

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 4

**Тула
Издательство ТулГУ
2018**

Председатель

Грязев М.В., д-р техн. наук, проф., ректор Тульского государственного университета.

Заместитель председателя

Кухарь В.Д., д-р техн. наук, проф., проректор по научной работе.

Ответственный секретарь

Ивутин А.Н., канд. техн. наук, доц., начальник Управления научно-исследовательских работ.

Главный редактор сборника «Известия Тульского государственного университета»

Прейс В.В., д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой.

Члены редакционного совета:

Батанина И.А., д-р полит. наук, проф., –

отв. редактор серии «Гуманитарные науки»;

Берестнев М.А., канд. юрид. наук, доц., –

отв. редактор серии «Экономические и юридические науки». Часть 2. «Юридические науки»;

Борискин О.И., д-р техн. наук, проф., –

отв. редактор серии «Технические науки»;

Егоров В.Н., канд. пед. наук, доц., – отв. редактор

серии «Физическая культура. Спорт»;

Заславская О.В., д-р пед. наук, проф., –

отв. редактор серии «Педагогика»;

Качурин Н.М., д-р техн. наук, проф., –

отв. редактор серии «Науки о Земле»;

Понаморева О.Н., д-р хим. наук, доц., –

отв. редактор серии «Естественные науки»;

Сабина А.Л., д-р экон. наук, доц., –

отв. редактор серии «Экономические и юридические науки». Часть 1. «Экономические науки».

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Ответственный редактор

Борискин О.И., д-р техн. наук (ТулГУ, г. Тула);

Заместитель ответственного редактора

Ларин С.Н., д-р техн. наук (ТулГУ, г. Тула);

Ответственный секретарь

Яковлев Б.С., канд. техн. наук (ТулГУ, г. Тула).

Члены редакционной коллегии:

Александров А.Ю., д-р техн. наук (Ковровская государственная технологическая академия им. В.А. Дегтярева, г. Ковров);

Баласанян Б.С., д-р техн. наук (Государственный инженерный университет Армении, г. Ереван, Армения);

Васин С.А., д-р техн. наук (ТулГУ, г. Тула);

Дмитриев А.М., д-р техн. наук (Московский государственный технический университет «СТАНКИН», г. Москва);

Запомель Я., д-р техн. наук (Технический университет Остравы, г. Острава, Чехия);

Ковалев Р.А., д-р техн. наук (ТулГУ, г. Тула);

Колтунович Т.Н., д-р техн. наук (Люблинский технологический университет, г. Люблин, Польша);

Кристалл М.Г., д-р техн. наук (Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград);

Ларкин Е.В., д-р техн. наук (ТулГУ, г. Тула)

Мельников В.Е., д-р техн. наук (Национальный исследовательский университет «МАИ», г. Москва);

Мецераков В.Н., д-р техн. наук (Липецкий государственный технический университет, г. Липецк);

Мозжечков В.А., д-р техн. наук

(АО «Тулаэлектропривод», г. Тула);

Распопов В.Я., д-р техн. наук (ТулГУ, г. Тула);

Савин Л.А., д-р техн. наук (Орловский государственный технический университет, г. Орел);

Семилет В.В., д-р техн. наук (АО Конструкторское бюро приборостроения, г. Тула);

Сорокин П.А., д-р техн. наук (Российский университет транспорта «МИИТ», г. Москва);

Степанов В.М., д-р техн. наук (ТулГУ, г. Тула);

Сычуглов А.А., канд. техн. наук (ТулГУ, г. Тула);

Чуков А.Н., д-р техн. наук (ТулГУ, г. Тула);

Яцун С.Ф., д-р техн. наук (Юго-западный государственный университет, г. Курск)

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

Подписной индекс сборника 27851 по Объединённому каталогу «Пресса России».

Сборник включен в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы научные результаты диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук, на соискание учёной степени доктора наук», утвержденный ВАК Минобрнауки РФ.

ТЕХНОЛОГИИ И МАШИНЫ ОБРАБОТКИ ДАВЛЕНИЕМ

УДК 621.983; 539.374

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АНИЗОТРОПИИ МАТЕРИАЛА НА ПОВРЕЖДАЕМОСТЬ МАТЕРИАЛА ПРИ ВЫТЯЖКЕ С ФЛАНЦЕМ ЧЕРЕЗ РАДИАЛЬНУЮ МАТРИЦУ

М.В. Грязев, С.Н. Ларин, А.Н. Исаева

Используя разработанную ранее математическую модель процесса вытяжки без утонения стенки анизотропного упрочняющегося материала с прижимом через радиальную матрицу установлено влияние анизотропии механических свойств на предельные возможности формоизменения.

Ключевые слова: вытяжка с фланцем, матрица, деформирование, напряжения, деформации, повреждаемость.

В данной статье представлена на рассмотрение первая вытяжка с прижимом фланца через матрицу с радиальной формой рабочей кромки с радиусом r_M листового материала, характеризующегося анизотропными свойствами с деформацией $\psi = 1 - m_d$, где m_d - коэффициент вытяжки; $m_d = d_1 / D_0$; $d_1 = 2r_1$ - диаметральный размер детали по нейтральному слою; $D_0 = 2R_0$ - диаметр заготовки. В качестве допущений принимаем, что материал несжимаем, трансверсально анизотропен, изотропно-упрочняется. Для описания поведения материала актуально условие текучести Мизеса-Хилла и ассоциированный закон течения [1-4]. При расчетах считаем, что первая операция вытяжки происходит в условиях плоского напряженного состояния. Для наших условий деформирования принимается справедливость реализации закона трения Кулона на границах заготовки и инструмента.

При моделировании данного процесса пользуемся способом, основанном на параллельном решении приближенных дифференциальных уравнений равновесия и условий текучести, который, учитывает сопряжения на контактных границах и изменение течения материала [1-9]. Перед

расчетом очаг деформации делим на несколько участков. На рис. 1 даны схемы для анализа исследуемой операции, для оценки начальной стадии вытяжки и стадии при которой происходит совпадение центра закругления пуансона с верхней кромкой матрицы ($z > s_0$, z - зазора между инструментами на сторону).

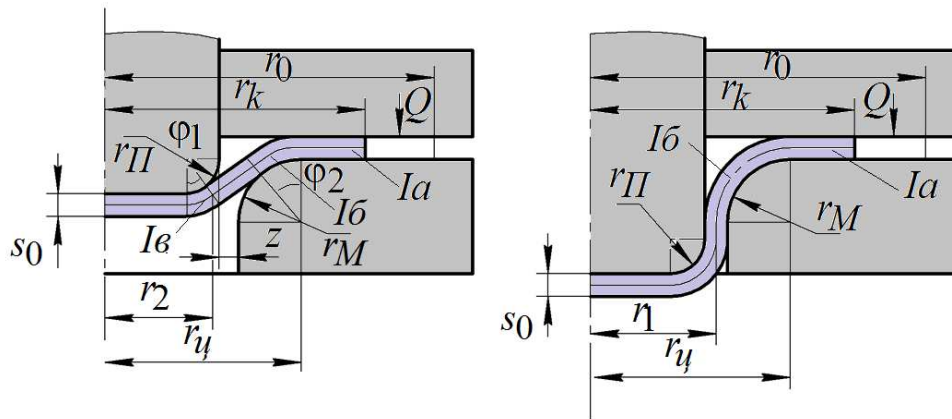


Рис. 1. Схема к оценке первого и второго этапов вытяжки с фланцем

Изменение толщины заготовки при вытяжке осесимметричных деталей оценивалось по соотношению [1]

$$\ln \frac{s}{s_0} = - \int_{r_{n-1}}^r \frac{\sigma_r + \sigma_\theta}{\sigma_r R - \sigma_\theta (1 + R)} \frac{dr}{r}. \quad (1)$$

Положение внешнего края R_k в процессе деформации вычисляется из условия постоянства площади поверхности заготовки в зависимости от перемещения пуансона h_{II} .

Следует отметить, что при $\varphi = \pi/2$ конусообразный участок бесконтактной деформации (участок I в) исчезает (рис. 1).

Сила операции в этот момент деформирования находится по формуле [1]

$$P = \pi d_1 s_0 \sigma_{r \text{ вых}}, \quad (2)$$

в которой величина меридионального напряжения на выходе из очага деформации $\sigma_{r \text{ вых}}$ оценивается так [1]

$$\sigma_{r \text{ вых}} = \sigma_r \Big|_{\varphi = \pi/2} + \sigma_s \Big|_{\varphi = \pi/2} \frac{s}{4r_{MC}}, \quad (3)$$

где $\sigma_{r \text{ вых}} \Big|_{\varphi = \pi/2}$ - напряжения в меридиональном направлении на поверхности матрицы тороидальной формы, при значениях $\varphi = \pi/2$;

$\sigma_s \Big|_{\varphi = \pi/2}$ - сопротивление материала пластическому деформированию при $\varphi = \pi/2$; d_1 - диаметр детали по нейтральному слою.

Выражения (1)-(3) разрешат нам выявить критические режимы процесса. Критические режимы вытяжки лимитируются максимальной величиной осевого напряжения $\sigma_{r\text{вых}}$ в стенке изделия на выходе из очага деформации, которая не должна быть больше сопротивления металла формоизменению [1]

$$\sigma_{r\text{вых}} \leq \sigma_s, \quad (4)$$

допустимой степенью использования ресурса пластичности и критерием локальной потери устойчивости листовой заготовки.

Оценку изменения толщины изделия при вытяжке производили по выражению [1]

$$\ln \frac{s}{s_0} = - \int_{r_{n-1}}^r \frac{\sigma_r + \sigma_\theta}{\sigma_r R - \sigma_\theta (1 + R)} \frac{dr}{r}, \quad (5)$$

где $\sigma_{r\text{вых}} = \sigma_r \Big|_{\varphi = \pi/2} + \sigma_s \Big|_{\varphi = \pi/2} \frac{s}{4r_{MC}}$, $\sigma_{r\text{вых}} \Big|_{\varphi = \pi/2}$ - напряжения в меридиональном направлении на поверхности инструмента тороидальной поверхности формы, определенные при $\varphi = \pi/2$; $\sigma_s \Big|_{\varphi = \pi/2}$ - сопротивление металла формоизменению при $\varphi = \pi/2$; d_1 - диаметр детали по нейтральному слою.

Внешние диаметральные размеры R_k при вытяжке находятся из условия неизменности площади поверхности заготовки в зависимости от пуансона h_{II} .

Критические режимы исследуемой операции вытяжки определялись за все время деформирования и вычислялись посредством расчетов по полученным неравенствам.

Было выявлено влияние механических свойств материала изделия на критические режимы вытяжки. На рис. 2 - 4 показаны зависимости к оценке влияния коэффициента анизотропии R на критические коэффициенты вытяжки m_{dnp} при постоянных значениях относительного радиуса закругления поверхности матрицы $\bar{r}_M$. Все вычисления производились для представленных параметров кривой упрочнения: материала 1 - $\sigma_{0,2} = 268,7$ МПа; $B = 1,226$; $n = 0,477$; $\Omega = 1,792$; $U = -0,945$; материала 2 - $\sigma_{0,2} = 29,1$ МПа; $B = 2,369$; $n = 0,439$; $\Omega = 1,359$; $U = -1,23$; материал 3 - $\sigma_{0,2} = 214,89$ МПа; $B = 5,197$; $n = 0,574$; $\Omega = 2,37$; $U = -0,768$.

Рабочие размеры изделия, заготовки, пуансона и матрицы выбирались: $s_0 = 1,5 \text{ мм}$; $R_0 = 36,4 \text{ мм}$; $R_M = 20 \text{ мм}$; $\bar{r}_M = 3$; $\mu = 0,05$; $q = 1 \text{ МПа}$.

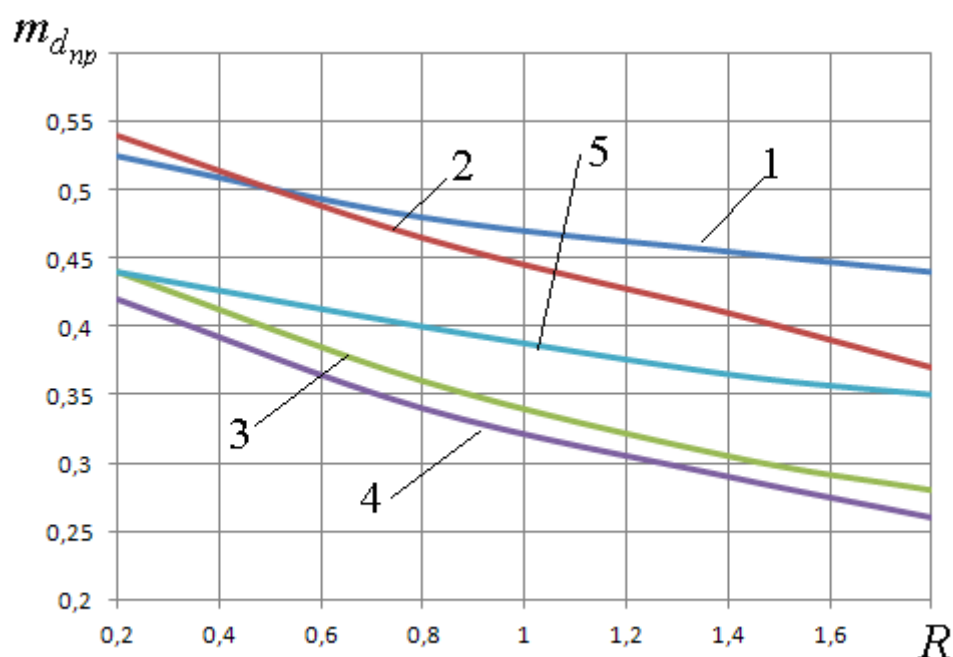


Рис. 2. К оценке влияния коэффициента R на критические коэффициенты вытяжки m_{dnp} для материала 1

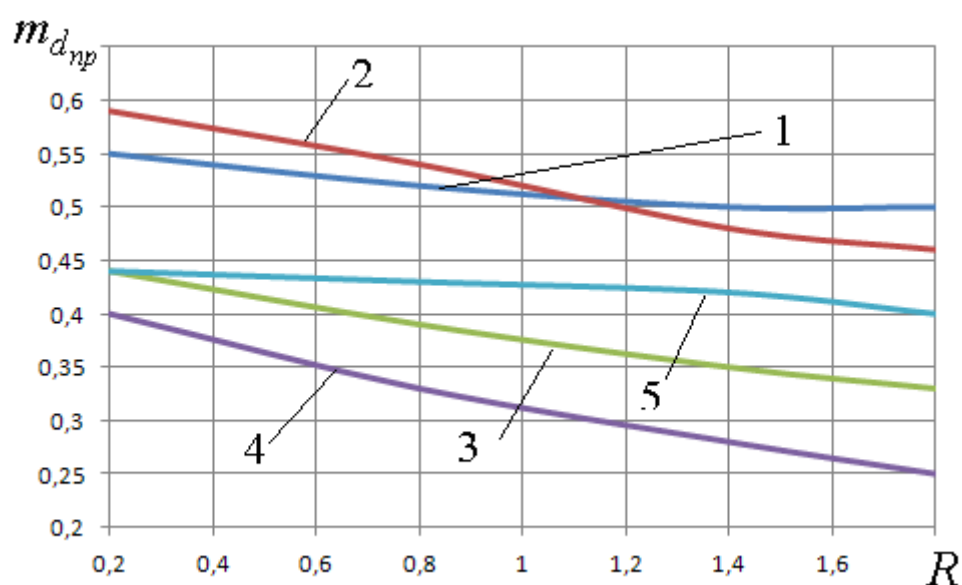


Рис. 3. К оценке влияния коэффициента R на критические коэффициенты вытяжки m_{dnp} для материала 2

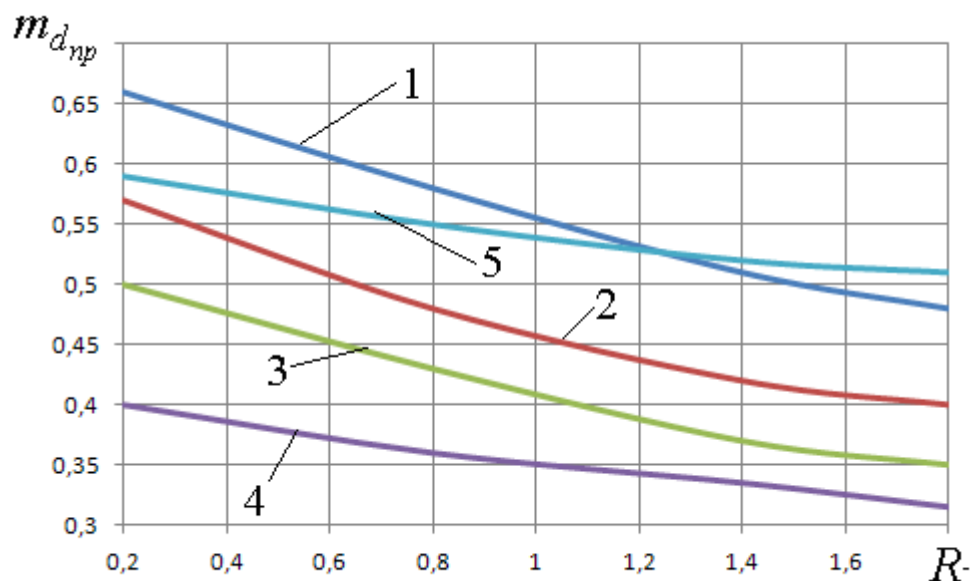


Рис. 4. К оценке влияния коэффициента R на критические коэффициенты вытяжки m_{dnp} для материала 3

Выполнив анализ полученных зависимостей нами было выявлено, что с увеличением коэффициента R и относительного радиуса закругления матрицы $\bar{r}_M$ значения критического коэффициента вытяжки m_{dnp} падают. Выявлено, что рост коэффициента R с 0,25 до 2 ведет в конечном итоге к падению значений критического коэффициента вытяжки m_{dnp} в 1,4 раза.

Работа выполнена в рамках грантов РФФИ № 16-48-710014 и гранта администрации Тульской области.

Список литературы

1. Грязев М.В., Ларин С.Н. К разработке математической модели процесса вытяжки упрочняющегося материала с прижимом через радиальную матрицу // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2018. Вып. 2. С. 172 – 178.
2. Сторожев М.В., Попов Е.А. Теория обработки металлов давлением. М.: Машиностроение, 1977. 423 с.
3. Яковлев С.П., Яковлев С.С., Андрейченко В.А. Обработка давлением анизотропных материалов. Кишинев: Квант, 1997. 331 с.
4. Нечепуренко Ю.Г., Яковлев С.П., Яковлев С.С. Глубокая вытяжка цилиндрических изделий из анизотропного материала. Тула: ТулГУ, 2000. 195 с.

5. Попов Е.А. Основы теории листовой штамповки. М.: Машиностроение, 1977. 278 с.

Грязев Михаил Васильевич, д-р техн. наук, проф., ректор, 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,

Исаева Анна Николаевна, асп., mpf-tula@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF ANISOTROPY OF MATERIAL
ON DAMAGE TO MATERIAL
WITH FLANGE THROUGH A RADIAL MATRIX

M.V. Gryazev, S.N. Larin, A.N. Iaseva

Using the previously developed mathematical model of the drawing process without thinning the walls of an anisotropic reinforcing material with a clamp through a radial matrix, the effect of the anisotropy of mechanical properties on the limiting possibilities of deformation is established.

Key words: hood with flange, matrix, deformation, stress, deformation, damageability.

Gryazev Michail Vasilievich, doctor of technical sciences, professor, rector, mpf-tula@rambler.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Larin Sergey Nikolaevich, doctor of technical sciences, professor, mpf-tula@rambler.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Isaeva Anna Nikolaevna, postgraduate, mpf-tula@rambler.ru, Russia, Tula, Tula State University

МОДЕЛЬ ИЗОТЕРМИЧЕСКОГО СВОБОДНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

С.Н. Ларин, В.И. Платонов

Получены выражения, позволяющие получить подход к моделированию формообразования изделия квадратной формы при реализации условий кратковременной ползучести. Полученные уравнения могут способствовать осуществлению теоретической оценки исследуемой операции.

Ключевые слова: пневмоформовка, напряжения, деформации, кратковременная ползучесть, квадратная матрица.

Рассмотрим формоизменение листа толщиной h_0 в матрице квадратной формы со сторонами размером $2a$ с реализацией режима кратковременной ползучести под давлением p , которое изменяется от времени t в следующем виде: $p = p_0 + a_p t^{n_p}$, где a_p и n_p - параметры закона нагружения. Материал проявляет анизотропные свойства. Заготовка вырезалась так, что одна сторона ее совпадает с направлением оси y (перпендикулярно направлению прокатки x) [1-10]. Заготовка закреплена по внешнему контуру. При моделировании предполагаем, что напряженное состояние заготовки плоское ($\sigma_z = 0$). Изделие при формоизменении приобретает профиль в виде сферы. При деформировании считаем, что вдоль осей симметрии профиль представляет собой окружность.

Рассмотрим эти же вопросы применительно к группе материалов, подчиняющихся кинетическим уравнениям ползучести и повреждаемости.

