных напряжений в скорость деформации
φн5	оператор преобразования касательных напряжений, глубины резания и скорости подачи в составляющую силы резания, сонаправленную с плоскостью сдвига
φн6	оператор преобразования нормальных напряжений, глубины резания и скорости подачи в составляющую силы резания, перпендикулярную плоскости сдвига
φн7	оператор преобразования составляющих силы резания перпендикулярной и сонаправленной с плоскостью сдвига, коэффициентов трения по передней и задней поверхностям резца в нормаль к передней поверхности резца
φн8	оператор преобразования составляющих силы резания перпендикулярной и сонаправленной с плоскостью сдвига, коэффициентов трения по передней и задней поверхностям резца в нормаль к задней поверхности резца
φн9	оператор преобразования нормалей к передней и задней поверхностям резца и коэффициента трения по передней поверхности в составляющую силы резания по оси X
φн10	оператор преобразования нормалей к передней и задней поверхностям резца и коэффициента трения по задней поверхности в составляющую силы резания по оси Z

Работа выполнена в рамках проекта РФФИ 16-48-710339 р_центр_а «Развитие теории высокоэффективных процессов направленного разрушения материалов, основанных на принципах пространственно временной адаптации вектора воздействия по состоянию упругопластического деформирования зоны предразрушения» и регионального конкурса проектов фундаментальных научных исследований Тульской области Ц6916ГРФ.

Список литературы

1. Владимиров В.И. Физическая природа разрушения металлов. М.: Металлургия, 1984. 280 с.

2. Евсеев Л.Л. Исходные положения и зависимости для расчета характеристик динамики процесса резания металлов // Вестник машиностроения. 1995. №12. С. 1,3,7.

3. Жарков И. Г. Вибрации при обработке лезвийным инструментом. Л.: Машиностроение. 1986. 184 с.

4. Зорев Н.Н. Вопросы механики процесса резания металлов / Н.Н. Зорев. М.: Машгиз, 1956. 368 с.

5. Зорев Н.Н. Обработка резанием тугоплавких сплавов на основе молибдена / Н.Н. Зорев, З.М. Фетисова. М.: Изд-во Машиностроение, 1966. 228 с.

6. Кондратов А.С. Повышение производительности станков токарной группы. М.: Машиностроение, 1987. 48 с.

7. Обработка резанием жаропрочных и титановых сплавов / под ред. Н.И. Резникова. М.: Машиностроение. 1972. 200 с.

8. Шадский В.Г. Идентификация параметров состояния зоны резания / В.С. Сальников, В.Г. Шадский, О.А. Ерзин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2009. Вып. 4. С. 244-253.

9. Сальников В.С. Оперативный контроль состояния зоны резания при точении / В.С. Сальников, В.Г. Шадский, Д.И. Долматов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2007. Вып. 3. С. 125–131.

10. Сальников В.С. Анализ сигналов обратной связи в системах интенсификации процесса резания / В.С. Сальников, В.Г. Шадский // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2008. Вып. 4. С. 13–20.

11. Старков В.К. Дислокационные представления о резании металлов. М.: Машиностроение, 1979. 159 с.

12 Трент Е.М. Резание металлов. М.: Машиностроение, 1980. 263 с.

Шадский Геннадий Викторович, д-р техн. наук, проф., chief.gennadiischadscky@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Сальников Владимир Сергеевич, д-р техн. наук, проф., vsalnikov.prof@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Ерзин Олег Александрович, кан. техн. наук, доц., erzin79@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

DYNAMICS OF PROCESS OF CUTTING AT THE VARIATION OF THE FORWARD CORNER OF THE CUTTING TOOL

G.V. Shadsky, V.S. Salnikov, O.A. Erzin

Questions of influence of a forward corner of the cutting tool on cutting forces are considered. For increase in efficiency of process of cutting it is offered to use the adaptive system allowing, to stabilize cutting conditions by management of a kinematic forward corner according to the direction of net force of cutting.