Теперь необходимо определить значение накопленной в ходе формообразования повреждаемости ω_{ec}^c в полюсе оболочки. Для чего требуется осуществить подстановку величины σ_e из первого уравнения состояния во второе. После чего получим

$$\dot{\omega}_{ec}^c = \frac{k}{B} \xi_e^c; \quad k = B / \varepsilon_{enp}^c. \quad (1)$$

Следующим этапом необходимо определить нагружение изделия, когда в его полюсе $\xi_{ec}^c = \xi_{ec1}^c = const$. В этом случае проинтегрировав уравнения (1) при начальных условиях $t = 0$, $\omega_{ec}^c = 0$, получим

$$\omega_{ec}^c = \frac{k}{B} \xi_{ec1}^c t = \frac{k \varepsilon_{ec}^c}{B}. \quad (2)$$

Критические деформации в заготовке формируются при $\omega_{ec}^c = 1$, откуда следует, что

$$\varepsilon_{ecnp}^c = \frac{B}{k}. \quad (3)$$

Давление p при котором создаются условия для успешного формоизменения, найдем по соотношению

$$p = \frac{2\sigma_{e0} (1 - \omega_{ec}^c)^{m/n} H h_0 a^2 (1 + \chi_1)}{D_1 (H^2 + a^2)^3} \left(\frac{\xi_{ec1}^c}{B} \right)^{1/n}. \quad (4)$$

Зависимость $\omega_{ec}^c = \omega_e^c(t)$ определяется соотношением (1), а функция $H = H(t)$ может быть найдена из выражения

$$\varepsilon_{ec}^c = \int_0^t \xi_{ec}^c dt = \xi_{ec1}^c t, \quad (5)$$

а также следующим образом:

$$\varepsilon_{ec}^c = \int_0^t C_1 \xi_{yc}^c dt = \int_0^H C_1 \frac{2H dH}{H^2 + a^2}, \quad (6)$$

т.е.

$$t = \frac{C_1}{\xi_{ec1}^c} \ln \frac{a^2}{H^2 + a^2}. \quad (7)$$

Рассмотрим нагружение листовой заготовки, когда $p = const$.

Подставив в уравнение (1) выражения $\xi_{ec}^c = C_1 \xi_{yc}^c = C_1 \frac{2H\dot{H}}{H^2 + a^2}$ и соотношения $\xi_{xc}^c = \xi_{yc}^c = \frac{2H\dot{H}}{H^2 + a^2}$; $\xi_{zc}^c = \frac{\dot{h}}{h}$, получим с учетом (3)

$$\dot{\omega}_{ec}^c = \frac{k}{B} C_1 \frac{2H\dot{H}}{H^2 + a^2} = \frac{2C_1 H \dot{H}}{(H^2 + a^2) \varepsilon_{ecnp}^c}. \quad (8)$$

Проинтегрировав это уравнение при начальных условиях $t = 0$, $\omega_{ec}^c = 0$, имеем

$$\omega_{ec}^c = \frac{1}{\xi_{ec1}^c} \ln \frac{a^2}{H^2 + a^2}. \quad (9)$$

Предельно возможную высоту в полюсе изделия H_* найдем из уравнения (9) при $\omega_{ec}^c = 1$.

Рассмотрим напряженное и деформированное состояния в точке $x = a$, $y = 0$.

Величины σ_{ea} и ξ_{ea}^c для этой точки определяются из соотношений $\sigma_{ea} = \bar{D}_{1a} \sigma_{xa}$, и $\xi_{ea}^c = \bar{C}_{1a} \xi_{xa}^c$. Повреждаемость находится из уравнения

$$\dot{\omega}_{ea}^c = \frac{\xi_{ea}^c}{\varepsilon_{ea \text{ пр}}}. \quad (10)$$

В случае нагружения листовой заготовки, когда $\xi_{ea}^c = \xi_{ea1}^c = \text{const}$,

$$\omega_{ea}^c = \frac{\xi_{ea1}^c t}{\varepsilon_{ea \text{ пр}}}. \quad (11)$$

Критические значения деформаций в заготовке достигаются при $\omega_{ea}^c = 1$.

Давление при котором реализуются условия для окончательного формоизменения получим при подстановке в первое уравнение состояния выражений σ_{ea} и $\xi_{ea}^c = \xi_{ea1}^c$. Получим

$$p(t) = \frac{2\sigma_{e0}(1-\omega_{ea}^c)^{m/n} h_0 a^2 H}{(H^2 + a^2)^2} \left(\frac{\xi_{ea1}^c}{B} \right)^{1/n}. \quad (12)$$

Функциональная связь $H = H(t)$ находится из условия

$$\varepsilon_{ea}^c = \int \xi_{ea1}^c dt = \xi_{ea1}^c t = \int \bar{C}_{1a} \xi_{xa}^c dt. \quad (13)$$

Следовательно,

$$t = \frac{\bar{C}_{1a}}{\xi_{ea1}^c} \int_0^H \frac{2H dH}{H^2 + a^2} = \frac{\bar{C}_{1a}}{\xi_{ea1}^c} \ln \frac{H^2 + a^2}{a^2}. \quad (14)$$

Если нагружение осуществляется при условии $p = \text{const}$, то накопление повреждаемости описывается уравнением

$$\dot{\omega}_{ea}^c = \frac{\xi_{ea}^c}{\varepsilon_{ea \text{ пр}}^c} = \frac{\bar{C}_{1a} \xi_{xa}^c}{\varepsilon_{ea \text{ пр}}^c} = \frac{\bar{C}_{1a}}{\varepsilon_{ea \text{ пр}}^c} \frac{2H\dot{H}}{(H^2 + a^2)}. \quad (15)$$

Интегрирование этого уравнения при начальных условиях $t = 0$, $\omega_{ea}^c = 0$ приводит к соотношению

$$\omega_{ea}^c = \frac{\bar{C}_{1a}}{\varepsilon_{ea \text{ пр}}^c} \ln \frac{H^2 + a^2}{a^2}. \quad (16)$$

Величина H_* вычисляется из условия $\omega_{ea}^c = 1$.

Безразмерное время разрушения $\bar{t}_*$ определяется выражением

$$\bar{t}_* = \int_0^{H_*} \frac{(1 - \omega_{ea}^c)^m H^{n+1} a^{2n} h_0^n dH}{(H^2 + a^2)^{2n+1}}, \quad (17)$$

где

$$\bar{t}_* = \frac{p^n \bar{D}_{1a}^n B}{\bar{C}_{1a} \sigma_{ea}^n 2^{n+1}} t_*. \quad (18)$$

Условия деформирования в точке $x = 0$, $y = a$ аналогичны этим условиям в точке $y = 0$, $x = a$.

Полученное решение для определения энергосиловых параметров при изотермическом формообразовании плоской заготовки из материала, характеризующегося анизотропией можно считать справедливым и материала без анизотропии. Для чего считаем, что $R_x = R_y = 1$.

Работа выполнена в рамках грантов РФФИ № № 16-48-710016 и 16-08-00020 и гранта администрации тульской области.

Список литературы

1. Ларин С.Н. Пневмоформовка ячеистых панелей из анизотропного материала // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2010. Вып. 3. С 51-61.
2. Яковлев С.С., Ларин С.Н., Трегубов В.И. Изотермическая пневмоформовка элементов ячеистых многослойных листовых конструкций из анизотропных высокопрочных материалов в режиме ползучести / под ред. С.С. Яковлева. Тула: Изд-во ТулГУ, 2011. 173 с.
3. Малинин Н.Н. Ползучесть в обработке металлов. М.: Машиностроение, 1986. 216 с.
4. Ершов В.И., Глазков В.И., Каширин М.Ф. Совершенствование формоизменяющих операций листовой штамповки. М.: Машиностроение, 1990. 311 с.
5. Изотермическая пневмоформовка анизотропных высокопрочных листовых материалов / С.Н. Ларин [и др.] / под ред. С.С. Яковлева. М.: Машиностроение, 2009. 352 с.
6. Изотермическое деформирование высокопрочных анизотропных металлов / С.П. Яковлев, В.Н. Чудин, С.С. Яковлев, Я.А. Соболев. М.: Машиностроение, Изд-во ТулГУ, 2004. 427 с.
7. Изотермическое деформирование металлов / С.З. Фиглин, В.В. Бойцов, Ю.Г. Калпин, Ю.И. Каплин. М.: Машиностроение, 1978. 239 с.
8. Огородников В.А. Оценка деформируемости металлов при обработке давлением. Киев: Вища школа, 1983. 175 с.

9. Поздеев А.А., Тарновский В.И., Еремеев В.И. Применение теории ползучести при обработке металлов давлением. М.: Металлургия, 1973. 192 с.

10. Третьяков А.В., Зюзин В.И. Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением. М.: Металлургия, 1973. 224 с.

Ларин Сергей Николаевич, д-р техн. наук, проф., 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

**MODEL OF ISOTHERMIC FREE DEFORMATION
OF TITANIUM ALLOYS**

S.N. Larin, V.I. Platonov

Expressions have been obtained that allow one to obtain an approach to modeling the shape-formation of a square-shaped product in the release of short-term creep-and-honor conditions. The equations obtained can facilitate the implementation of a theoretical evaluation of the operation under investigation.

Key words: pneumoforming, stresses, deformations, short-time creep, square matrix.

Larin Sergey Nikolaevich, doctor of technical sciences, professor, mpf-tula@rambler.ru, Russia, Moscow, Tula, Tula State University

Platonov Valeriy Ivanovich, candidate of technical sciences, docent, mpf-tula@rambler.ru, Russia, Tula, Tula State University

СИЛОВЫЕ РЕЖИМЫ И ПРЕДЕЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ТРЕХСЛОЙНЫХ КОНСТРУКЦИЙ С КАНАЛАМИ ТРАПЕЦИЕВИДНОЙ ФОРМЫ В РЕЖИМЕ КРАТКОВРЕМЕННОЙ ПОЛЗУЧЕСТИ

С.Н. Ларин, Г.А. Нуждин, В.И. Трегубов

Рассмотрен процесс деформирования трапецевидного канала в трехслойной конструкции, которое осуществляется под воздействием давления газа. Получены выражения, позволяющие оценить силу процесса и повреждаемость материала заготовки для случаев вязкого и вязкопластического течения материала.

Ключевые слова: формоизменение, трёхслойные листовые конструкции, каналы трапецевидной формы, вязкое течение, деформации, сила.

Деформирование трапецевидного канала в трехслойной конструкции осуществляется под воздействием давления газа, которое меняется в соответствии с законом $p = p_0 + a_p t^{n_p}$, где p_0, a_p, n_p - константы нагружения (рисунок). Ассоциированный закон течения справедлив при кратковременной ползучести. Материал деформируемого изделия считаем ортотропным с главными осями анизотропии x, y, z . Считаем, что при формоизменении, в случае, когда реализуется вязкое течение материал изотропно упрочняется в зависимости от скорости деформации, а при одновременном вязком и пластическом течениях течения материала от степени и скорости деформации. При моделировании считаем, что деформированное состояние – плоское, так как длина формуемого элемента много больше его остальных размеров на плоскости штамповки. А так как деформированное состояние плоское, то учитываем что скорость деформации в направлении оси анизотропии $\xi_x = 0$.

Напряжения в процессе деформирования равномерно распределены по телу формуемой конструкции. Напряжение в направлении оси z , которая перпендикулярно толщине заготовки $\sigma_z = 0$, т.е. считаем, что напряженное состояние - плоское.

В случае, когда $\sigma_e > \sigma_{e0}$ имеет место вязкопластическое течение материала, уравнение состояния которого по энергетической теории кратковременной ползучести и разрушения имеет вид

$$\sigma_e = \sigma_{e0} \left(\frac{\varepsilon_e^{cp}}{\varepsilon_{e0}^{cp}} \right)^d \left(\frac{\xi_e^{cp}}{\xi_{e0}^{cp}} \right)^k \left(1 - \omega_A^{cp} \right)^r; \quad \dot{\omega}_A^{cp} = \frac{\sigma_e \xi_e^{cp}}{A_{np}^{cp}},$$

а по кинетической теории кратковременной ползучести и разрушения

$$\sigma_e = \sigma_{e0} \left(\frac{\varepsilon_e^{cp}}{\varepsilon_{e0}^{cp}} \right)^d \left(\frac{\xi_e^{cp}}{\xi_{e0}^{cp}} \right)^k (1 - \omega_e^{cp})^r; \quad \dot{\omega}_e^{cp} = \frac{\xi_e^{cp}}{\varepsilon_{enp}^{cp}}.$$

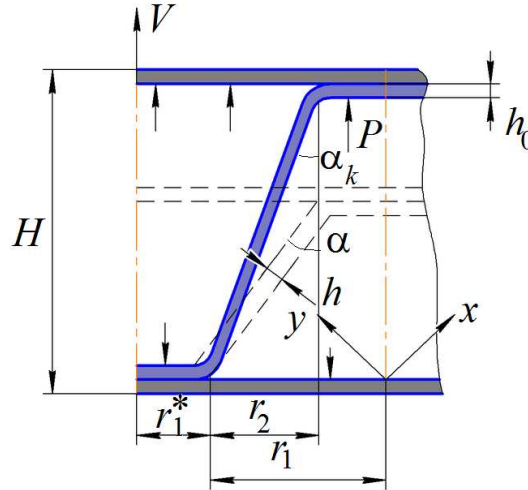


Схема пневмоформовки элемента конструкции трапецевидной формы

Допустим, что формоизменение оболочки определяется давлением $p(t)$. Подставим в первое из уравнений состояния материала, входящие

величины σ_e, ξ_e^{cp} и $\varepsilon_e^{cp} = \int_0^t \xi_e^{cp} dt$ получим для случая штамповки трапе-

цевидного элемента трехслойной листовой конструкции

$$p^{1/k} dt = - \frac{\sigma_{e0}^{1/k} [-C_1 \ln(\sin \alpha)]^{d/k} C_1 \operatorname{ctg} \alpha h_0^{1/k}}{(\varepsilon_{e0})^{d/k} \xi_{e0} D_1^{1/k} (r_1 + r_2)^{1/k}} \times \\ \times (\sin \alpha \cos \alpha)^{1/k} (1 - \omega_A^{cp})^{r/k} d\alpha \quad (1)$$

и для случая калибровки

$$p^{1/k} dt = - \frac{\sigma_{e0}^{1/k} \left[-C_1 \ln \left(\frac{\sin \alpha}{\sin \alpha_0} \right) \right]^{d/k} C_1 \operatorname{ctg} \alpha h_0^{1/k}}{(\varepsilon_{e0})^{d/k} \xi_{e0} D_1^{1/k} (r_1 + r_2)^{1/k} (\sin \alpha_0)^{1/k}} \times \\ \times (\sin \alpha \cos \alpha)^{1/k} (1 - \omega_A^{cp})^{r/k} d\alpha. \quad (2)$$

Из соотношения $\dot{\omega}_A^{cp} = \frac{\sigma_e \xi_e^{cp}}{A_{np}^{cp}}$ может быть определена величина

повреждаемости следующим образом

при штамповке

$$\frac{d\omega_A^{cp}}{dt} = -\frac{C_1 D_1 (r_1 + r_2) p \operatorname{tg} \alpha}{A_{np}^{cp} h_0 \sin^2 \alpha} \frac{d\alpha}{dt}, \quad (3)$$

при калибровке

$$\frac{d\omega_A^{cp}}{dt} = -\frac{C_1 D_1 (r_1 + r_2) p \sin \alpha_0}{A_{np}^{cp} h_0 \sin^2 \alpha} \frac{d\alpha}{dt}. \quad (4)$$

Решение системы уравнений (1) и (3) или (2) и (4) определяет значения p и ω_A^{cp} , а также величину времени разрушения заготовки t_* , когда $\omega_A^{cp} = 1$.

Рассмотрим случай, когда скорость деформации постоянна $\xi_e^{cp} = \xi_{e1}^{cp}$.

В этом случае выражение для нахождения давления p может быть записано следующим образом

для штамповки

$$p = \frac{\sigma_{e0} [-C_1 \ln(\sin \alpha)]^d h_0 \sin \alpha \cos \alpha \left(1 - \omega_A^{cp}\right)^r \left(\frac{\xi_{e1}}{\xi_{e0}}\right)^k}{(\varepsilon_{e0})^d D_1 (r_1 + r_2)}, \quad (5)$$

для калибровки

$$p = \frac{\sigma_{e0} \left[-C_1 \ln\left(\frac{\sin \alpha}{\sin \alpha_0}\right)\right]^d h_0 \sin \alpha \cos \alpha \left(1 - \omega_A^{cp}\right)^r \left(\frac{\xi_{e1}}{\xi_{e0}}\right)^k}{(\varepsilon_{e0})^d D_1 (r_1 + r_2) \sin \alpha_0}. \quad (6)$$

Повреждаемость оценивается так

при штамповке

$$\omega_A^{cp} = -\frac{C_1 D_1 (r_1 + r_2)}{A_{np}^{cp} h_0} \int_{\frac{\pi}{2}}^{\alpha} \frac{p d\alpha}{\pi \sin^2 \alpha}, \quad (7)$$

при калибровке

$$\omega_A^{cp} = -\frac{C_1 D_1 (r_1 + r_2) \sin \alpha_0}{A_{np}^{cp} h_0} \int_{\alpha_0}^{\alpha} \frac{p d\alpha}{\sin^2 \alpha}. \quad (8)$$

Методом итераций решается система уравнений (5) и (7) или (6) и (8) и определяется $p = p(\alpha)$ и $\omega_A^{cp} = \omega_A^{cp}(\alpha)$.

Зависимость α от времени находится из следующих условий для случая штамповки

$$\alpha = \arcsin e^{-\frac{\xi_{e1}t}{C_1}}; \quad (9)$$

для случая калибровки

$$\alpha = \arcsin \left[\sin(\alpha_0) e^{-\frac{\xi_{e1}t}{C_1}} \right]. \quad (10)$$

Рассмотрим формоизменение трапецевидного элемента многослойной листовой конструкции постоянной величиной давления $p = const$.

Повреждаемость в этом случае будет определяться при штамповке

$$\omega_A^{cp} = \frac{C_1 D_1 (r_1 + r_2) p}{A_{np}^{cp} h_0} \operatorname{ctg} \alpha. \quad (11)$$

при калибровке

$$\omega_A^{cp} = \frac{C_1 D_1 (r_1 + r_2) \sin \alpha_0 p}{A_{np}^{cp} h_0} (\operatorname{ctg} \alpha_0 - \operatorname{ctg} \alpha). \quad (12)$$

В выражениях (11) и (12) принято, что $A_{np}^{cp} \left(\frac{\sigma_e^{cp}}{\sigma_e}, \frac{\xi_e^{cp}}{\xi_{e0}} \right) = const$,

$$\left(\frac{\sigma_e^{cp}}{\sigma_e} \right) = const, \quad \xi_e^{cp} = \xi_{e \min}^{cp} = \xi_{e0}^{cp}.$$

Из выражений (11) и (12) при $\omega_A^{cp} = 1$ определяется угол раствора дуги средней линии в момент разрушения α_* при штамповке и калибровке следующим образом соответственно

$$\alpha_* = \operatorname{arcctg} \left[\frac{A_{np}^{cp} h_0}{C_1 D_1 (r_1 + r_2) p} \right] \quad (13)$$

и

$$\alpha_* = \operatorname{arcctg} \left[-\frac{A_{np}^{cp} h_0}{C_1 D_1 (r_1 + r_2) \sin \alpha_0 p} + \operatorname{ctg} \alpha_0 \right]. \quad (14)$$

При штамповке трапецевидных элементов величина безразмерного времени разрушения может быть определена по формуле

$$\bar{t}_* = - \int_{\frac{\pi}{2}}^{\alpha_*} \left(1 - \omega_A^{cp} \right)^{r/k} (\sin \alpha)^{1/k} (\cos \alpha)^{1/k} \operatorname{ctg} \alpha [-\ln(\sin \alpha)]^{d/k} d\alpha, \quad (15)$$

где

$$\bar{t}_* = \frac{p^{1/k} \varepsilon_{e0}^{d/k} \xi_{e0}^{cp} D_1^{1/k} (r_1 + r_2)^{1/k}}{\sigma_{e0}^{1/k} C_1^{\frac{d+k}{k}} h_0^{1/k}} t_* ;$$

при калибровке по выражению

$$\bar{t}_* = - \int_{\alpha_0}^{\alpha_*} \left(1 - \omega_A^{cp} \right)^{r/k} (\sin \alpha)^{1/k} (\cos \alpha)^{1/k} \operatorname{ctg} \alpha \left[- \ln \left(\frac{\sin \alpha}{\sin \alpha_0} \right) \right]^{d/k} d\alpha, \quad (16)$$

где

$$\bar{t}_* = \frac{p^{1/k} (\varepsilon_{e0})^{d/k} \xi_{e0}^{cp} D_1^{1/k} (r_1 + r_2)^{1/k} (\sin \alpha_0)^{1/k}}{(\sigma_{e0})^{1/k} C_1^{\frac{d+k}{k}} h_0^{1/k}} t_*.$$

Если материал подчиняется кинетической теории вязкопластического течения и разрушения, то повреждаемость находится из уравнения

$$\dot{\omega}_e^{cp} = \frac{\xi_e^{cp}}{\varepsilon_{enp}^{cp}}$$

при штамповке

$$\omega_e^{cp} = - \frac{C_1}{\varepsilon_{enp}^{cp}} \int_{\frac{\pi}{2}}^{\alpha} \operatorname{ctg} \alpha d\alpha = - \frac{C_1}{\varepsilon_{enp}^{cp}} \ln(\sin \alpha), \quad (17)$$

при калибровке

$$\omega_e^{cp} = - \frac{C_1}{\varepsilon_{enp}^{cp}} \int_{\alpha_0}^{\alpha} \operatorname{ctg} \alpha d\alpha = - \frac{C_1}{\varepsilon_{enp}^{cp}} \ln \left(\frac{\sin \alpha}{\sin \alpha_0} \right). \quad (18)$$

Здесь принято, что $\varepsilon_{enp}^{cp} = \text{const}$, т.к. $\left(\frac{\sigma^{cp}}{\sigma_e} \right) = \text{const}$ и $\frac{\xi_e^{cp}}{\xi_{e0}} = \frac{\xi_{emin}^{cp}}{\xi_{e0}} = 1$.