Key words: cutting process intensification, destruction process, elasto-plastic deformation, management of process, existential coordination.

Shadsky Gennady Victorovich, doctor of technical science, professor, chief.gennadiischadscky@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Salnikov Vladimir Sergeevich, doctor of technical science, professor, vsalnikov.prof@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Erzin Oleg Aleksandrovich, candidate of technical science, docent, erzin79@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University

СОДЕРЖАНИЕ

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Маликов А.А., Сидоркин А.В.
Некоторые аспекты расчета преобразователя «сопротивление-напряжение» для измерения и регистрации температуры в процессе шевингования-прикатывания цилиндрических зубчатых колес 3

Заморенов М.В., Копп В.Я., Филиппович О.В., Заморёнова Д.В.
Моделирование структуры «ячейка-накопитель» методом путей при абсолютно надежном накопителе 10

Савин Л.А., Сытин А.В., Тюрин В.О.
Энергетические потери в подшипниках жидкостного трения при смазке двухфазной кипящей средой 20

Ширшиков Д.Н., Спирин М.С., Зайцев Ю.М.
Определение электромагнитной проницаемости перспективных наноматериалов 31

Скородумов Е.С., Кондратов Д.В., Кузнецова Е.Л., Могилевич Л.И., Попов В.С.
Колебания геометрически нерегулярной пластины и штампа, взаимодействующих друг с другом через слой вязкой жидкости 37

Васин В.М.
Оценки качества и расчёт режимов непрерывного смешивания сыпучих материалов 54

Лагерев И.А.
Расчетно-экспериментальное исследование динамики манипуляционной системы при совместном движении звеньев 62

Пьянков И.Б., Ерофеев В.А., Страхова Е.А.
Критерии оценки условий эксплуатации электродов при контактной точечной сварке 71

Куцелап К.А., Вороненко В.П., Шалдов А.Э.
Эффективное проектирование транспортно-складских систем 84

Гущин И.А., Авдеев А.Р., Швец А.А., Дроботов А.В.
Алгоритм деления объемной модели на слои для 3D печати 99

Горелова А.Ю., Кристаль М.Г.
Совершенствование конструкции инструмента на основе моделирования процесса растачивания гильзы гидроцилиндра 105

Шафорост А.Н.
Структурно-параметрический синтез транспортных систем механосборочных цехов машиностроительных предприятий 115

Поезжаева Е.В., Иванов Н.К., Шаякбаров И.Э.
Робот для фотовольтаического покрытия дороги 123

Сорокин П.А., Ушаков В.К.
Оценка диапазона применения оптической рефлектометрии при контроле относительного ресурса металлоконструкций 128

Сорокин П.А., Мишин А.В., Хряков К.С.
Разработка и сравнение систем контроля устойчивости башенных кранов 136

Скобельцын С.А.
Идентификация параметров анизотропного покрытия упругого шара по отраженному звуку 144

Галонска М.К., Прейс В.В.
Программный модуль параметрического синтеза бункерного загрузочного устройства с вращающейся воронкой на заданную производительность 157

Маркова Г.В., Клюева Е.С., Гринберг Е.М., Гончаров С.С.
К вопросу о последовательности стадий спинодального распада сплава 75Mn25Cu 166

Мельниченко Н.В., Петрушин Г.Д.
Износостойкость наплавленного покрытия 174

Аверин В.В., Желтков В.И.
Проникание упругого ступенчатого стержня в грунт 178

Андреев С.С., Мягков Ю.В., Курицин В.В.
Математическая модель вибраций двигателя внутреннего сгорания ... 189

Носов М.А., Сабинина А.Л., Анцева Н.В.
Оптимизация количественного состава ремонтных бригад при управлении качеством технического обслуживания оборудования промышленных предприятий 202

Волжин С.Г.
Модернизация финишных операций при изготовлении штамповочных инструментов в условиях Тульского патронного завода 210