Предельный угол α_* вычисляется из условия, что $\omega_e^{cp} = 1$, следующим образом

$$\alpha_* = \arcsin e^{-\frac{\varepsilon_{np}^{cp}}{C_1}} \quad (19)$$

и

$$\alpha_* = \arcsin \left[\sin \alpha_0 e^{-\frac{\varepsilon_{np}^{cp}}{C_1}} \right]. \quad (20)$$

Выражение (19) соответствует процессу пневмоформовки, а (20) - калибровки элементов трапецевидной формы для многослойных конструкций. Оценка данных формул позволяет установить, что критические режимы пневмоформовки не меняются в зависимости от времени деформирования.

Из формул (1) или (2) можно определить закон изменения давления $p(t)$, если туда вставить значение ω_e^{cp} , которое найдём по зависимостям (17) или (18) для штамповки или калибровки.

Когда $\xi_e^{cp} = \xi_{e1}^{cp}$ при пневмоформовке или калибровке значение давления $p(\alpha)$ найдем по формулам (5) или (6) учтя при этом выражения (17) или (18).

Изменение угла α от времени пневмоформовки, можно определить по формуле для штамповки

$$\alpha = \arcsin e^{-\frac{\xi_{e1}^{cp}}{C_1} t} \quad (21)$$

и для калибровки

$$\alpha = \arcsin \left[\sin \alpha_0 e^{-\frac{\xi_{e1}^{cp}}{C_1} t} \right]. \quad (22)$$

При $p = const$ с учетом зависимостей (17) и (18) найдем значение повреждаемости, а безразмерное время деформирования $\bar{t}_*$ при котором происходит разрушение изделия найдем по выражениям (15) или (16) с заменой ω_A^{cp} на ω_e^{cp} .

Работа выполнена в рамках грантов РФФИ № 16-08-00020.

Список литературы

1. Малинин Н.Н. Ползучесть в обработке металлов. М.: Машиностроение, 1986. 216 с.
2. Larin S.N., Platonov V.I., Bessmertnyi A.V. Pneumatic shaping of materials with short-term creep // Russian Engineering Research, 2017. Vol. 37. I. 7. P. 589–592.
3. Изотермическая пневмоформовка анизотропных высокопрочных листовых материалов / С.Н. Ларин [и др.] / под ред. С.С. Яковлева. М.: Машиностроение, 2009. 352 с.
4. Ларин С.Н., Бессмертный А.В. Подход к анализу напряженно-деформированного состояния при формировании элементов многослойных листовых конструкций с прямоугольными каналами // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2017. Вып. 1. С. 246-250.

5. Изотермическое деформирование металлов / С.З. Фиглин, В.В. Бойцов, Ю.Г. Калпин, Ю.И. Каплин. М.: Машиностроение, 1978. 239 с.

6. Ларин С.Н., Бессмертный А.В., Кухарь В.Д. Математическая модель формоизменения трехслойных листовых конструкций из анизотропных материалов, подчиняющихся энергетической теории ползучести и повреждаемости // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2011. Вып. 2. С. 435-446.

7. Огородников В.А. Оценка деформируемости металлов при обработке давлением. Киев: Вища школа, 1983. 175 с.

Ларин Сергей Николаевич, д-р техн. наук, проф., mpf-tula@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Нуждин Георгий Анатоліевич, канд. техн. наук, mpf-tula@rambler.ru, Россия, Москва, Орган по сертификации систем качества «Консерсиум»,

Трегубов Виктор Иванович, д-р техн. наук, проф., mpf-tula@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет, АО «НПО» «СПЛАВ»

**POWER REGIMES AND LIMIT OPPORTUNITIES DEFORMATION
OF THREE-LAYER STRUCTURES WITH CHANNELS OF THE KEYSTONE
IN THE MODE OF SHORT-TERM CREEP**

S.N. Larin, G.A. Nuzhdin, V.I. Tregubov

The process of deformation of the trapezoidal channel in a three-layer structure, which is carried out under the influence of gas pressure, is considered. Expressions have been obtained that make it possible to estimate the strength of the process and the damageability of the billet material for cases of viscous and viscoplastic flow of material.

Key words: shape change, three-layer sheet constructions, trapezoidal channels, viscous flow, deformations, force.

Larin Sergey Nikolaevich, doctor of technical sciences, professor, mpf-tula@rambler.ru, Russia, Moscow, Tula, Tula State University,

Nuzhdin Georgiy Anatolievich, candidate of technical sciences, mpf-tula@rambler.ru, Russia, Moscow, organ by quality system certification «Konsersium»,

Tregubov Victor Ivanovich, doctor of technical sciences, professor, mpf-tula@rambler.ru, Russia, Tula, Tula state university, NPO «SPLAV»

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ МНОГООПЕРАЦИОННОЙ ВЫТЯЖКЕ С ЛОКАЛЬНЫМ ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ

С.С. Яковлев, О.М. Герасимова

Предложена методика определения силовых параметров при многооперационной вытяжке с утонением через матрицы, имеющие клиновые выступы по периметру рабочего пояса, позволяющие получить интенсивную пластическую деформацию со значительными сдвиговыми деформациями и мелкозернистую структуру готовой детали. Определялись силовые параметры по уточнённой методике расчётным путём и компьютерным моделированием с использованием программного комплекса QForm.

Ключевые слова: вытяжка с утонением, интенсификация пластических деформаций, ИПД при вытяжке, цилиндрические оболочки, очаг деформации, мелкозернистая структура, корончатость, сдвиговые деформации, сила вытяжки, математическое моделирование, клиновые выступы, поправочный коэффициент.

В машиностроении для получения тонкостенных цилиндрических оболочек с толстым дном широкое применение находит многооперационная вытяжка с утонением. Для повышения качества таких оболочек возможно применение многооперационной вытяжки с локальным пластическим деформированием. При расчете силовых параметров вытяжки с локальным пластическим деформированием (ЛПД) на первой операции предлагается методика, приведённая в [1,2]. На основе этой методики рассмотрим силовые параметры вытяжки с ЛПД на второй (и последующих операциях).

На рис. 1 показано поперечное сечение полуфабриката, полученного после первой операции, наружная поверхность которого имеет клиновидные выступы.

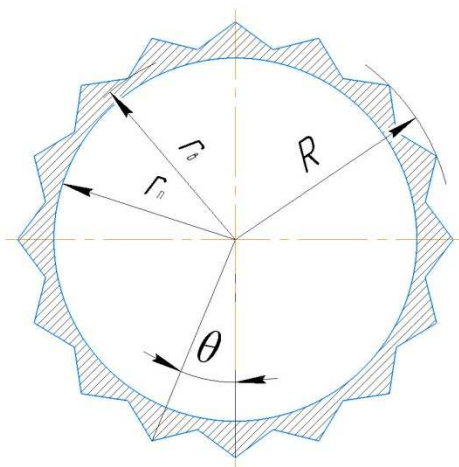


Рис. 1. Схема поперечного сечения полуфабриката

На рис. 2 приведено положение полуфабриката перед второй операцией вытяжки в такой же матрице, что и на первой операции. Полуфабрикат в матрице ориентирован своими клиновыми выступами по клиновым выступам рабочего пояса матрицы и контактирует с рабочими выступами по участкам трапецевидальной формы площадью F_m .

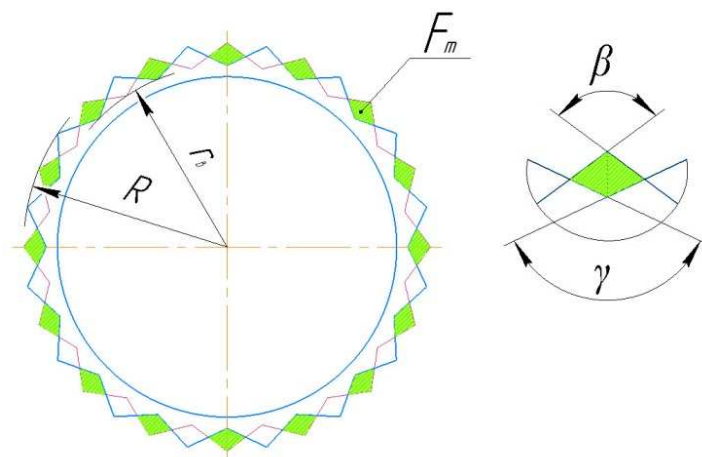


Рис. 2. К оценке положения полуфабриката перед второй операцией вытяжки

В результате чего, после вытяжки поперечное сечение полуфабриката будет иметь вид, показанный на рис. 3. Наружная поверхность полуфабриката будет иметь удвоенное количество клиновых выступов.

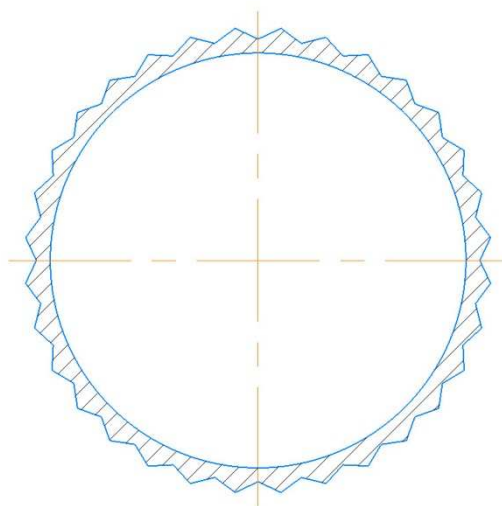


Рис. 3. К оценке положения полуфабриката после вытяжки

В процессе вытяжки с локальным утонением стенки и образованием на наружной поверхности полуфабриката клиновых выступов возникают дополнительные сдвиговые деформации, что приводит к изменению схемы деформированного состояния с плоского на объёмное. Это обстоятельство оказывает влияние на расчёт силовых параметров процесса.

Для определения силовых параметров на первой операции при формоизменении стенки заготовки необходимо знать площади поперечных сечений полуфабриката после первой F_1 и второй F_2 вытяжки[2].

Площадь поперечного сечения F_1 полуфабриката после первой операции определяется по зависимости:

$$F_1 = \pi(R^2 - r_n^2) - RN \left\{ \sin \frac{\pi}{N} \left[R - r_{\epsilon} - R \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{\pi}{N} \right)^2} \right) \right] + R \left(\frac{\pi}{N} - \sin \frac{\pi}{N} \sqrt{1 - \left(\frac{\pi}{N} \right)^2} \right) \right\} \quad (1)$$

где N – число выступов матрицы.

$$P_1 = k_1 F_1 a_1 c_1,$$

Для определения силы на второй операции вытяжки в момент формоизменения стенки полуфабриката определяют площади поперечного сечения полуфабриката после второй вытяжки F_2 . В этом случае необходимо из площади полуфабриката первой вытяжки F_1 вычесть площади локальных участков F_m (рис. 2) контакта выступов второй матрицы с выступами наружной поверхности полуфабриката первой вытяжки

$$F_2 = F_1 - F_m,$$

где

$$F_m = (R - r_{\epsilon})^2 \frac{\sin \frac{\beta}{2} \times \sin \frac{\gamma}{2}}{\sin \left(\pi - \frac{\beta}{2} - \frac{\gamma}{2} \right)} N. \quad (2)$$

Сила на второй операции вытяжки при формоизменении стенки полуфабриката

$$P_2 = k_2 F_2 a_2 c_2, \quad (3)$$

где a_2 – удельная работа деформации; c_2 – составляющая, учитывающая влияние трения по пуансону и матрице;

$$c_2 = 1 + \mu_m (1 - r_2) (1 + ctg \alpha) + 0,75 r_2 \mu_n ctg \alpha,$$

где μ_m и μ_n – соответственно коэффициенты трения по матрице и пуансону, α – угол конусности матрицы;

$$\begin{aligned} r_2 &= 1 - \frac{F_2}{F_1}; \\ a_2 &= A(\epsilon_2)^{1+n}; \\ A &= \frac{\sigma_{\epsilon}}{1+n} \left(\frac{2,718}{n} \right)^n; \\ n &= \ln \left(1 + \frac{2\delta_{10} - \delta_5}{100} \right), \end{aligned}$$

где σ_{ϵ} – предел прочности материала заготовки; n – показатель степени; δ_{10} и δ_5 – относительные удлинения соответственно десятикратного и пятикратного образца;

$$\varepsilon_2 = \frac{2}{\sqrt{3}} \left[\ln \frac{F_1}{F_2} \right].$$

На заключительной операции вытяжку проводят в матрице с цилиндрическим рабочим пояском, в результате чего происходит сглаживание наружной рифлёной поверхности полуфабриката.

Сила вытяжки в этом случае определяется по зависимости:

$$P_3 = k_3 F_3 a_3 c_3, \quad (4)$$

где a_3 и c_3 – определяются аналогично предыдущим операциям; $F_3 = \pi(r_g^2 - r_n^2)$.

Были проведены расчеты по данным зависимостям для материала заготовки – Сталь 10, предел прочности – 372 МПа, предел текучести – 205 МПа, относительное удлинение $\delta = 34\%$. Использовалась заготовка - колпачок с наружным диаметром 36 мм и толщиной стенки 3 мм. На первой операции вытяжку с утонением осуществляли через матрицу, имеющую 16 выступов клиновидной формы (на рабочем пояске), высотой 2 мм. После вытяжки получался полуфабрикат с рифлёной наружной поверхностью и корончатым краем. На второй операции вытяжки полуфабрикат подвергался формоизменению в этой же матрице, при этом он ориентировался рифлеными выступами по клиновым выступам рабочего пояска матрицы. На третьей операции полуфабрикат второй вытяжки формоизменялся в матрице с гладким рабочим пояском. В результате этого наружная поверхность детали стала гладкой. Таким образом, на всех трех операциях вытяжки осуществлялось локальное формоизменение заготовки.

В результате компьютерного моделирования в программном комплексе QForm были получены графики сила-перемещение (рис. 4), проведены расчеты по вышеприведённым зависимостям установлены значения поправочных коэффициентов k_i .

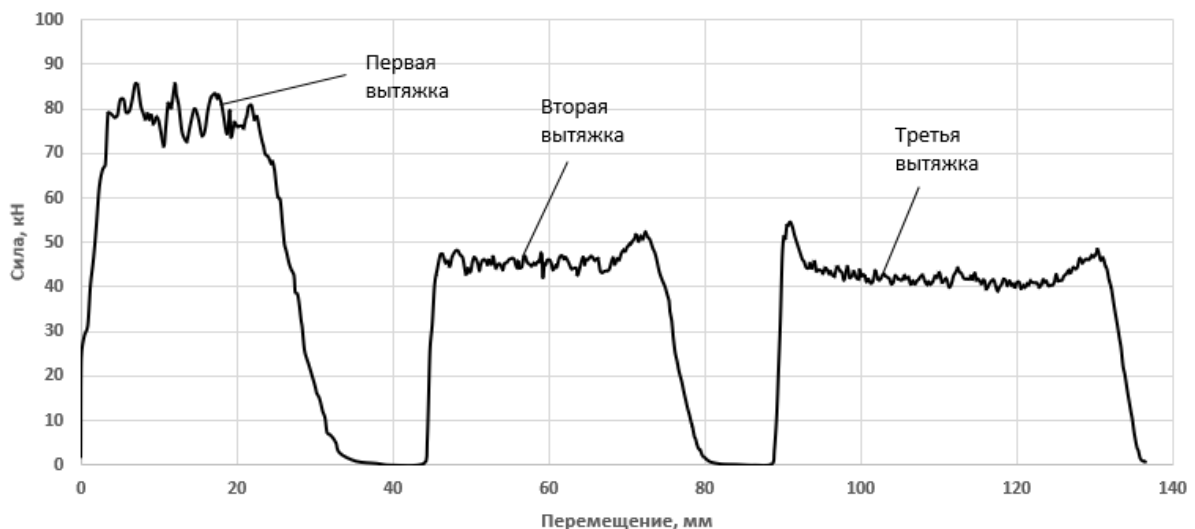


Рис. 4. Зависимость «сила-перемещение»

Для первой операции вытяжки:

$$F_0 = 311 \text{ мм}^2; F_1 = 192,12 \text{ мм}^2; \\ r_1 = 0,38; c_1 = 1,4; a_1 = 261.$$

Поправочный коэффициент

$$k_1 = 1,2; P_1 = 84,2 \text{ кН}.$$

Для второй операции:

$$F_1 = 192,12 \text{ мм}^2; F_2 = 139,30 \text{ мм}^2; \\ r_2 = 0,275; c_2 = 1,42; a_2 = 152,7.$$

Поправочный коэффициент

$$k_2 = 1,5; P_2 = 45,3 \text{ кН}.$$

Для третьей операции:

$$F_3 = 97,4 \text{ мм}^2; F_2 = 139,30 \text{ мм}^2; \\ r_3 = 0,3; c_3 = 1,415; a_3 = 174;$$

Поправочный коэффициент

$$k_3 = 1,8; P_3 = 43,1 \text{ кН}.$$

Расчёт силовых параметров с учётом влияния возникновения дополнительных сдвиговых деформаций при вытяжке в матрице с клиновидными выступами на рабочем пояске с использованием известной методики расчёта и результаты математического моделирования силовых параметров на всех трех операциях вытяжки с утонением и ИПД показали необходимость введения поправочных коэффициентов, которые учитывают возникновение дополнительных сдвиговых деформаций. Сдвиговые деформации возрастают при многооперационной вытяжке и увеличиваются значения поправочных коэффициентов.

Максимальная сила вытяжки имеет место на первой операции, т.к. формоизменение осуществляется при наибольшей степени деформации.

Методика позволяет рассчитать силы вытяжки при различных сочетаниях использования матриц с клиновыми на рабочей поверхности и с гладкой рабочей поверхностью.

Возникновение дополнительных сдвиговых деформаций позволяет создавать мелкозернистую структуру, повышая эксплуатационные характеристики готового изделия.

Список литературы

1. Ковка и штамповка: справочник: Листовая штамповка / под общ. ред. С.С. Яковлева; ред. совет: Е.И. Семёнов (пред.) и др. – 2-е изд., перераб. и доп. Т. 4. М.: Машиностроение, 2010. 732 с.

2. Яковлев С.С. Определение силовых параметров при вытяжке с утонением и интенсивной пластической деформацией // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2017. Вып. 11. С. 212 - 218.

Яковлев Сергей Сергеевич, студент, mpf-tula@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Герасимова Ольга Михайловна, канд. техн. наук, доц., mpf-tula@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

DETERMINATION OF POWER PARAMETERS FOR MANY OPERATING EXHAUST
WITH LOCAL PLASTIC DEFORMATION

S.S. Yakovlev, O.M. Gerasimova

The results of computer simulation of hoods with thinning, billets obtained by stretching with thinning through the matrix, in which the working belt has periodic wedge protrusions. The simulation was performed using the qform software package. The dependence of the degree of strain and stress intensity on the number of protrusions and valleys on the outer surface of a cylindrical billet is analyzed.

Key words: extract with thinning, qform, shear deformations, intensive plastic deformation, modeling, matrix with periodically changing working profile, number of protrusions or valleys, intensity of stresses and deformations, wedge shape of protrusions.

Yakovlev Sergey Sergeevich, student, mpf-tula@rambler.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Gerasimova Olga Mikhailovna, candidate of technical sciences, docent, mpf-tula@rambler.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 621.777

**ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ СИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ
ПРОЦЕССА СТЕСНЕННОГО ПРЯМОГО ВЫДАВЛИВАНИЯ**

П.В. Крутиков, К.О. Поцелуев, Д.М. Тесаков

В статье анализируется явление скачка силы деформирования при высоких степенях деформации заготовок из алюминиевого сплава АМг6 в ходе прямого холодного выдавливания. Приведены варианты устранения резкого увеличения силы деформирования, что в дальнейшем сможет позволить получать детали необходимой конфигурации.

Ключевые слова: алюминиевый сплав, тонкостенные детали, степень деформации, многофакторный эксперимент.

Актуальность расширения номенклатуры тонкостенных осесимметричных втулок, получаемых с выдавливанием с высокими степенями деформации, создает необходимость для углубленного изучения данных технологических процессов, в том числе и с помощью статистических методов при создании математических моделей, способных применяться в производстве для повышения производительности труда, а также достижения значительного экономического эффекта [6, 7].

В САПР SolidWorks была разработана модель универсальной штамповой оснастки (рис. 1), с использованием которой стало возможно проведение многофакторного эксперимента и анализа прямого выдавливания заготовок различной конфигурации в программном комплексе Qform, основанном на методе конечных элементов (МКЭ). Базовым материалом заготовки для исследования был выбран алюминиевый сплав АМгб, обладающий требуемыми физико-химическими характеристиками (рис. 2). Деформирование производилось при температуре 20°C, следовательно, нужно было учитывать как скорость хода рабочего инструмента, а следовательно скорость деформации заготовки, так и упрочнение материала при высоких деформациях. Кроме того, в эксперименте учитывалось взаимодействия составных частей оснастки между собой, был выбран режим трения между инструментами без смазочного состава, поэтому коэффициент трения Кулона составил при таких условиях 0.3. Наблюдался эффект движения верхней части корпуса штампа относительно нижней под действием деформирующих заготовку сил, но амплитуда перемещения была незначительной: 0.05...0.16 мм [1, 2].