Ларин Н.В.
Определение законов неоднородности покрытия термоупругой пластины, обеспечивающих наименьшее звукоотражение 216

ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

Ларин С.Н., Нуждин Г.А., Пасынков А.А.
Оценка напряженно-деформированного состояния процесса изотермической отбортовки в режиме кратковременной ползучести .. 235

Трегубов В.И., Пилипенко О.В., Ларин С.Н., Осипова Е.В.
Обобщение теоретических и экспериментальных исследований ротационной вытяжки сложнопрофильных оболочек с переменной толщиной стенки 251

Киреева А.Е., Кухарь В.Д., Митин О.Н.
Технологические особенности получения конических кумулятивных облицовок 258

Черняев А.В., До А.Т.
Моделирование операции изотермической отбортовки отверстий в заготовках с наклонным фланцем 264

Ларин С.Н., Лазарев В.А., Коротков В.А., Платонов В.И.
Определение зависимости интенсивности напряжения от степени и скорости деформации образца из металла при растяжении с повышенной температурой 269

Ларин С.Н., Пасынков А.А., Нуждин Г.А.
Исследование силовых режимов и предельных параметров при изотермической отбортовке в режиме кратковременной ползучести 276

Пасынков А.А., Серегина А.И.
Оценка напряженно-деформированного состояния при высадке трубных заготовок из высокопрочных сплавов 285

Кухарь В.Д., Киреева А.Е., Митин О.Н.
Штамповка поковок для получения конических облицовок с последующей обработкой резаньем 297

Черняев А.В., Нгуен В.Т.
Силовые режимы изотермического обратного выдавливания патрубка с наклонным фланцем 305

Киреева А.Е., Митин О.Н., Ялхимова Т.А.
Вытяжка коническической облицовки из листовой заготовки 310

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА, ОБРАБОТКА И ЗАЩИТА ИНФОРМАЦИИ

Степанов Д.Н.
Исследования вейвлетов габора в задаче локализации точечных особенностей на снимках земной поверхности 315

Ивахно Н.В., Федоров С.С., Чуков А.Н.
Алгоритм распознавания начала вдоха/выдоха в структуре комплексов корректирующего воздействия на дыхательную систему человека 327

Ермакова И.Н.
Цвет и прозрачность многослойных пленок полиэтилена в поляризованном свете 334

Михед А.Д., Смирнова Е.Е., Липатова Ю.В.
Моделирование манипулятора кисти андроида 343

Филиппова Е.В.
Общая структура тепловизоров и варианты их классификаций 348

Пегачкова Е.А., Кузнецова Е.Л., Горбунова Ю.А.
Управление беспилотным самолетом методом динамического программирования в теории графов 352

Ерофеева А.В., Кондратов А.П.
Оценка релаксации локальных напряжений усадки в интервальных полимерных плёнках 360

Евсеев Е.Е., Завалишин П.Е., Борзенкова С.Ю., Яковлев Б.С.
О современных подходах к организации страхового хранения электронных документов 369

Порошина Л.Д., Проскуряков Н.Е.
Характеристики и элементы полиграфической защиты идентификационных карт 376

Кулаков П.А., Назарова Р.Ф., Якшибаев И.С.
Автоматизация ведения балльно-рейтинговой системы в вузе 383

УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ, СТАНДАРТИЗАЦИЯ И СЕРТИФИКАЦИЯ

Протасьев В.Б.
Некоторые аспекты использования координатно-измерительных машин 391

Калмыков В.М., Ермилов Д.В., Соловьев С.И., Белов Д.Б.
Методика оценки точности измерений параметров ветра беззондовым метеокомплексом 396

Благовещенский Д.И., Белов Д.Б., Соловьев С.И.
Метрологический подход к оценке неопределенности приведения объема газа к стандартным условиям 401