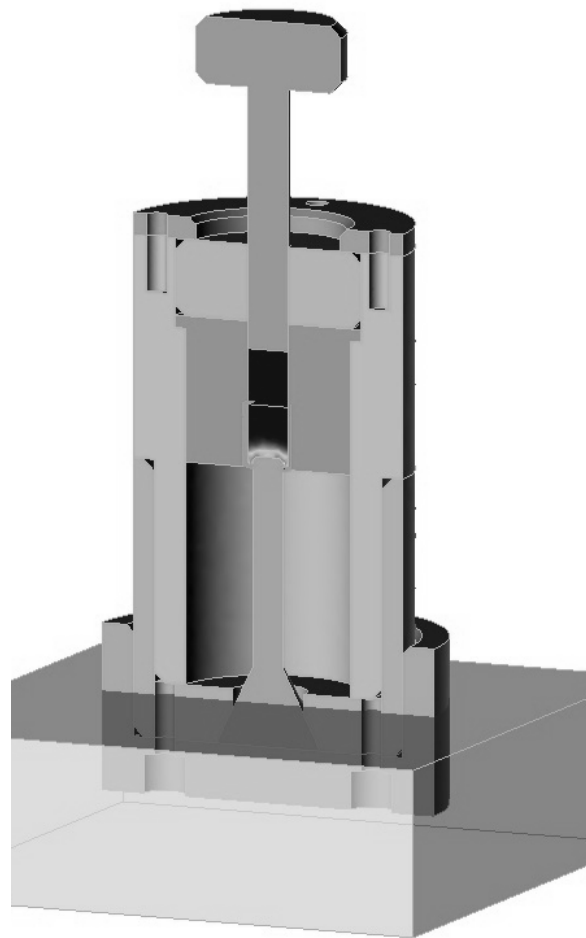


Рис. 1. Модель универсальной штамповой оснастки, конвертированная в среду Qform 3D

☒ Сопротивление деформации
 Табличная функция Редактировать

☒ Плотность
 Постоянная величина 2640 кг/м³

☒ Теплопроводность
 Постоянная величина 122 Вт/мК

☒ Теплоемкость
 Постоянная величина 922 Дж/кгК

☒ Температура плавления
 Постоянная величина 660 °C

☐ Модуль Юнга

☐ Коэфф. Пуассона

☐ Коэф. теплового расширения
 Постоянная величина 2.56558e-5 1/°C

☒ Химический состав

	Количество		
	мин	макс	=
Si		0.4	
Mn	0.5	0.8	
Mg	5.8	6.8	
Cu		0.1	
Ti	0.02	0.1	
Zn		0.2	
OE		0.05	
ET		0.1	

Сопротивление деформации [МПа]

		Скорость деформации, 1/с			
		0.01	1	10	100
Деформация	0.02	172	222	266	295
	0.2	184	238	279	310
	0.3	187	240	282	312
	0.4	185	239	280	309

Рис. 2. Параметры алюминиевого сплава АМг6, выбранного в качестве материала для заготовки в программном комплексе Qform 3D

При моделировании использовались заготовки с разными диаметрами: 8, 9,6, 11,2, 12,8, 14,4 мм. В качестве подвижного инструмента был выбран гидравлический пресс с номинальной силой 120 МН и регулируемой скоростью хода плунжера. В нашем случае, требуется так же изучение влияния скорости хода инструмента в различных диапазонах: от 5 до 15 мм/с. Высота заготовки бралась постоянной для всех диаметров и составляла 10 мм. Толщина стенки детали так же бралась постоянной и составляла 1 мм.

При использовании одной заготовки наблюдалось резкое повышение силы деформирования, когда толщина дна уменьшается до определенного предела. Причем, характер изменения силы деформирования был одинаков для всех начальных размеров заготовок (рис. 3).

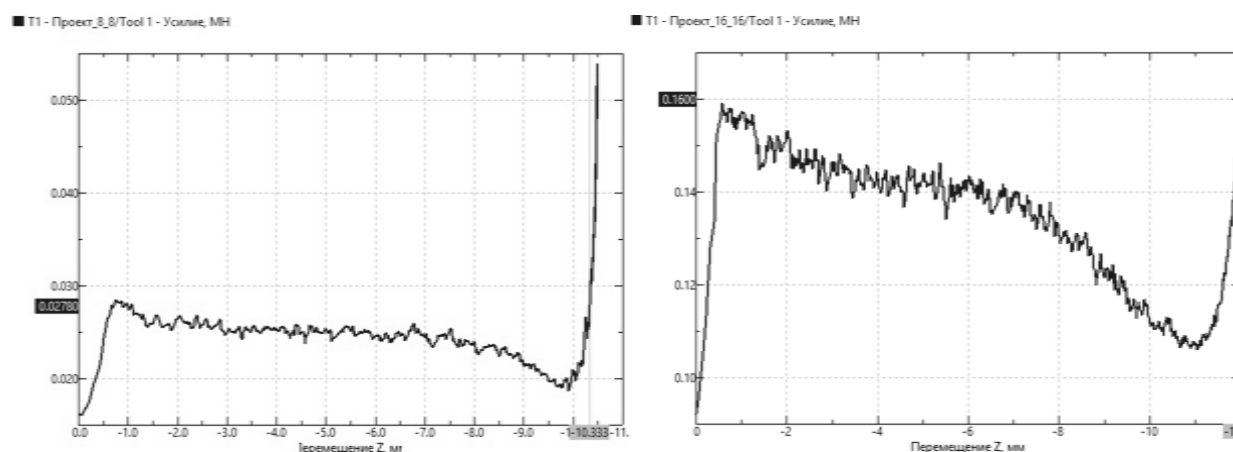


Рис. 3. Резкое возрастание силы деформирования при диаметрах заготовок 8 и 16 мм

Для создания математической модели операции именно на этом участке деформирования был использован метод многофакторного эксперимента. Определены основные факторы, влияющие на силовые параметры процесса. Коэффициент трения брался постоянным для всех опытов и составлял 0,15 по закону Кулона, за счет использования в качестве смазки минерального масла. Скорость деформирования так же являлась постоянной величиной и составляла 15 мм/с, но она присутствует в матрице планирования эксперимента, т.к. при дальнейшей доработке математической модели будут учитываться разные скорости деформирования (15, 5, 1 мм/с). Всего было проведено шесть опытов составлена матрица планирования эксперимента, включающая в себя 5 факторов (табл. 1) [3, 5].

При помощи программного комплекса Stata/MP 13.1 было получено уравнение регрессии, определены дисперсия и уровни значимости факторов, а так же адекватность модели и другие значимые параметры математической модели (рис. 4).

Таблица 1
Матрица планирования эксперимента с использованием одной заготовки

№ п/п	Относительный диаметр заготовки (8/8, 9,6/8, 11,2/8, 12,8/8, 14,4/8, 16/8)	Степень деформации (Отношение начальной площади поперечного сечения к конечной) (толщина стенки детали 1, 1,5, 2 мм)	Скорость деформирования (15, 5, 1 мм/с)	Относительная толщина дна детали (толщина дна/диаметр детали)	Относительная высота формирующего стенку пояса пуансона (отношение высоты пояса к внешнему диаметру детали)	Сила деформирования, $R_{\text{прямос кл}}$, МН
1	1	1,794286	15	0,025	0,15	0,028
2	1,2	2,10307	15	0,021	0,125	0,045
3	1,4	2,41349	15	0,018	0,107	0,071
4	1,6	2,724881	15	0,016	0,094	0,099
5	1,8	3,036896	15	0,014	0,083	0,127
6	2	3,349333	15	0,0125	0,075	0,157

```
. reg var12 var2 var3 var5 var8 var10, nocons
```

Source	SS	df	MS	Number of obs =	6
Model	.058425941	5	.011685188	F(5, 1) =	3815.58
Residual	3.0625e-06	1	3.0625e-06	Prob > F =	0.0123
Total	.058429003	6	.009738167	R-squared =	0.9999
				Adj R-squared =	0.9997
				Root MSE =	.00175

var12	Coef.	Std. Err.	t	P> t	[95% Conf. Interval]
var2	.1917187	.0202565	9.46	0.047	-.0656643 .4491017
var3	-3.468708	8.158412	-0.43	0.744	-107.1312 100.1937
var5	-.0190167	.0039906	-4.77	0.132	-.0697221 .0316888
var8	.0625509	19.24487	0.00	0.998	-244.4668 244.5919
var10	3.687456	9.494733	0.39	0.764	-116.9546 124.3295

Рис. 4. Данные по матрице планирования эксперимента (табл. 1), полученные в программном комплексе Stata/MP 13.1:

Total - общая дисперсия, характеризует отклонение точек корреляционного поля от его центра (от среднего уровня диаграммы рассеяния); **Model** - объясненная дисперсия, обусловлена отклонением точек выборочной линии регрессии от центра корреляционного поля; **Residual** – остаточная, дисперсия определяется разбросом точек корреляционного поля относительно линии регрессии; **df** – число степеней свободы (размерность вектора случайной величины); **Number of obj** – число наблюдений; **F** – статистика (критерий) Фишера (в скобках число степеней свободы, где первое число количество факторов в уравнении, второе – разность между числом наблюдений и количество факторов); **Prob, p-value** – величина, используемая при тестировании статистических гипотез

Из полученных результатов регрессионного анализа можно сделать вывод, что модель адекватна на 5% уровне варьирования факторов, а наиболее значимым является один фактор (Var2), характеризующий относительный диаметр заготовки [4, 9].

В ходе исследований были также смоделированы аналогичные процессы выдавливания, но уже и использованием одновременно двух заготовок. Установлено, что резкого скачка силы деформирования, как в предыдущем случае, при утонении дна заготовки не наблюдается во всем диапазоне варьируемых диаметров исходных заготовок (рис. 5).

Для данного случая так же была создана матрица планирования эксперимента (табл. 2) и найдены силовые параметры при одинаковой толщине стенки детали в момент скачка силы деформирования при использовании одной заготовки.

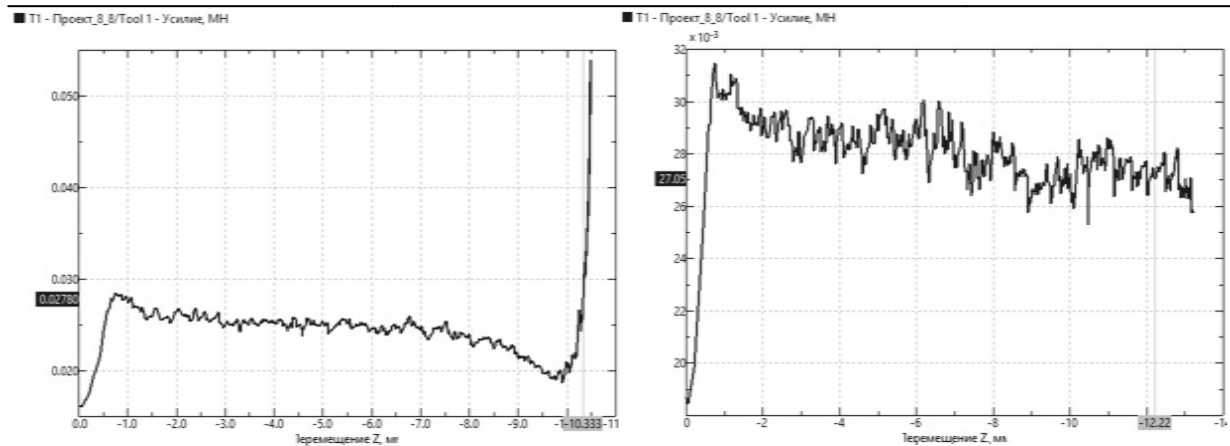


Рис. 5. Сравнение графических зависимостей «сила_ход инструмента» для способов выдавливания с использованием одной и двух заготовок при диаметре 8 мм

Таблица 2
Матрица планирования эксперимента в случае использования одновременно двух заготовок

№ п/п	Относительный диаметр заготовки (8/8, 9,6/8, 11,2/8, 12,8/8, 14,4/8, 16/8)	Степень деформации (Отношение толщины стенки детали к диаметру детали) (толщина стенки детали 1, 1,5, 2 мм), S_0/D_d	Скорость деформирования (15, 5, 1 мм/с)	Относительная толщина дна детали (толщина дна/диаметр детали)	Относительная высота формирующего стенку пояска пуансона (отношение высоты пояска к внешнему диаметру детали)	P1, МН	P2, МН
1	1	1,794286	15	0,025	0,15	0,028	0,025
2	1,2	2,10307	15	0,021	0,125	0,045	0,039
3	1,4	2,41349	15	0,018	0,107	0,071	0,061
4	1,6	2,724881	15	0,016	0,094	0,099	0,085
5	1,8	3,036896	15	0,014	0,083	0,127	0,114
6	2	3,349333	15	0,0125	0,075	0,157	0,147

Помимо снижения деформирующей силы в этот момент времени наблюдается иная картина поведения графика «сила_ход инструмента», что дает возможность получать детали с минимальной толщиной дна без ущерба стойкости инструмента. Ведется работа по созданию общей математической модели для двух процессов выдавливания.

Применение второго способа деформирования позволит не только расширить номенклатуру деталей из цветных металлов и сплавов, получаемых с помощью технологии холодного выдавливания, но и значительно повысить стойкость инструмента, что может дать существенный экономический эффект.

Список литературы

1. Официальный сайт САПР SolidWorks [Электронный ресурс] URL: www.solidworks.ru (дата обращения: 10.02.2018).
2. Борисов А., Ермаков Э., Долгополов А. SolidWorks 2010: быстро, качественно, удобно. [Электронный ресурс] URL: www.solidworks.ru (дата обращения: 10.02.2018).
3. Baum C. An Introduction to Modern Econometrics Using Stata. Stata Press, 2006. 206 p.
4. Колеников С. Прикладной эконометрический анализ в статистическом пакете Stata. КЛ/2001/003. РЭШ, 2001. Т. 2. С. 77-99.
5. Ковка и штамповка: справочник. Холодная объемная штамповка. Штамповка металлических порошков / под ред. А.М. Дмитриева – 2-е изд., перераб и доп./ под общ. ред. Е. И. Семенова. М.: Машиностроение, 2010. Т. 3. 352 с.
6. Овчинников А. Г. Основы теории штамповки выдавливанием на прессах. М.: Машиностроение, 1983. 200 с.
7. Джонсон У., Меллор П. Теория пластичности для инженеров; пер. с англ. А.Г. Овчинников. М.: Машиностроение, 1979. 567 с.
8. Евдокимов А.К. Штампы для холодного выдавливания длинноосных стаканов. КШП. М.: Машиностроение, 2008. № 11. С. 29 - 32.
9. Панфилов Г.В., Недошивин С.В., Шибаев М.Л. Статистические исследования точности заготовок сердечников пуль // Известия Тульского государственного университета. Механика деформируемого твердого тела и обработка металлов давлением. Тула: Изд-во ТулГУ, 2006. Вып. 2. С. 229 - 237.

Крутиков Петр Валерьевич, асп., mpf-tula@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Поцелуев Константин Олегович, студент, mpf-tula@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Тесаков Дмитрий Михайлович, магистрант, mpf-tula@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

FEATURES OF CHANGE OF POWER PARAMETERS OF THE PROCESS OF DIRECT EXTRUSION

P.V. Krutikov, K.O. Potceluev, D.M. Tesakov

The article analyzes the phenomenon of the jump of the deformation forces at high degrees of deformation of workpieces of aluminum alloy AMg6 in a direct cold extrusion. Given the options for addressing the sharp increase in deformation forces that in future will be able to afford to obtain details of the required configuration.

Key words: aluminum alloy, thin-walled parts, degree of deformation, multi-factor experiment.

Krutikov Pyotr Valeryevich, postgraduate, mpf-tula@rambler.ru, Russia, Tula, Tula state University,

Potceluev Konstantin Olegovich, student, mpf-tula@rambler.ru, Russia, Tula, Tula state University,

Dmitry Mikhailovich Tesakov, graduate, mpf-tula@rambler.ru, Russia, Tula, Tula state University

УДК 621.77

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЧАШКИ ДИФФЕРЕНЦИАЛА ГРУЗОВОГО АВТОМОБИЛЯ ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ

В.Ю. Лавриненко, Х.Ф. Фам

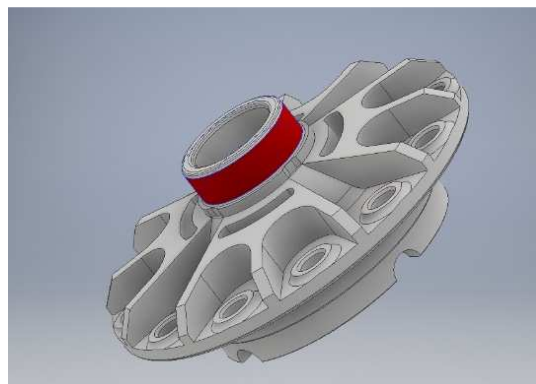
В статье приведен технологический процесс восстановления детали чашки дифференциала грузового автомобиля методом пластического деформирования дорнованием с использованием программного комплекса Qform VX.

Ключевые слова: восстановление пластическим деформированием, дорнование, чашка дифференциала, компьютерное моделирование, программный комплекс Qform VX.

Чашка дифференциала (рис. 1, 2) - корпусная деталь фланцевого типа, входящая в состав дифференциала заднего моста грузового автомобиля и выполняющая функции буфера, предотвращающие проскальзывание колес автомобиля при повороте. Для изготовления данных деталей широко используют серый чугун, модифицированный и ковкий чугуны, углеродистые стали.



а



б

**Рис. 1. Чашка дифференциала грузового автомобиля:
а – фотография детали; б – геометрическая модель детали**

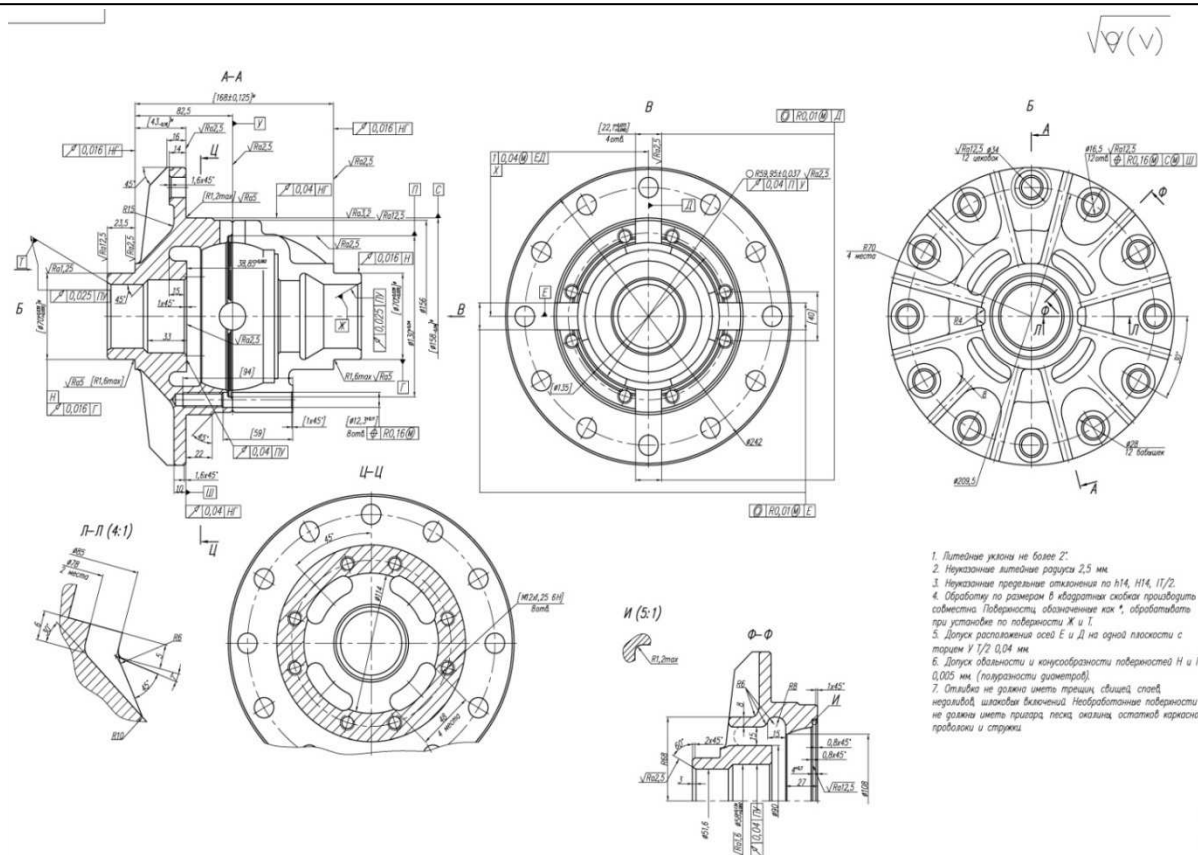


Рис. 2. Чертеж чашки дифференциала грузового автомобиля

При эксплуатации данной детали происходит изнашивание наружной цилиндрической поверхности (рис. 1) вследствие воздействия внутреннего кольца подшипника качения. Величина износа цилиндрической поверхности составляет до 0,4 мм.

В данной работе была разработана технология восстановления изношенной наружной цилиндрической поверхности чашки дифференциала грузового автомобиля из чугуна марки ВЧ60 (ГОСТ 7293-85) путем пластического деформирования при дорновании отверстия.

Механические свойства чугуна ВЧ60 приведены в табл. 1.