Молчанова М.С.
Новая структура и термины ИСО 9001:2015 407

Аверьянова И.Э., Плахотникова И.А., Молчанова М.С.
Расчет потенциала удовлетворенности потребителей при оценке качества сервисного обслуживания автотранспорта 411

Носов М.А., Сабинина А.Л., Анцева Н.В.
Оценка качества труда наладчиков автоматических роторных линий при внутрипроизводственном хозрасчете 416

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

Ивахно Н.В., Федоров С.С., Чуков А.Н.
Метод технического самодиагностирования в комплексах корректирующего воздействия на дыхательную систему 423

Козлова Е.С., Рогов С.В.
Общая математическая модель двухосного гиростабилизатора 430

Кулешов В.В.
Метод расширения полосы пропускания в акселерометре компенсационного типа 439

ВОЕННО-СПЕЦИАЛЬНЫЕ НАУКИ

Курков С.Н., Голованов О.А., Серов А.В.
Методика определения характеристик защитного элемента бронешлема на основе композита с добавкой углеродных нанотрубок 445

Полянсков А.В., Спирин М.С., Зайцев Ю.М.
Разработка методики измерения S-параметров средств снижения радиолокационной заметности образцов вооружения и военной техники 454

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Гужов С.В.
Оценка работоспособности электротехнических комплексов и систем при передаче электрической энергии в режимах несинусоидальности 466

Фалдин Н.В., Моржов А.В.
Чувствительность характеристик автоколебаний в системе с трехпозиционным релейным элементом 476

Подборский П.Э., Подборский Э.Н.
Аналитическое конструирование регуляторов электропривода двухмассовой системы Г-Д. Учет ограничений типа неравенств 490

Нгуен Т.З., Кхань Ч., Сурков В.В.
Оптимальный по точности вентильный двигатель 500

Шонин О.Б., Новожилов Н.Г., Крыльцов С.Б.
Повышение устойчивости асинхронного электропривода с бездатчиковой скалярной системой управления при провалах напряжения сети 507

Подборский П.Э., Подборский Э.Н.
Выбор критерия оптимальности электропривода двухмассовой системы генератор-двигатель 520

Белицкий А.А., Шклярский Я.Э.
Компенсация несинусоидальных токов и токов несимметрии в четырехпроводных сетях низкого напряжения 531

Нгуен Т.З., Кхань Ч., Сурков В.В.
Синтез оптимального по точности регулятора скорости вентильного двигателя 540

Сурков В.В., Фам Ван Ты
Синтез оптимального по точности регулятора привода с люфтом редуктора и динамической нагрузкой в виде колебательного звена 546

ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ РЕЗАНИЕМ

Шадский Г.В., Ерзин О.А., Сальников С.В.
Дискретная модель движения стружки по передней поверхности режущего клина 553

Ушаков М.В., Воробьев И.А., Доронин А.В.
Формирование контрольных сечений для определения параметров винтовых стружечных канавок многозубого фасонного инструмента 561

Истоцкий В.В., Протасьев В.Б., Виноградов А.Е.
Производство борфрез в РФ: исторические, теоретические и технологические аспекты 568

Шадский Г.В., Сальников В.С., Ерзин О.А.
Динамика процесса резания при вариации переднего угла режущего инструмента 574

Научное издание

ИЗВЕСТИЯ

ТУЛЬСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Выпуск 11

Часть 2

Редактор О.И. Борискин

Компьютерная правка и верстка
М.С. Шевков, Б.С. Яковлев

Учредитель:
ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»
Изд. лиц. ЛР № 020300 от 12.02.97
Подписано в печать 21.11.16. Дата выхода в свет 25.11.16
Формат бумаги 70×100 1/16. Бумага офсетная
Усл. печ. л. 34,4. Уч.-изд. л. 29,6
Тираж 500 экз. Заказ
Цена свободная

Тульский государственный университет
300012, г. Тула, просп. Ленина, 92

Отпечатано в Издательстве ТулГУ
300012, г. Тула, просп. Ленина, 95