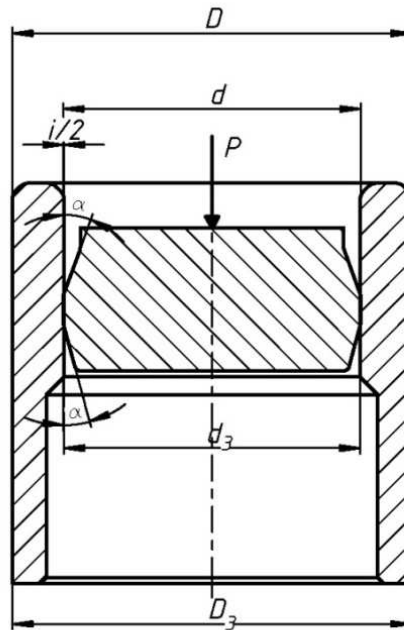
Таблица 1

Механические свойства чугуна ВЧ60

Предел прочности σ_B , МПа	Предел текучести σ_T , МПа	Относительное удлинение δ_5 , %
600	370	3

Согласно расчетных методик процессов дорнования внутренних отверстий [1, 2] был проведен предварительный теоретический расчет дорнования отверстия чашки дифференциала диаметром 51,6 мм для восстановления наружной цилиндрической поверхности.

На рис. 3 приведена расчетная схема процесса дорнования.



D – наружный диаметр после дорнования
 d – внутренний диаметр после дорнования
 D_3 – наружный диаметр до дорнования
 d_3 – внутренний диаметр до дорнования
 α – оптимальный угол дорна
 i – натяг

Рис. 3. Расчетная схема дорнования внутреннего отверстия

Исходные параметры:

Внутренний диаметр до дорнования $d_3 = 51,6$ мм ($=2r_1$);

Наружный диаметр до дорнования $D_3 = 69,8$ мм ($=2r_2$);

Наружный диаметр после дорнования $D = 70,05$ мм;

Внутренний диаметр после дорнования d (не известен);

E – модуль упругости ВЧ60 (180000 МПа);

σ_{l_0} – предел текучести ВЧ60 (370 МПа);

p – истинное сопротивление деформированию

$$p = \sigma_{l_0} + D_m \left(\frac{\delta r_1}{r_1} \right)_{\max},$$

где $\left(\frac{\delta r_1}{r_1} \right)_{\max}$ – максимальная относительная деформация; D_m – модуль упрочнения для ВЧ 60 (232,32 МПа).

Расчет деформации:

Давление на стенке:

$$S_0 = \frac{\frac{e}{2} \cdot \frac{\sigma_{l_0}}{E} \left(\frac{r_2^2}{r_1^2} - 1 \right) + \sigma_{l_0} \ln \frac{r_2}{r_1}}{1 + \frac{e}{E}}$$

где $e = \frac{4}{3} D_m$; $S_0 = 112,09$ МПа.

Радиальная деформация:

$$\frac{\delta r_1}{r_1} = \frac{\sigma_{l_0}}{E} \cdot \frac{r_2^2}{r_1^2} - \frac{2}{3} \cdot \frac{S_0}{E}; \quad \frac{\delta r_1}{r_1} = 0,00334 (0,334\%)$$

Расчет натяга и внутреннего диаметра:

Толщина стенки после дорнования:

$$S' = 0.5 \left\{ d_3 (m - 1) - i \left[1 - m \left(1 - \frac{\ln(m)}{2 - k_\sigma} \right)^3 \right] \right\}$$

где $m = \frac{r_2}{r_1}$; $k_\sigma = \varepsilon_0 \cdot E / \sigma_s \cdot \beta$ - коэффициент осевых напряжений; $d = d_3 + i$; $d_3 = 51,6$ мм; $\beta = 1.15$; $\varepsilon_0 = 0.00334$; $D = d + 2 \cdot S' = 70.05 > d_3 + i + 2S' = 70.05$ мм.

Отсюда: $i = 0,8$ мм, $d = 52.4$ мм и $S' = 8,85$ мм.

Расчет тягового усилия:

$$\left(\frac{\delta r_1}{r_1} \right)_{\max} = \frac{0,8}{51,6} = 0,0155; \quad D_m = 232,32 \text{ МПа}$$

Истинное сопротивление деформированию p :

$$p = \sigma_{l_0} + D_m \left(\frac{\delta r_1}{r_1} \right)_{\max}; \quad p = 370 + 232,32 \cdot 0,0155 = 373,6 \text{ МПа}$$

где $\mu = 0,2$ - коэффициент трения (смазка- керосин); $\alpha = 15^\circ$ (оптимальный угол дорна); $b = 0,45 d^{0.6} = 5$ мм.

Удельное давление K_1 :

$$K_1 = \frac{p \left(1 + \frac{\mu}{\operatorname{tg}(\alpha)} \right)}{1 - \mu \cdot \operatorname{tg} \alpha} \ln \left(1 + \frac{i}{d_1} \right) \quad (\text{МПа})$$

$$K_1 = \frac{373,6 \left(1 + \frac{0,2}{\operatorname{tg} 15^\circ} \right)}{1 - 0,2 \cdot \operatorname{tg} 15^\circ} \ln \left(1 + \frac{0,8}{51,6} \right) = 8,98$$

Напряжение, необходимое для преодоления сил трения, образующихся в зоне цилиндрической ленточки $b = 5$ мм (рис.4).

$$K_2 = \frac{2 p \mu}{d_3} b; \quad K_2 = \frac{2 \cdot 373,6 \cdot 0,2}{51,6} = 2,89 \text{ МПа.}$$

Дополнительная часть напряжения, идущая на дополнительные сдвиги:

$$K_{don} = 0,28p(2tg\alpha + \mu) \quad \text{МПа}$$

$$K_{don} = 0,28 \cdot 373,6(2tg15^\circ + 0,2) = 74,98$$

Площадь давления F:

$$F = \frac{\Pi(D_3^2 - d_3^2)}{4} = \frac{\Pi(69,8^2 - 51,6^2)}{4} = 1735,321 \text{ mm}^2$$

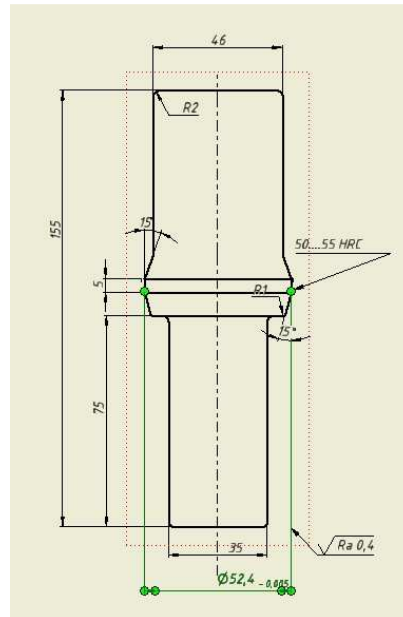


Рис. 4. Конструкция дорна

Тяговое усилие:

$$P = F (K_1 + K_2 + K_{don});$$

$$P = 1735,321 (8,98 + 2,89 + 74,98) = 150,701 \text{ кН}$$

Далее было проведено компьютерное моделирование предлагаемого технологического процесса дорнования внутреннего отверстия чашки дифференциала с использованием программного комплекса QForm VX.

На рис.5 показаны конечно-элементные модели инструмента (дорн и матрица) и заготовки (чашка дифференциала).

В результате проведенного моделирования было установлено, что минимальный диаметр наружной цилиндрической поверхности после дорнования составит 70,036 мм с припуском на последующее шлифование 0,03 мм (рис. 6), что соответствует данным теоретического расчета (70,05 мм).

Кроме того, был построен график зависимости силы дорнования от перемещения дорна (рис. 7). При этом наибольшая сила дорнования составила 140,5 кН при перемещении дорна 12,89 мм.

Теоретическая сила дорнования – 150, 701 кН.

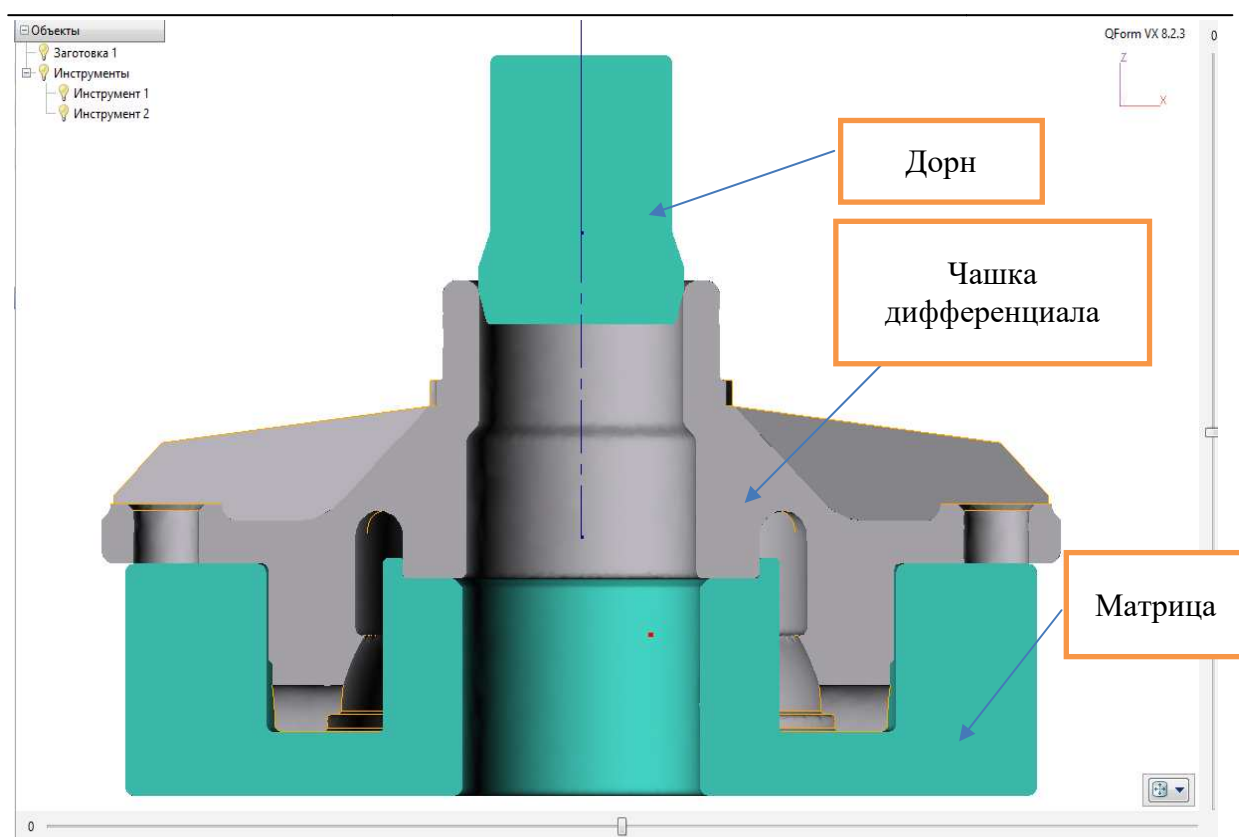


Рис. 5. Конечно-элементные модели инструмента и заготовки в программе QForm VX

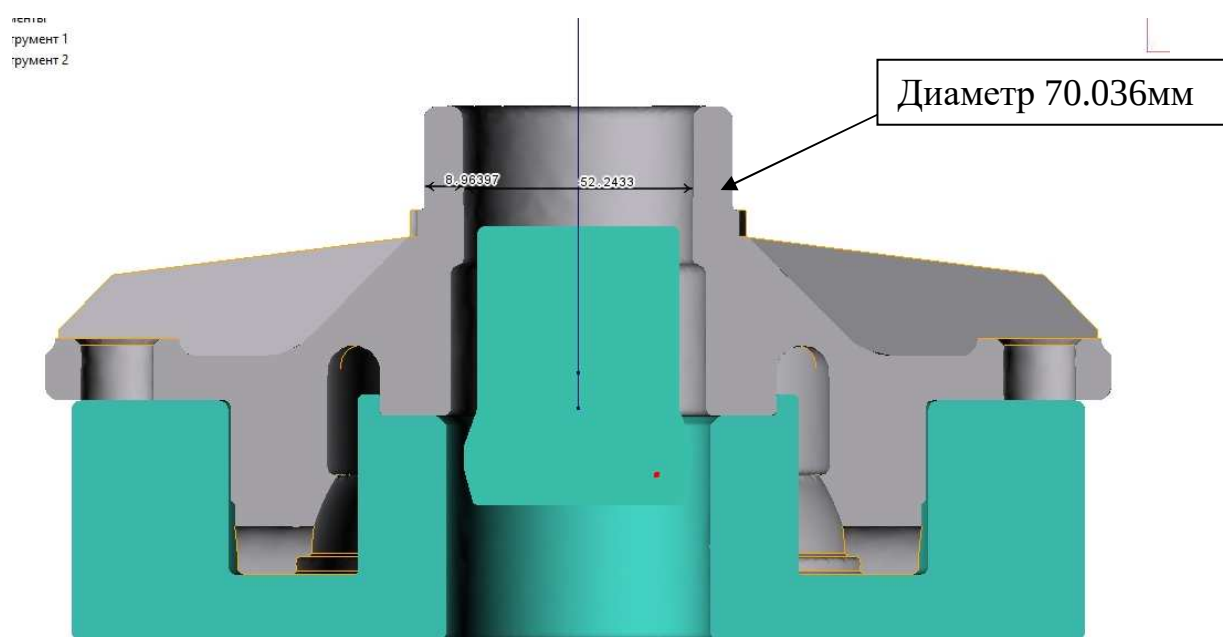


Рис. 6. Изменение внешнего диаметра чашки дифференциала после дорнования

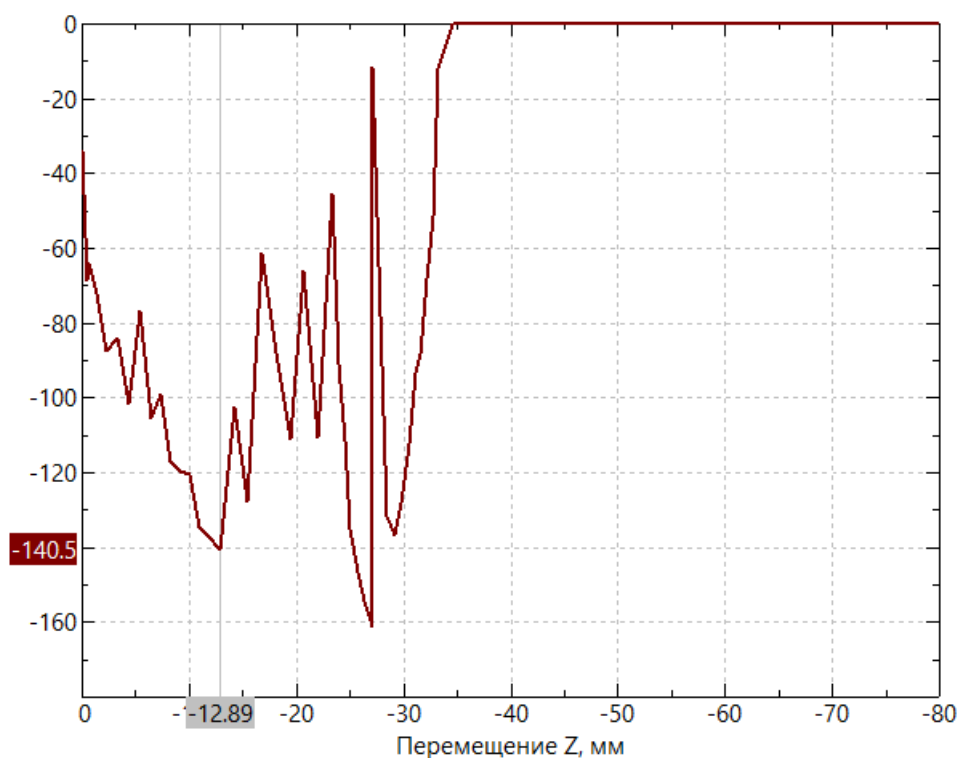


Рис. 7. График зависимости силы деформирования от перемещения дорна

Выводы:

1. В работе предложен технологический процесс восстановления чашки коробки дифференциала из чугуна ВЧ60 дорнованием.
2. Проведены теоретический расчет дорнования чашки дифференциал и определены размер дорна и силовые параметры процесса дорнования.
3. Проведенное компьютерное моделирование процесса дорнования детали в программе QForm VX подтвердило данные теоретического расчета.

При этом расхождение теоретического расчета и результатов компьютерного моделирования составило: по силе дорнования - 6,77%, по величине диаметра наружной цилиндрической поверхности после дорнования – менее 1%, по величине интенсивности пластической деформации – 2,9%.

Список литературы

1. Проскуряков Ю.Г. Дорнование отверстий. Свердловск: Машгиз, 1961. 192 с.

2. Воронцов А.Л. Теория и расчеты процессов обработки металлов давлением: учеб. пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. 848 с.

3. Официальный сайт QFORM [Электронный ресурс] URL: <http://www.qform3d.com/products/qform> (дата обращения: 10.04.2018).

Лавриненко Владислав Юрьевич, д-р техн. наук, проф., vlavrinenko@bmstu.ru, Россия, Москва, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,

Фам Хуи Фонг, студент, vlavrinenko@bmstu.ru, Россия, Москва, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

**DEVELOPMENT OF REBUILDING TECHNOLOGY OF CUP
OF DIFFERENTIAL GEAR TRUCKS BY PLASTIC DEFORMATION**

V.Y. Lavrinenko, H.P. Pham

Development of technology of rebuilding of cup of differential gear of trucks by plastic deformation by mandrel with Qform VX.

Key words: rebuilding by plastic deformation, mandrel, cup of differential gear of trucks, FEM simulation, Qform VX.

Lavrinenko Vladislav Yurievich, doctor of technical sciences, professor, vlavrinenko@bmstu.ru, Russia, Moscow, Moscow State Technical University N.E. Bauman,

Pham Houy Phong, student, vlavrinenko@bmstu.ru, Russia, Moscow, Moscow State Technical University N.E. Bauman

ВОЕННО-СПЕЦИАЛЬНЫЕ НАУКИ

УДК 623.98; 534.222

МЕТОДЫ РАСЧЕТНОЙ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ ПЕРВИЧНОГО ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО ПОЛЯ МОРСКОЙ ЦЕЛИ

В.А. Пятакович, А.М. Василенко

В статье представлен алгоритм приведения уровней подводного шума кораблей с расчетом максимальных дискретных составляющих. Рассмотрены методы оценки первичного гидроакустического поля, произведен итоговый анализ сопоставления результатов расчета по существующим методикам оценки первичного гидроакустического поля морской цели с экспериментальными данными. Описана вероятность первичного и накопленного процесса обнаружения цели и их зависимости.

Ключевые слова: морская цель; классификация морских объектов; первичное гидроакустическое поле; уровни дискретных составляющих; спектрограмма подводного шума.

Шумность корабля является его тактико-техническим элементом, характеризующим: скрытность от обнаружения гидроакустическими средствами обнаружения (ГАС); защищенность от оружия, снабженного акустическими системами управления; условия эффективной работы корабельных ГАС, классификации и целеуказания; условия обитаемости. В рамках статьи не представляется возможным охватить весь аспект проблемы. Поэтому авторы хотели бы оговорить, что они коснутся только 1/3 октавных составляющих подводного шума (ПШ) кораблей, т.е. первичного гидроакустического поля (ГАП), измеренного в стандартных условиях [1, 4, 5, 7]. Наиболее полной исходной характеристикой шумности надводных кораблей и подводных лодок, на основе которой может быть проведена объективная сравнительная оценка кораблей во всем диапазоне частот ГАП, являются спектрограммы подводного шума. Однако в некоторых случаях, особенно при оперативно-тактических расчетах, трудно использовать спектрограммы. В оценке боевой эффективности кораблей и расчетах дальности действия гидроакустических комплексов целесообразнее

использовать так называемые приведенные значения подводного шума. Для имитационного моделирования процесса распространения гидроакустических сигналов и расчета эффективности применения гидроакустических средств авторы предлагают разработанные ими программы [10, 18, 19].

Существующие специальные методики определения приведенных значений [1, 2], базируются на данных о конкретных корабельных гидроакустических комплексах стоящих на вооружении стран НАТО кораблей. Приведенными параметрами служат некоторые условные уровни шумности, пересчитанные к стандартным условиям по определенным правилам. За стандартные условия в нашей стране и в странах НАТО приняты – частота 1 кГц, полоса частот 1 Гц, расстояние от корабля 1м. Необходимость разработки специального способа приведения обусловлена следующими факторами: спектр подводного шума корабля занимает широкий интервал частот и спадает в звуковом диапазоне с интенсивностью 6 дБ/октаву; спектр содержит значительное количество дискретных составляющих в инфразвуковом и низком звуковом диапазоне частот; различными частотными диапазонами работы НСО и средств обнаружения; уровни подводного шума и вид спектра зависят от полосы анализа и расстояния при измерениях.

Методики определяют приведенные уровни шума исходя из максимальной дальности обнаружения гидроакустическими комплексами [1–4], по конкретным поддиапазонам их работы и с конкретными уровнями помех. Это наглядно видно из уравнения шумопеленгования для фиксированных частот

$$r_i 10^{0,05\beta_i r_i} \frac{1}{\sqrt{A(\beta_i r_i)}} = 1,42 \cdot 10^{-2} \sqrt{\frac{S_i \sqrt{T_i} P_u}{\gamma P_n}} f_i^{5/4} \quad (1)$$

где f_i – средняя частота -го частотного поддиапазона станции, кГц; r_i – дистанция обнаружения цели в поддиапазоне станции, км; S_i – площадь приемной антенны, m^2 ; T_i – время осреднения, с; γ – отношение сигнал/помеха; P_n – уровень помех станции на частоте f_i , дин/см²; β – коэффициент поглощения, дБ/км; $A(\beta_i r_i)$ – фактор аномалии распространения звука в море; P_u – уровень шума корабля-цели на частоте f_i , дин/см².

В (1) все величины, кроме P_u , зависят от возможностей гидроакустической станции или от закономерностей распространения акустической энергии в море.

Указанные обстоятельства и многообразие боевых тактических ситуаций приводят к появлению нескольких значений приведенных уровней шумности у одного и того же корабля. Если это справедливо для оценки дальности обнаружения, то для сравнительной оценки шумности кораблей приведенные уровни не должны зависеть от параметров гидроакустиче-

ских комплексов. В то же время приведенные значения шумности должны характеризовать боевую эффективность кораблей, т.е. определять возможности реагирования неконтактных систем оружия (НСО) на первичное гидроакустическое поле корабля. Этим условиям удовлетворяют приведенные уровни шума в широком спектре частот, соответствующих диапазону работы НСО и приведенные уровни максимальных дискретных составляющих спектра [7–10]. Эти параметры определяются расчетами из спектрограмм подводного шума кораблей, полученных для конкретных скоростей хода при измерениях на расстоянии 50 м от корабля и в полосах частот 1/3 октавы. Такие спектрограммы фиксируются в формулярах шумности кораблей.

Расчет приведенных уровней подводного шума кораблей. Приведенные уровни подводного шума кораблей характеризуют дальности реагирования НСО, имеющих широкополосные приемные тракты. Эти системы работают в определенных диапазонах частот. Так, большинство корабельных гидроакустических комплексов работает в звуковом диапазоне частот от 200 Гц до 5-6 кГц по общему уровню шума, т. е, они как бы интегрируют до площади спектр подводного шума в этом диапазоне частот. Поскольку спектры кораблей в звуковом диапазоне частот спадают с интенсивностью 6 дБ /октаву, то для интегрирования по площади части спектра достаточно определить уровень шума на среднегеометрической частоте этого диапазона частот. Для корабельных ГАК такой среднегеометрической частотой является 1 кГц. Именно поэтому за стандартную частоту приведения принимается 1 кГц, Измерение ГАП обычно производится, на расстоянии 50 м от корабля, но это расстояние может быть и другим. Для сопоставимости уровней подводного шума принято производить перерасчет к стандартному расстоянию 1 м. При пересчете исходят из справедливости сферического закона распространения энергии в ближнем гидроакустическом поле. Тогда

$$L(1м) = L(r_m) + 20 \lg \frac{r}{1}, \quad (2)$$

где $L(1м)$ – уровень подводного шума на расстоянии 1 м; $L(r_m)$ – уровень подводного шума на расстоянии r метров.

Спектрограммы в формулярах шумности кораблей даются в полосе анализа 1/3 октавы, но могут быть получены и в других полосах частот. Поэтому выбирается стандартная полоса анализа $\Delta f = 1$ Гц, к которой приводятся любые спектры. Пересчет производится по формуле

$$L(1Гц) = L(1/3 \text{ октавы}) - 10 \lg \Delta f, \quad (3)$$

где Δf – полоса анализа 1/3 октавного фильтра, в которую входит частота 1 кГц. Эта полоса равна $\Delta f = 235$ Гц.

Порядок приведения подводного шума кораблей производится следующим образом:

1. На спектрограмме подводного шума корабля (например, линия 1, рис. 1) в диапазоне частот от 250 Гц до 5 кГц проводится плавная кривая 4 по средним значениям спектра, если имеются дискретные составляющие;

2. Снимается уровень подводного шума на частоте 1 кГц, соответствующий кривой 4. Например, $L = 67$ дБ.

3. Производится пересчет подводного шума, полученного на расстоянии 50 м от корабля к 1 м

$$L_1 = L + 20 \lg \frac{50}{1} = 67 + 34 = 101 \text{ дБ},$$

т.е. поправка при пересчете расстояния составляет 34 дБ.

4. Производится пересчет подводного шума из полосы частот 1/3 октавы к полосе частот 1 Гц

$$L_2 = L_1 - 10 \lg \Delta f = 101 - 24 = 77 \text{ дБ},$$

т.е. поправка составляет 24 дБ при Δf фильтра 235 Гц.

5. По таблице соответствия уровней звука в децибелах и звукового давления в динах на сантиметр в квадрате определяется величина приведенного уровня шума корабля: $L_2 = 77$ дБ соответствует $P_{\text{и}} = 1,4$ дин/см².

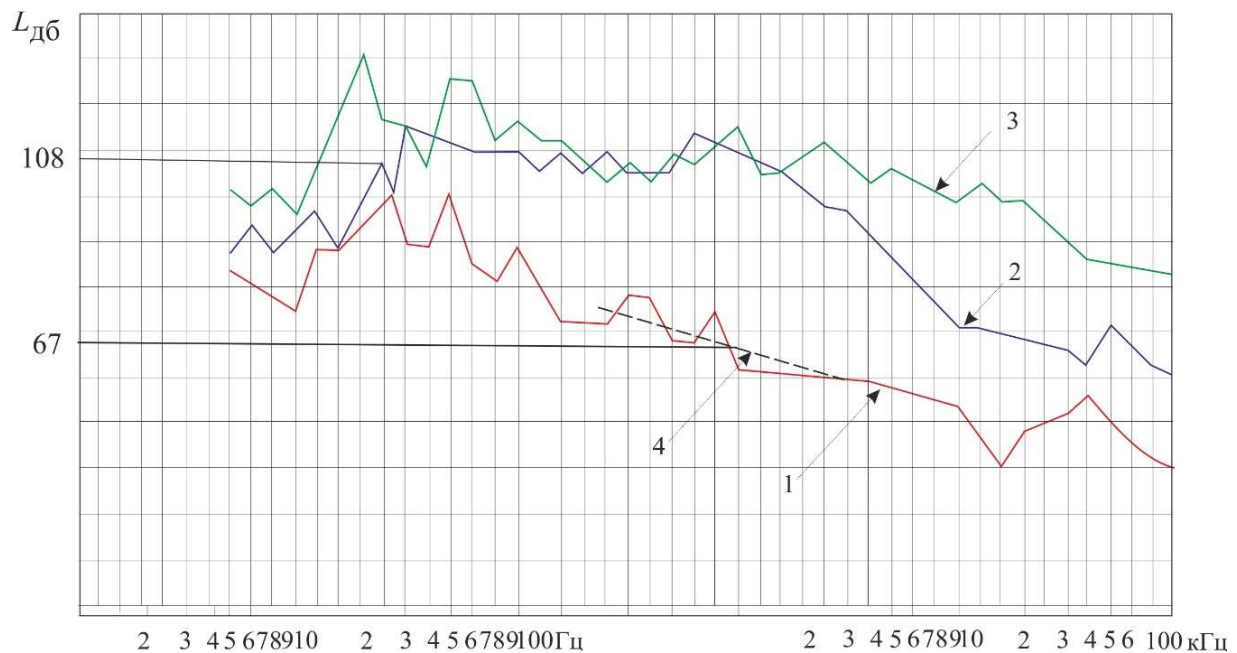


Рис. 1. Вариант спектрограммы подводного шума корабля

Имея спектрограммы, можно прямо определить приведенный уровень шумности корабля, – провести ординату, соответствующую частоте 1 кГц. Необходимо подчеркнуть, что этот параметр характеризует ГАП корабля для ситуаций, когда работают корабельные гидроакустические комплексы в широком спектре частот. Такая оценка приведенного уровня шума не учитывает режимы работы комплексов в различных поддиапазонах, как предлагают указанные ранее методики. Однако многочисленные рас-

четы указывают на существование незначительных отличий в значениях приведенного шума, полученных по методике [1] и упрощенным способом. Почти всегда погрешность лежит в пределах точности измерений.

Расчет приведенных уровней максимальных дискретных составляющих. Стационарные гидроакустические комплексы и некоторые корабельные станции имеют узкополосный анализ подводного шума кораблей и работают в инфразвуковом и низком звуковом диапазоне частот по регистрации дискретных составляющих. Стандартными условиями приведения дискретных составляющих приняты – частота дискретной составляющей и расстояние 1 м от корабля, которое пересчитывается по (2). Приводить дискретные составляющие к полосе анализа 1 Гц не нужно, поскольку они располагаются в узкой полосе и при изменении полосы анализа практически не изменяют свои уровни. Порядок приведения уровней дискретных составляющих производится следующим образом.

1. На спектрограмме снимается уровень дискретной составляющей, например, на частоте 25 Гц (линии 1 рис. 1), $L = 108$ дБ;

2. Производится пересчет уровней дискретной составляющей от расстояния 50 м к 1 м

$$L_1 = L + 20 \lg \frac{50}{1} = 108 + 34 = 142 \text{ дБ.}$$

3. По таблице соответствия определяется величина звукового давления, соответствующая $L_1 = 142$ дБ. Эта величина и есть приведенный уровень дискретной составляющей, которая равна $P_g = 2517$ дин/см².

Видно, что в узкой полосе частот дискретная составляющая несет большую акустическую энергию. Именно поэтому гидроакустические комплексы, имеющие узкую полосу анализа, обнаруживают корабли на больших расстояниях по дискретным составляющим. Таким образом, приведенные уровни дискретных составляющих характеризуют скрытность кораблей по отношению к стационарным гидроакустическим системам.

Расчеты уровней дискретных составляющих производятся как указано в работах [7, 8] и при помощи данных табл. 1.

Таблица 1

Расчет уровней дискретных составляющих

L (1/3 октавы; 50 м), дБ	P_w (1 кГц; 1 м; 1 Гц), дин/см ²	P_g (f_g ; 1 м), дин/см ²
1	2	3
60	0,632	10,02
62	0,796	12,6
64	1,0	15,9
66	1,26	20

Окончание таблицы 1

1	2	3
68	1,58	25,2
70	2,0	31,7
72	2,52	39,9
74	3,17	50,2
76	3,99	63,2
78	5,02	79,6
80	6,32	100,2
82	7,96	126,2
84	10,0	158,9
86	12,6	200
88	15,9	251,8
90	20	317
92	25,2	399
94	31,7	502,4
96	39,9	632,5
98	50,2	796,2
100	63,2	1002,4
102	79,6	1261,9

Методы расчетной и экспериментальной оценки первичного гидроакустического поля корабля. Необходимо отметить, что основным методом оценки ГАП кораблей являются экспериментальные измерения на стендах. Методика расчетной оценки подводного шума кораблей [1, 2–6] базируется на принципе энергетического суммирования акустической энергии от источников и составляющих частей ГАП. Спектральные характеристики и дискретные составляющие от этих источников для данной скорости хода корабля наносятся на общий график. На каждой фиксированной частоте графика суммируются уровни всех источников с помощью зависимости, характеризующейся данными табл. 2.

Таблица 2.**Таблица зависимостей**

$S, \text{дБ}$	0	1	2	4	6	8	10
$\Delta, \text{дБ}$	3	2,5	2,2	1,5	1,0	0,6	0,4

Полученные в результате суммирования уровни соединяются между собой непрерывной линией, которая и будет определять спектрограмму ГАП. Для удобства сопоставления расчетных величин с эксперименталь-

ными данными методика предусматривает получение уровней подводного шума в диапазоне частот от 5 до 100 000 Гц, в частотной полосе анализа 1/3 октавы и на расстоянии 50 м от корабля.

Сопоставление результатов расчета по методике с экспериментальными данными показывает на наличие определенной погрешности расчета. Средняя квадратическая ошибка расчета составляет: для кавитационного шума гребных винтов на частотах выше 600 Гц около 6 дБ, а на низких частотах – 10 дБ; для подводного шума механизмов на частотах выше 300 Гц около 6 дБ, а на низких частотах – 10 дБ; для значений критических скоростей около 20%. Поэтому такую расчетную оценку следует считать ориентировочной. Однако из-за сложности формирования ГАП трудно ожидать повышения точности расчетной методики.

Оценка эффективности средств гидроакустического наблюдения как информационных источников для экспертной интеллектуальной системы классификации морских целей. Анализ физики процесса обнаружения позволяет выбрать мгновенную (текущую) вероятность обнаружения сигнала цели P_i , вероятность обнаружения цели P_0 , вероятность первоначального обнаружения цели $P_{перв i}$, накопленную вероятность обнаружения цели P_n [11, 14].

Мгновенная вероятность обнаружения сигнала (вероятность обнаружения за один обзор) представляет вероятность обнаружения сигнала при однократном отсчете реализуемого параметра.

$$P_i = \int_{(y_0)} f(y) dy,$$

где $f(y)$ – плотность вероятности реализуемого параметра на входе порогового устройства при наличии сигнала;

y_0 – область принятия решения.

Величина P_i при выбранном статистическом критерии обнаружения сигнала определяется свойствами средства наблюдения, условиями наблюдения, параметрами цели, зависит от отношения сигнал/помеха и может быть выражена через дальность до цели

$$P_i = P_i(c/n) = P_i(D).$$

Фиксация сигнала цели в данном цикле обзора не эквивалентна принятию решения о наличии цели. Принятие решения о наличии цели производится по результатам анализа нескольких циклов обзора [12–19]. В связи с этим вводится понятие вероятности обнаружения цели P_0 , определяющей вероятность выполнения принятой логики оценки результатов наблюдений в заданном числе смежных циклов обзора, последним из которых является текущий i -й цикл.

Вероятность первичного обнаружения цели $P_{перв i}$ определяет вероятность того, что на момент i -го цикла наблюдения принятое правило решения об обнаружении цели на протяжении l смежных циклов обзора, из которых текущий является последним, выполнено впервые.

Накопленная вероятность обнаружения цели $P_n(i)$ выражает вероятность того, что при данном i -м цикле обзора выбранное правило принятия решения об обнаружении выполнено хотя бы один раз.

Следует отметить, что вероятности P_o , $P_{перв}$, P_n являются функцией времени наблюдения (числа обзоров пространства n). При этом процесс наблюдения начинается с некоторого момента времени $t = 0$ ($i = 1$), соответствующего определенному пространственному положению цели в пределах зоны действия гидроакустического средства (ГАС) наблюдателя. Накопленная вероятность обнаружения является более полной характеристикой ГАС, так как она представляет собой вероятность обнаружения цели за определенный промежуток времени, которому соответствует определенный интервал расстояний.

При расчетах $P_{перв i}$ и $P_n(i)$ часто бывает удобным определять вероятность необнаружения цели $Q(i)$, т.е. вероятность того, что за l смежных циклов обзора, включая i -й, выбранное правило решения об обнаружении не было выполнено ни разу. Очевидно, что

$$Q(i) = 1 - P_n(i).$$

Рассмотренные вероятности связаны между собой аналитически. Наиболее просто эта связь определяется в случае, когда решение об обнаружении цели принимается при фиксации сигнала в каждом отдельном цикле обзора.

В этом случае ($l = 1$) и

$$\begin{aligned} P_i &= P_{o,i} = P_i(D) = P_o(D); \\ P_{перв i} &= P_i Q(i-1) = P_i \prod_{j=1}^{i-1} (1 - P_j); \\ P_n(i) &= 1 - Q(i) = 1 - \prod_{j=1}^i (1 - P_j); \\ Q(i) &= \prod_{j=1}^i (1 - P_j). \end{aligned}$$

При любом правиле принятия решения об обнаружении цели в заданном числе смежных циклов обзора связь между вероятностями $P_{перв i}$ и $P_n(i)$ описывается соотношениями:

$$P_{перв i} = Q(i-1) - Q(i) = P_n(i) - P_n(i-1).$$

$$P_n(i) = 1 - Q(i) = \sum_{j=1}^i P_{перв j}.$$

Оценка вероятностей $P_i, P_{oi}, P_n(i)$ в соответствии с выбранным правилом принятия решения об обнаружении производится после фиксации первоначального условного местонахождения цели и аналитического описания траектории ее движения в функции числа обзоров относительно наблюдателя. Например, если цель сближается с носителем ГАС на курсовом параметре $\rho = 0$, то текущее расстояние до нее определится как

$$D_i = D_o - v_p T_u(i - 1), \quad (4)$$

где D_o – расстояние соответствующее $i = 1$; i – номер цикла; v_p – относительная скорость; T_u – период обзора (время цикла наблюдения).

Определение вероятности P_i позволяет подучить $P_{перв i}$, плотность распределения дальности обнаружения, математическое ожидание и дисперсию дальности обнаружения. Применительно к дискретному обзору:

$$f[D \in (D_{i-1} - D_i)] = \frac{P_{перв}(D_i)}{D_{i-1} - D_i}; \quad (5)$$

$$\bar{D} = \sum_{i=1}^n D_i P_{перв}(D_i); \quad (6)$$

$$\sigma_D^2 = \sum_{i=1}^n D_i^2 P_{перв}(D_i) - [\bar{D}]^2. \quad (7)$$

На рис. 2 представлены типовые характеристики $P_i, P_{n,1,1}; P_{перв,1,1}; P_{n,k,l}$

Ужесточение критерия приводит к уменьшению дистанции, соответствующей заданной вероятности $P_{n,k,l}$, но снижается и вероятность принятия ложного решения.

Таким образом, если известна функция полезности $L(x)$, то используя (4) представляется возможность получения количественного значения показателя эффективности ГАС, выполняющей задачу обнаружения целей.

Соотношение (4) может быть подучено и для других случаев маневрирования наблюдателя и цели. Обязательным условием при этом является необходимость непрерывного контроля возможного их взаимного положения.

Рассмотренные выше вероятности $P_i, P_{перв}, P_n$ были справедливы для средств наблюдения с дискретным обзором. Современные тракты шумопеленгования с вращающимися характеристиками направленности или веером статически сформированных характеристик и электронным опросом пространственных каналов могут считаться средствами наблюдения с не-

прерывным обзором. Действительно, если скорости обзора n равны 1–20 об/мин, то при трех характеристиках направленности период обзора составит $60/3n$, т.е. $T = 20$ с или $T = 1$ с соответственно.

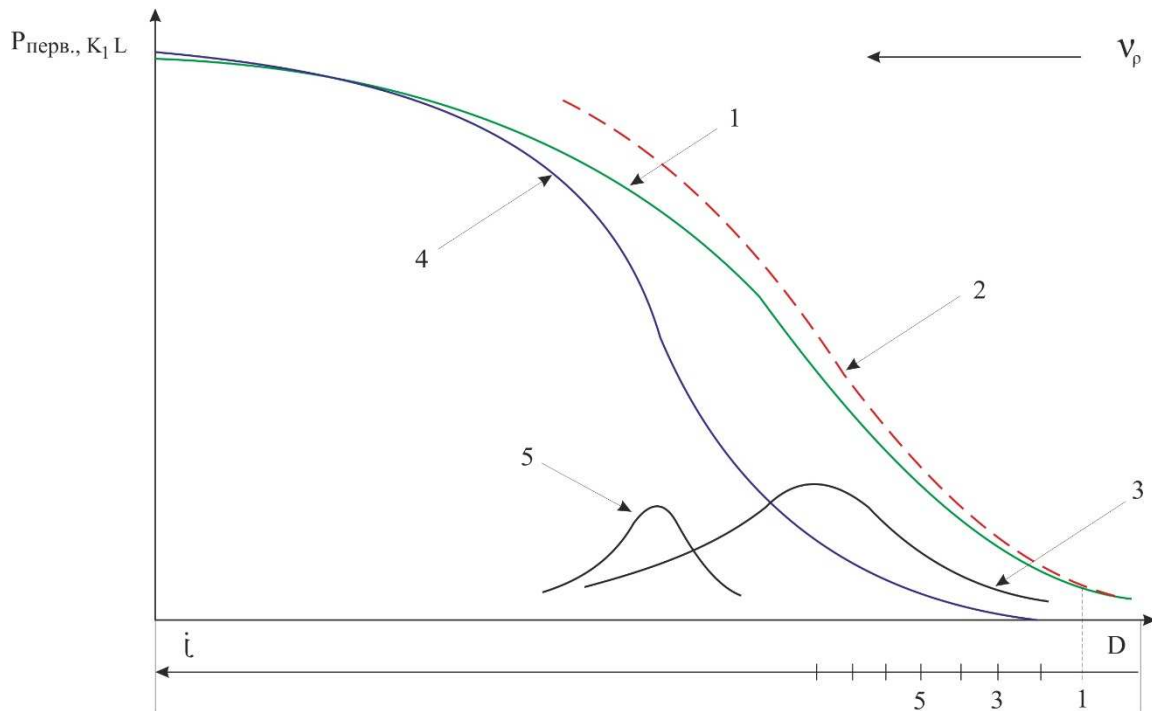


Рис. 2. График типовых характеристик обнаружения:
 1 – зависимость мгновенной вероятности обнаружения $P(D_i)$;
 2 – зависимость накопленной вероятности обнаружения в случае принятия решения по одному выявленному сигналу; 3 – зависимость вероятности первичного обнаружения $P_{перв\ i}$ при том же критерии;
 4 – зависимость накопленной вероятности при критерии (k, l) ;
 5 – зависимость вероятности первичного обнаружения при том же критерии

За это время расстояние между сближающимися наблюдателем и целью при скоростях $v_n = v_u = 10$ уз ($v_p \cong 10$ м/с) составит величину $\Delta r = 200$ и 10 м. В первом приближении можно считать, что условия наблюдения в данном интервале дистанций останутся неизменными.

При отказе от дискретизации процесса наблюдения и трактовке его как процесса непрерывного накопления информации необходимо ввести понятие о функциях $\gamma(t)$ и $\lambda(t)$, характеризующих скорости нарастания вероятности обнаружения цели $P_o(t)$ и накопленной вероятности обнаружения $P_n(t)$ в течение времени наблюдения.

Скорость изменения накопленной вероятности, называемая интенсивностью первоначального обнаружения цели, определяется соотношением

$$\Lambda(t) = dP_n(t)/dt = P_{неpв}(t, t + dt)/dt \quad (8)$$

и при известных функциях $P_n(t)$ и $P_{неpв}(t, t + dt)$ может быть определена аналитически или графическим путем. Если функция $\Lambda(t)$ определена каким-либо путем, то вероятности $P_n(t)$ и $P_{неpв}(t, t + dt)$ рассчитываются по формулам:

$$P_n(t) = 1 - Q(t) = \int_0^t \Lambda(t)dt; \quad (9)$$

$$P_{неpв}(t, t + dt) = \Lambda(t)dt, \quad (10)$$

где $Q(t)$ – вероятность необнаружения цели в течение интервала времени $0 - t$.

При равномерном сближении цели с наблюдателем на курсовом параметре 0 между текущей дистанцией D и временем наблюдения t существует связь:

$$D(t) = D_1 - v_p t,$$

где D_1 – дистанция до цели в момент времени $t = 0$.

Изменяя в (8) и (9) аргумент t на дистанцию D , получим:

$$\Lambda(D) = dP_n(D)/dD = P_{неpв}(D, D + \Delta D)/dD; \quad (11)$$

$$P_n(D) = 1 - Q(D) = \int_D^{D_1} \Lambda(D)dD; \quad (12)$$

$$P_{неpв}(D, D + dD) = \Lambda(D)dD, \quad (13)$$

Скорость изменения текущей вероятности обнаружения цели $P_o(t)$, называемая интенсивностью обнаружения $\gamma(t)$, вытекает из соотношения

$$\gamma(t) = P_o(t, t + dt)/dt. \quad (14)$$

Здесь $P_o(t, t + dt)$ выражает вероятность выполнения правила принятия решения об обнаружении за бесконечно малый промежуток времени dt . Если функция $\gamma(t)$ определена, то могут быть определены вероятности $P_o(t, t + dt)$ и $P_{неpв}(t, t + dt)$:

$$P_o(t, t + dt) = \gamma(t)dt; \quad (15)$$

$$\begin{aligned} P_{неpв}(t, t + dt) &= P_n(t + dt) - P_n(t) = Q(t) - Q(t, t + dt) = \\ &= Q(t)P_o(t, t + dt) = [1 - P_n(t)]\gamma(t)dt. \end{aligned} \quad (16)$$

Из (16) следует, что

$$dP_n(t)/dt = [1 - P_n(t)]\gamma(t) \quad (17)$$

и после интегрирования с учетом того, что $P_n(0) = 0$, получаем

$$P_n(t) = 1 - Q(t) = 1 - \exp\left[-\int_0^t \gamma(t)dt\right]. \quad (18)$$

Из (19) видно, что величина $\gamma(t)$ представляет собой математическое ожидание числа обнаруженных целей в единицу времени.

Знание функции $\gamma(t)$ позволяет вычислить все вероятности, представляющие практический интерес.

Используя в качестве аргумента дальность D , вместо (14) и (16) будем иметь:

$$\begin{aligned}\gamma(D) &= P_o(D, D + dD)/dD; \\ P_o(D) &= \gamma(D)dD; \\ P_{перв}(D, D + dD) &= [1 - P_h(D)]\gamma(D)dD; \\ dP_h(D)/dD &= [1 - P_h(D)]\gamma(D),\end{aligned}$$

отсюда

$$P_h(D) = 1 - Q(D) = 1 - \exp\left[-\int_{D_1}^D \gamma(D)dD\right]. \quad (19)$$

Следует подчеркнуть, что формулы (14) – (19) применимы только при условии независимости принятия решения об обнаружении за время t и промежутков времени $t, t + dt$. При этом, сопоставляя (8) и (16), находим:

$$\Lambda(t) = [1 - P_h(t)]\gamma(t); \quad (20)$$

$$\Lambda(D) = [1 - P_h(D)]\gamma(D). \quad (21)$$

Интенсивность обнаружения $\gamma(t)$ или $\gamma(D)$ позволяет рассчитывать величину так называемого потенциала обнаружения $u(D)$ или $u(t)$, широко используемую в теории поиска [7, 11, 15–19].

Физически потенциал обнаружения представляет собой математическое ожидание числа целей, обнаруживаемых соответственно за время наблюдения t или за время прохождения целью расстояния от D_1 до D :

$$u(t) = \int_0^t \gamma(t)dt; \quad (22)$$

$$u(D) = \int_{D_1}^D \gamma(D)dD. \quad (23)$$

С учетом (22) выражение (18) примет вид:

$$P_h(t) = 1 - \exp[-u(t)];$$

$$P_h(D) = 1 - \exp[-u(D)];$$

$$P_{перв}(t, t + dt) = \exp[-u(t)] - \exp[-u(t + dt)];$$

$$P_{перв}(D, D + dD) = \exp[-u(D)] - \exp[-u(D + dD)];$$

Потенциал обнаружения u , характеризуя свойство средства наблюдения, позволяет оценить аффе́кт, получаемый в результате одновременного применения N средств. При независимом одновременном применении N средств наблюдения:

$$P_h(t) = 1 - \prod_{i=1}^N [1 - P_{h,i}(t)] = \prod_{i=1}^N \exp[-u_i(t)] - \exp[-u(t)];$$

$$P_n(D) = 1 - \prod_{i=1}^N [1 - P_{n,i}(D)] = \prod_{i=1}^N \exp[-u_i(D)] - \exp[-u(D)],$$

где $u(t)$ и $u(D)$ – общий потенциал системы наблюдения, состоящей из N средств. При этом

$$\left. \begin{aligned} u(t) &= \sum_{i=1}^N u_i(t); \\ u(D) &= \sum_{i=1}^N u_i(D). \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

Выражение (24) характеризует свойство аддитивности потенциалов обнаружения. Количественная оценка эффективности наблюдения, осуществляемая ГАС, прежде всего связана с оценкой вероятности обнаружения сигналов целей, находящихся в зоне ее действия.

В заключение отметим, что обнаружение гидроакустических сигналов и извлечение из них полезной информации определяет основы алгоритмизации обработки данных в разрабатываемой авторами экспертной интеллектуальной системе классификации морских целей и способствует повышению эффективности реагирования неконтактных систем оружия при их боевом применении.

Список литературы

1. Методика перерасчета данных подводного шума и помех работе ГАС. Воениздат МО СССР, 1978.
2. Захаров И.Г., Емельянов В.В., Щеголихин В.П., Чумаков В.В. Скрытность и защита кораблей по физическим полям. // <http://mirznanii.com/a/119009/skrytnost-i-zashchita-korabley-po-fizicheskim-poluam> (дата обращения: 05.03.2018).
3. Мукалов Н.Г. Способ приведения уровней подводного шума кораблей к стандартным условиям // Труды ЦНИИ им. Крылова. Л., 1971. Вып. 67.
4. Гутин Л.Я., Постников В.А., Якубовский М.Я. Теоретическое и экспериментальное исследование подводного шума корабля, обусловленного воздушным шумом в его помещениях // Труды ЦНИИ им. А. Н. Крылова. Л., 1961. Вып. 170.
5. Пархоменко В.Н. Комплексное применение средств акустической защиты для снижения вибрации и шума корабельного оборудования. НИЦ «Моринтех», 2001.
6. Пархоменко В.Н. Решая проблемы шумности // Морской сборник, 1993. № 2.

7. Пятакович В.А., Василенко А.М., Мироненко М.В. Технологии нелинейной просветной гидроакустики и нейро-нечетких операций в задачах распознавания морских объектов: монография. Владивосток: Дальневост. федерал. ун-т, 2016. 190 с.

8. Пятакович В.А., Филиппов Е.Г. Нейросетевая система в задаче управления распознаванием сложного технического объекта в морской среде // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2017. Вып. 7. С. 239–246.

9. Пятакович В.А., Василенко А.М., Рычкова В.Ф. Новые технологии формирования системы мониторинга и идентификации признаков полей морских объектов // Морские интеллектуальные технологии. СПб.: 2017. № 4 (38) Том 3. С. 127–131.

10. А.с № 2018611591 РФ. Расчет эффективности применения гидроакустических средств и управление имитационной моделью гидроакустического эксперимента / Василенко А.М., Пятакович В.А., заявл. от 05.12.2017. Опубл. 02.02.2018.

11. Раков В.И. Эффективность судовых РЭС. Л.: Судостроение, 1974. 328 с.

12. Горбунов В.А. Эффективность обнаружения целей. М.: Воениздат, 1979. 160 с.

13. Богданов В.И., Пятакович В.А., Назаренко П.К. Принцип автоматического распознавания образа цели // Материалы Международной конференции Математическое моделирование физических, экономических, технических, социальных систем и процессов. Ульяновск: УГУ, 2003. С. 31, 32.

14. Пятакович В.А., Василенко А.М., Хотинский О.В. Распознавание и классификация источников формирования полей различной физической природы в морской среде: монография. Владивосток: Морской гос. ун-т им. Г.И. Невельского, 2017. 255 с.

15. Минаев Д.Д., Мироненко М.В., Малашенко А.Е., Пятакович В.А. Прогнозирование геоэкологической обстановки по признакам проявления электромагнитных волн в очаге землетрясения // Датчики и системы М., 2017. № 10 (218). С. 28–34.

16. Мироненко М.В., Василенко А.М., Василенко К.К., Пятакович В.А., Стаценко Л.Г. Analytical information system for calculating seame dium characteristics // Материалы 5-й международной тихоокеанской конференции по подводной акустике «PRUAC 2015» Владивосток: Acoustical Society of America, 2015. С. 417–424.

17. Мироненко М.В., Минаев Д.Д., Василенко А.М., Пятакович В.А. Дистанционная гидроакустическая размеромерия подводных объектов // Датчики и системы. М., 2017. № 10 (218). С. 41–47.

18. А.с. № 2017664296 РФ. Программа имитационного моделирования процесса распространения гидроакустических сигналов / А.М. Василенко, В.А. Пятакович. Опубл. 20.12.2017.

19. А.с. № 2018612169 РФ. Программно-аналитический комплекс определения направления на морскую цель по вторичному гидроакустическому полю / А.М. Василенко, В.А. Пятакович. Опубл. 13.02.2018.

Пятакович Валерий Александрович, канд. техн. наук, доц., начальник научно-исследовательской лаборатории, pva.877com@mail.ru, Россия, Владивосток, Тихоокеанское высшее военно-морское училище имени С.О. Макарова,

Василенко Анна Михайловна, канд. техн. наук, научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории, kahunya@gmail.com, Россия, Владивосток, Тихоокеанское высшее военно-морское училище имени С.О. Макарова

COMPUTATIONAL AND EXPERIMENTAL EVALUATION OF A MARINE SONAR
TARGET'S PRIMARY FIELD

V.A. Pyatakovich, A.M. Vasilenko

The article presents the procedure to reduce the marine vessels underwater noise level, calculating the maximum of discrete components. The primary hydroacoustic field estimation methods are considered and the final analysis of comparison between the calculation results obtained using the existing methods to estimate a sea target's primary hydroacoustic field and the ones obtained from the experimental data is made. The probabilities and interdependencies of the target detection primary and accumulated processes are described.

Key words: sea target; marine objects classification; primary hydroacoustic field; discrete components levels; underwater noise spectrogram.

Pyatakovich Valeriy Aleksandrovich, candidate of technical sciences, docent, Chief of a Research Laboratory, pva.877com@mail.ru, Russia, Vladivostok, The Pacific Higher Naval College named after S.O. Makarov,

Vasilenko Anna Mihajlovna, candidate of technical sciences, researcher of a research laboratory, kahunya@gmail.com, Russia, Vladivostok, The Pacific Higher Naval College named after S.O. Makarov

ПУТИ СНИЖЕНИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ В СИСТЕМЕ НАЗЕМНОЙ НАВИГАЦИИ СПЕЦИАЛЬНОГО ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА

В.Ю. Лупанчук, В.В. Кулешов, В.М. Гончаров

В статье исследованы погрешности комплексированной системы наземной навигации (СНН) специального транспортного средства (СТС), которые получены от различных датчиков скорости. Предложен вариант повышения точности определения текущих навигационных параметров за счет использования адаптивного управления системой навигации и применение дополнительных аппаратных средств на борту подвижного объекта, которые представлены оптоэлектронным датчиком скорости и акселерометрами инерциальной системы навигации.

Ключевые слова: специальное транспортное средство, система наземной навигации, механический датчик скорости, доплеровский датчик скорости, оптоэлектронный датчик скорости, акселерометр.

Процесс навигации зависит от вида движущегося объекта, характера выполняемой задачи и условий движения. Условия работы систем наземной навигации в значительной степени отличаются от условий, в которых работают авиационные, морские и космические системы навигации. Решение задач навигации определяется совокупностью большого числа параметров, называемых параметрами режима навигации. Под параметрами движения объекта обычно понимают координаты его центра масс, скорость и ускорение движения центра масс.

Необходимость правильного выбора и выдерживания маршрутов движения подвижными объектами, в том числе и наземными транспортными средствами определяется с учетом целого ряда факторов [1]:

- задач, решаемых подвижным объектом в процессе движения в зависимости от начальных условий и тактико-технических характеристик объекта (предварительное определение программы и траектории движения объекта, с учетом возможностей имеющихся в наличии средств измерения параметров его движения, предполагаемых внешних условий и времени движения);

- определение метода для нахождения текущих навигационных параметров подвижного объекта с имеющимися аппаратными средствами, а также учет накопления ошибок измерений в зависимости от выбранного метода навигации;

- выполнение измерений и обработка навигационной информации в процессе движения объекта, а также обнаружение отклонений от заданной траектории движения и выработка команд на проведение коррекции текущих параметров для достижения требуемой траектории движения объекта относительно конечной точки пространства.

Одним из основных методов навигации для специальных транспортных средств (СТС) является метод счисления пути, который относится к автономным методам не требующего внешних источников навигационной информации, но для его реализации необходимо иметь априорную информацию о начальном положении объекта и непрерывное измерение вектора ускорения или скорости в процессе движения объекта, интегрировании этого вектора до получения приращения координат (вектор ускорения интегрируется дважды), которые суммируются с координатами начальной точки маршрута (рис. 1).

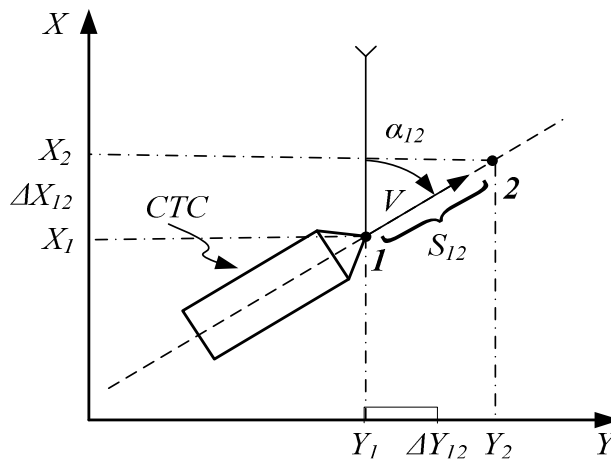


Рис. 1. Схема прямолинейного движения СТС при реализации метода счисления пути

Рассмотрим принцип действия системы наземной навигации СТС при реализации метода счисления пути на прямолинейном участке маршрута движения. Перемещение наземного объекта из точки 1 с координатами $X_1; Y_1$ в точку 2, координаты которой равны $X_2; Y_2$ сопровождается измерением текущей скорости V и измерением дирекционного угла α_{12} между северным направлением и направлением движения продольной оси СТС. В результате интегрирования текущей скорости наземного объекта получаем приращение пути от начальной точки 1 до конечной точки 2, которое будет равно S_{12} . Решение задачи навигации сводится к известному решению прямой геодезической задачи [2], в которой искомые координаты определяются по следующим алгоритмам:

$$\begin{aligned} X_2 &= X_1 + \Delta X_{12} = X_1 + \Delta S_{12} \cos \alpha_{12}, \\ Y_2 &= Y_1 + \Delta Y_{12} = Y_1 + \Delta S_{12} \sin \alpha_{12}, \end{aligned} \quad (1)$$

где $\Delta X_{12}, \Delta Y_{12}$ – приращения координат между точками 1 и 2, м.

Основным недостатком метода счисления пути является нарастание погрешностей определения координат пропорционально пройденному СТС пути. Это обусловлено тем, что координаты каждой последующей точки определяются от координат предыдущей точки, при этом к погреш-

ностям из-за ошибок в измерении текущих навигационных параметров добавляются погрешности определения координат предыдущей точки маршрута. Уменьшить погрешности определения приращения координат между начальной и следующей точкой маршрута можно за счет использования на борту СТС дополнительных аппаратных и программных средств. В качестве дополнительных аппаратных средств могут использоваться инерциальные и электронно-механические высокоточные измерители навигационной информации, которые позволяют синтезировать комплексированную структуру СНН.

Комплексирование, основанное на применении различных измерительных средств, позволяющих получать достоверные навигационные данные, которые в дальнейшем обрабатываются различными математическими методами или фильтрами с учетом весовых коэффициентов измерений, позволяет проектировать системы с адаптивными свойствами. Известно, что адаптация, как способ обеспечения функционирования СНН с требуемыми характеристиками, оказывается необходимой при изменении условий ее функционирования [3].

Системы навигации характеризуются различными характеристиками: точность, универсальность, время подготовки к работе, удобство в эксплуатации, помехозащищенность, скрытность в работе и другими. Обобщенной характеристикой СНН является ее эффективность, которая определяется отношением степени приспособленности системы к решению навигационных задач с требуемой точностью, надежностью, в течение заданного времени и во всем диапазоне эксплуатационных условий к затратам на ее разработку, производство и эксплуатацию. В наибольшей степени всем этим требованиям удовлетворяет СНН, обладающая адаптивными принципами управления.

Сущность предлагаемого адаптивного управления заключается в следующем. Несколько измерительных датчиков (ИД) навигационной информации с различными физическими свойствами измеряют навигационные параметры СТС с обеспечением требуемых характеристик СНН. Расчетные условия применения ИД могут оказаться неблагоприятными для некоторых из них, тогда возникает необходимость исключения этих измерителей из процесса обработки навигационной информации. Следовательно, навигационная система помимо датчиков первичной информации должна содержать блок анализа информации как от систем контроля блоков СНН, так и от внешних источников информации.

В существующих СТС применяется путевая стойка в составе СНН, которая решает только задачи по хранению информации об исправности навигационных каналов, осуществлению отключения неисправных ИД, а также согласовывает форматы передаваемой информации между устройствами.

На рис. 2 представлена структурная схема комплексированной путевой СНН с тремя датчиками, измеряющими входную навигационную информацию. Состав представленной схемы: $ИД_{1,2,3}$ – измерительные датчики, определяющие входную навигационную информацию $x(t)$; $ЛБ$ – логический блок, обеспечивающий коммутацию каналов $z_i(t)$; $ВУ$ – вычислительное устройство.

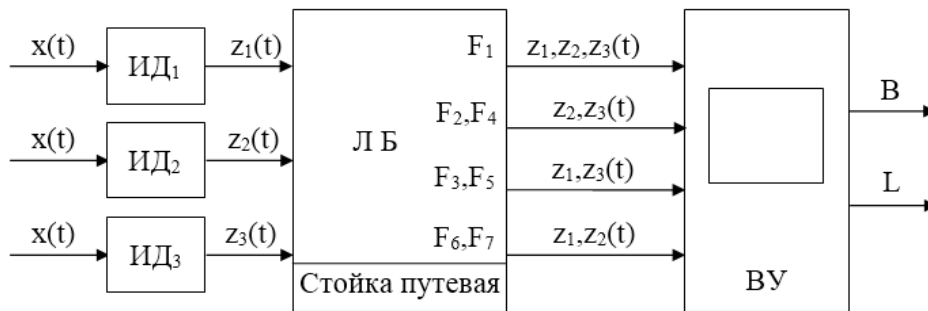


Рис. 2. Структурная схема комплексированной путевой СНН

1. Аппаратные средства построения путевой СНН СТС

В состав путевой СНН СТС для определения текущих навигационных параметров скорости и ускорений движения на разных скоростных этапах включены следующие аппаратные средства:

- механический датчик скорости (МДС) предназначен для преобразования чувствительными элементами угла поворота его входного вала, связанного с ходовой частью подвижного объекта, в число импульсов, соответствующее скорости движения или пройденному пути;

- доплеровский датчик скорости (ДДС) используется для получения достоверной скорости подвижного объекта на основе эффекта Доплера, который основан на излучении электромагнитных волн по линии движения СТС.

В качестве дополнительного источника навигационной информации в статье предлагается использовать оптоэлектронный датчик скорости (ОЭДС), который предназначен для получения текущих навигационных параметров скорости движения объекта на основе использования сигналов, отраженных от неоднородностей дорожного покрытия при освещении его мини прожектором СТС в процессе движения. А также акселерометры, установленные в составе приборов автономного навигационного комплекса. Рассмотрим более подробно принципы работы аппаратных средств и их погрешности.

1.1 Механический датчик скорости

Механический датчик скорости является наиболее простым, надежным и достаточно широко используемым измерителем скорости движения объекта. Иногда он называется механическим измерителем пути (МДП).

Конструктивно существующие в настоящее время МДП и МДС не отличаются, разница между ними состоит лишь в принятом алгоритме обработки их выходных сигналов. Так, количество импульсов на выходе МДП пропорционально пройденному СТС расстоянию, а количество импульсов на выходе МДС в единицу времени – пропорционально скорости.

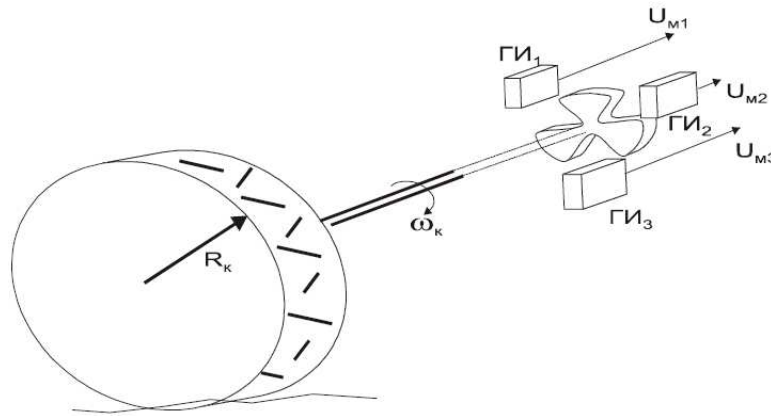


Рис. 3. Обобщенная схема МДС

Принцип действия основан на преобразовании механического вращения колеса и подсчета импульсов от генераторов, установленных на валу датчика в скорость движения объекта (рис. 3).

Датчик представляет собой электромеханический генератор импульсов, в котором диафрагма приводится во вращение от вращения колеса. Диафрагма представляет собой плоский круг с чередующимися прозрачными и непрозрачными сегментами. Генераторы импульсов (ГИ), расположенные по периметру диафрагмы, вырабатывают импульсы в момент прохождения вблизи них непрозрачного сегмента диафрагмы. При количестве непрозрачных сегментов, равном n (применительно к рисунку $n = 3$), частота импульсов генераторов будет в n раз больше частоты вращения колеса [5].

Зависимость между скоростью движения СТС и частотой импульсов, вырабатываемых генераторами за один оборот колеса, соответствующего по времени периоду T_K его вращения, при отсутствии погрешностей определения скорости подвижного объекта, будет иметь вид:

$$V = \frac{2\pi R_K}{T_K}, \quad V = \frac{1}{n} 2\pi R_K f_K, \quad (2)$$

где V – скорость подвижного объекта, м/с; n – количество непрозрачных секторов на диафрагме электромеханического преобразователя вращательного движения в частоту; R_K – радиус колеса, м; f_K – циклическая частота на выходе преобразователя, 1/м.

Погрешности МДС определяются двумя основными составляющими ошибок:

- ошибкой определения скорости СТС от МДС, не зависящей от времени – средняя квадратическая погрешность (СКП) определения скорости МДС;

- ошибкой определения скорости СТС от МДС, зависящей от времени, которая состоит также из двух основных составляющих ошибок определения скорости, обусловленные изменением макро и микрорельефа местности, а также изменением радиуса качения одометрического колеса. Общую СКП определения скорости СТС от МДС за промежуток времени движения можно представить в виде [4]:

$$\sigma_{МДС}(t) = \sqrt{\sigma_D^2 + \sigma_T^2 \cdot t}, \quad \sigma_{МДС}(t) = \sqrt{\sigma_D^2 + (\sigma_{ММР}^2 + \sigma_{РКК}^2)^2 \cdot t}, \quad (3)$$

где $\sigma_{МДС}$ – общая СКП определение скорости СТС от МДС; σ_D – СКП МДС, не зависящая от времени; σ_T – СКП МДС, зависящая от времени; $\sigma_{ММР}$ – СКП МДС, обусловленная изменением макро и микрорельефа местности; $\sigma_{РКК}$ – СКП МДС, изменением радиуса качения колеса подвижного объекта; t – время движения объекта, с.

Поскольку основными погрешностями МДС являются погрешность в определении пути, обусловленная изменением радиуса колеса СТС и погрешность в определении пути, обусловленная сложным микрорельефом местности.

Погрешности, обусловленные микрорельефом пути, проявляются следующим образом. Если высота неровностей микрорельефа дорожного пути не превышает хода амортизатора подвески колес агрегата, а расстояние между ними меньше его колесной базы, то продольная ось агрегата практически не будет изменять своего положения относительно плоскости горизонта, в то время как его колеса будут «обкатывать» каждую неровность рельефа. Тогда погрешность счисления горизонтальной составляющей пройденного пути может быть представлена в следующем виде [6]:

$$\Delta S = S - S_r = \sum_{i=1}^n S_i (1 - \cos \alpha_i) = \frac{2\pi R r n (1 - \cos \alpha^*)}{m} = S(1 - \cos \alpha^*), \quad (4)$$

Из этого выражения следует, что с увеличением угла неровностей рельефа α_i , а также количества неровностей S_r увеличивается значение погрешности ΔS . Таким образом, МДС необходимо калибровать как при калибровке аппаратуры СНН на эталонном участке (определяется $\Delta K_{МДС}$), так и во время его движения.

1.2 Доплеровский датчик скорости

Эффект Доплера-Белановского для наземных подвижных объектов, на котором основан ДДС, можно сформулировать следующим образом: если с борта движущегося агрегата излучать в сторону Земли радиосигнал и принимать здесь же на борту сигнал, отраженный от ее поверхности, то частота принимаемого сигнала отличается от частоты излученного на величину, называемую доплеровским сдвигом, которая пропорциональна

скорости движения СТС (рис. 4). При установке приемопередатчика на одном подвижном объекте скорость агрегата измеряется относительно скорости точки, от которой отражается сигнал [2].

Из пучка лучей, излучаемых передатчиком расположенном в точке A , выбран только один i -ый луч, пройдя до поверхности Земли расстояние L_i , луч отражается от поверхности в точке B_i и возвращается на приемную антенну, расположенную в точке A . Угол между вектором скорости V и направлением луча обозначен γ_i .

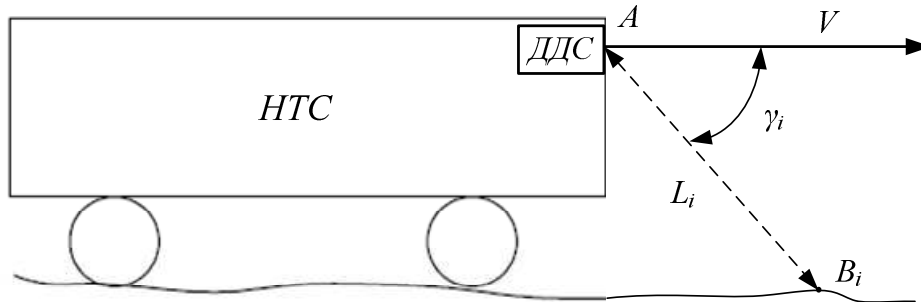


Рис. 4. Схема положения излучаемого сигнала (единичный луч)

Согласно принципу действия доплеровского датчика информация о скорости движения объекта определяется разностью круговых частот приемника и передатчика. Эту разность можно представить в виде:

$$\Delta\omega_i = \omega_{\text{пр}i} - \omega_0 = \omega_0 \left(1 + \frac{2}{c} V \cos \gamma_i\right) - \omega_0 = \frac{2\omega_0}{c} V \cos \gamma_i, \quad (5)$$

где $\Delta\omega_i$ – разность между частотами приемника и передатчика, 1/с; $\omega_{\text{пр}i}$ – частота приемника i -го луча, отраженного от точки на поверхности Земли, 1/с; ω_0 – частота передатчика i -го луча, 1/с; c – скорость света, м/с.

Используя известные соотношения круговую частоту можно представить в виде циклической частоты и рассчитать зависимость между доплеровским сдвигом частот и скоростью движения объекта:

$$f = \frac{\omega}{2\pi} \text{ и } \frac{f}{c} = \frac{1}{\lambda}, \quad \Delta f_{\text{Д}i} = F_{\text{Д}i} = \frac{2 \cos \gamma_i}{\lambda_0} V, \quad (6)$$

где f – циклическая частота, 1/с; λ – длина волны гармонического сигнала, м; $F_{\text{Д}i}$ – доплеровский сдвиг частот i -го луча, 1/с.

Любая антенна обладает конечной шириной диаграммы направленности, то есть излучает пучок лучей определенной ширины в необходимом направлении. В этом случае для каждого i -го луча будет свое значение угла γ_i , следовательно, свое значение доплеровской частоты. Таким образом, сигнал приемника будет содержать спектр частот, отраженных от поверхности Земли. При симметричной диаграмме направленности антенны спектр частот сигнала будет симметричен относительно частоты луча, совпадающего с осью симметрии (рис. 5).

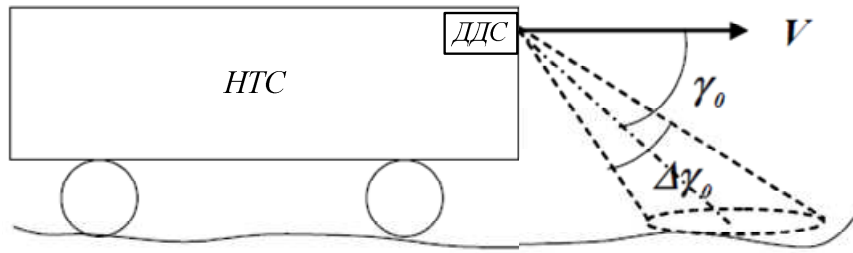


Рис. 5. Ширина диаграммы направленности пучка лучей передающей антенны ДДС

Указанный луч – ось симметрии диаграммы направленности составляет с вектором скорости угол γ_0 , значение которого и входит в окончательное выражение для нахождения доплеровского сдвига частот, а также окончательного определения скорости движения СТС с помощью ДДС:

$$F_D = \frac{2 \cos \gamma_0}{\lambda_0} \cdot V, \quad V = \frac{\lambda_0}{2 \cos \gamma_0} \cdot F_D. \quad (7)$$

Погрешности ДДС определяются тремя основными составляющими ошибок:

- ошибка определения длины волны излучаемого передатчиком сигнала (нестабильность длины волны или частоты излучаемого сигнала) при определении скорости СТС от ДДС;
- ошибка определения угла между вектором скорости СТС и осью симметрии диаграммы направленности передающей антенны ДДС;
- ошибка в измерении доплеровской частоты при определении скорости СТС от ДДС.

Общую СКП определения скорости СТС от ДДС можно представить в виде:

$$\sigma_{ДДС} = \sqrt{\sigma_\lambda^2 + \sigma_\gamma^2 + \sigma_{F_D}^2}, \quad (8)$$

где $\sigma_{ДДС}$ – общая СКП определения скорости СТС от ДДС; σ_λ – СКП определения скорости из-за ошибки определения длины волны излучаемого передатчиком сигнала; σ_γ – СКП определения скорости из-за ошибки определения угла между вектором скорости СТС и осью симметрии диаграммы направленности передающей антенны ДДС; σ_{F_D} – СКП определения скорости из-за ошибки в измерении доплеровской частоты при определении скорости СТС от ДДС.

1.3 Оптоэлектронный датчик скорости

Он измеряет время запаздывания τ_3 в приеме светочувствительными элементами датчика сигналов, отраженных от неоднородностей дорожного покрытия при освещении их источником света движущегося объекта (рис.

6). При этом чувствительные элементы (ЧЭ), расположенные на движущемся объекте, разнесены вдоль его продольной оси на строго определенном расстоянии l , один относительно другого. Тогда скорость движения СТС можно определить по формуле:

$$V = \frac{l}{\tau_3}, \quad (9)$$

Вместо двух ЧЭ, расположенных на определенном расстоянии друг от друга с постоянной базой L вдоль направления движения СТС, в оптоэлектронном датчике скорости используется один оптоэлектронный чувствительный элемент, в котором совмещены функции двух чувствительных элементов [6].

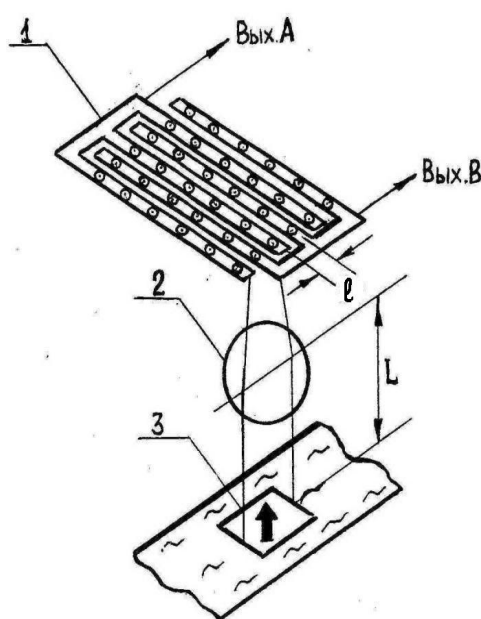


Рис. 6. Оптоэлектронный ЧЭ датчика скорости

Принцип действия оптоэлектронного ЧЭ поясняется с помощью рис. 6. Отраженные от микрорельефа дороги 3 импульсные сигналы, проходя через специальную линзу 2, попадают на матрицу светодиодов 1. Все светочувствительные диоды интегральной диодной матрицы размерностью 6×6 , которые используются в качестве ЧЭ, образуют шесть диодных линеек, разбитых на две параллельные группы A и B . Выходные сигналы с выходов линеек каждой группы сдвинуты друг относительно друга на время транспортного запаздывания τ_3 , которое определяется расстоянием между линейками L , равным шагу диодной матрицы и пропорционально скорости движения.

С помощью коммутации номеров линеек в группах диодов A и B можно менять значения базового расстояния L и тем самым изменять масштаб измерения скорости движения СТС.

При обработке сигналов оценивается не вся совокупность импульсов, поступающих с ЧЭ, а лишь отдельные, имеющие достаточно большие выбросы импульсы. Это позволяет значительно облегчить обработку результатов измерений.

К преимуществам оптоэлектронных ЧЭ с малой базой, используемых для построения ОЭДС, следует отнести следующие:

- не сказываются колебания скорости движения специального транспортного средства (неравномерность движения на малых отрезках), т.к. время τ_3 мало;

- в меньшей степени оказывают влияние на точность измерения скорости движения колебания по высоте СТС;

- не сказываются на результатах измерений скорости движения изменения микрорельефа дорожного покрытия.

Основные погрешности ОЭДС связаны с нестабильностью размеров базы L и точностью определения времени запаздывания τ_3 [7].

Проанализируем относительную погрешность определения скорости. Для этого продифференцируем выражение измерения скорости движения СТС (9):

$$\Delta V = \frac{\partial V}{\partial l} \Delta l + \frac{\partial V}{\partial \tau} \Delta \tau = \frac{1}{\tau} \Delta l - \frac{l}{\tau^2} \Delta \tau, \quad (10)$$

Переходя в выражении (10) к среднеквадратическим погрешностям, получим:

$$\sigma_{\Delta V}^2 = \frac{1}{\tau^2} \sigma_{\Delta l}^2 + \frac{l^2}{\tau^4} \sigma_{\Delta \tau}^2, \quad \sigma_{\Delta V}^2 = \frac{l^2}{\tau^2} \frac{\sigma_{\Delta l}^2}{l^2} + \frac{l^2}{\tau^2} \frac{\sigma_{\Delta \tau}^2}{\tau^2} \quad (11)$$

где $\frac{\sigma_{\Delta l}^2}{l^2}$ и $\frac{\sigma_{\Delta \tau}^2}{\tau^2}$ – относительные среднеквадратические погрешности определения Δl и $\Delta \tau$.

Учитывая, что $\tau = l/V$, перепишем выражение (11) в следующем виде:

$$\sigma_{\Delta V}^2 = V^2 \frac{\sigma_{\Delta l}^2}{l^2} + V^2 \frac{\sigma_{\Delta \tau}^2}{\tau^2} = V^2 \left(\frac{\sigma_{\Delta l}^2}{l^2} + \frac{\sigma_{\Delta \tau}^2}{\tau^2} \right), \quad (12)$$

Относительную погрешность определения $\Delta \tau$ электроника позволяет выбрать практически любой малости. Возьмем $\sigma_{\Delta \tau}/T = 1 \cdot 10^{-4}$.

Считая ΔV случайной величиной, определим $\sigma_{\Delta l}/L$, при условии, что за 4 часа движения СТС со средней скоростью $V = 12,5 \text{ км/ч} = 3,47 \text{ м/с}$, среднеквадратическая ошибка в пройденном пути составляла 20 м:

$$\sigma_{\Delta S} = t \sigma_{\Delta V}, \quad (13)$$

где $\sigma_{\Delta S}$ – среднеквадратическая ошибка (СКО) пройденного пути; $\sigma_{\Delta v}$ – СКО в определении скорости; t – время движения СТС, с.

Подставляя (13) в (14) получим:

$$\sigma_{\Delta S} = tV \sqrt{\frac{\sigma_{\Delta l}^2}{l^2} + \frac{\sigma_{\Delta \tau}^2}{\tau^2}}, \quad \frac{\sigma_{\Delta l}}{l} = \sqrt{\frac{\sigma_{\Delta S}^2}{t^2 V^2} - \frac{\sigma_{\Delta \tau}^2}{\tau^2}} \quad (14)$$

откуда относительная погрешность определения базы будет иметь вид:

$$\frac{\sigma_{\Delta l}}{l} = 3,9 \cdot 10^{-4}. \quad (15)$$

Для согласования выходных сигналов ОЭДС и МДС при их комплексировании базовое расстояние L не должно превышать номинальную цену импульса механического датчика. Однако, если выбрать базу ОЭДС равную номинальной цене импульса МДС, то в случае отсутствия характерной, четко выраженной неоднородности поверхности дороги (трещины, полосы, вкрапления, пятна и т.д.) информация от ОЭДС будет поступать не в каждом такте приема соответствующей информации от МДС. Поэтому с целью повышения достоверности при получении информации о скорости с помощью ОЭДС, последний должен производить 10-20 замеров на расстоянии, равном номинальной цене импульса МДС с последующим осреднением результатов измерений. С другой стороны, минимальное базовое расстояние ограничено микрорельефом дороги, т.е. размерами характерных, четко выраженных неоднородностей поверхности [5]. Используя условие (17), предъявим требования к составляющим среднеквадратической погрешности определения базы:

$$\sqrt{\sum_{i=1}^N \sigma_{\Delta li}^2} < 3,9 \cdot 10^{-4} l. \quad (16)$$

Для определения точных значений l требуется проводить калибровку ОЭДС при периодических регламентных испытаниях агрегата. Калибровка ОЭДС проводится одновременно с калибровкой ДДС.

1.4 Акселерометры

Акселерометры являются инерциальными приборами, предназначенными для измерения составляющих кажущегося ускорения движения (линейного или углового) центра масс объекта на выбранные направления. Выходные сигналы акселерометров интегрируются (дважды интегрируются) для получения информации о скорости объекта или пройденном пути. Акселерометры делятся на два типа гироскопические и негироскопические. По характеру движения инерционной массы различают маятниковые акселерометры и акселерометры с линейным перемещением инерционной массы (осевые).

Принцип работы акселерометров заключается в следующем: при движении с ускорением корпуса, на котором закреплен акселерометр, на инерционную массу действует инерционная сила m_a , которая вызывает смещение массы на величину d от исходного положения. В установившемся

ся положении инерционная масса уравнивается упругой силой, возникающей при деформации пружины или какого-либо другого демпфера.

В настоящее время в навигационных системах для СТС специального назначения наиболее широкое применение получили маятниковые акселерометры с поплавковым подвесом, которые представляют собой физический маятник, охваченный жесткой обратной связью по углу его поворота.

Схема маятникового акселерометра с поплавковым подвесом представлена на рис. 7. Он состоит из следующих основных элементов: инерционной массы (1); устройства обратной связи, состоящего из датчика угла ДУ (7), датчика моментов ДМ (3), усилителя обратной связи УОС.

Использование акселерометров в современных СТС позволяет определять ускорение подвижного объекта на начальном этапе его движения порядка 50 м или в течение 10 мин. Дальнейшее использование акселерометров приводит к большим погрешностям измерений.

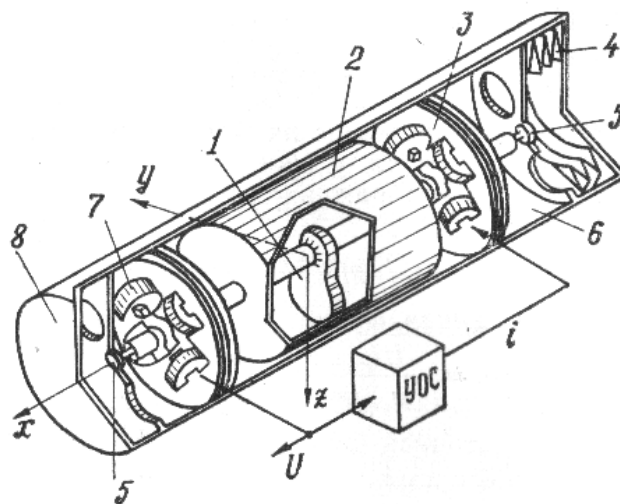


Рис. 7. Схема маятникового акселерометра с поплавковым подвесом:
 1 – маятник; 2 – поплавок; 3 – датчик моментов; 4 – сильфон;
 5 – цапфы поплавка; 6 – поддерживающая жидкость; 7 – датчик угла;
 8 – корпус

В настоящее время существует широкий спектр отечественных серийных акселерометров с характеристиками, обеспечивающими их применение в инерциальных навигационных системах. Важнейшими характеристиками акселерометров навигационного класса являются чувствительность и временная стабильность нулевого сигнала и масштабного коэффициента. Необходимым значениям этих характеристик отвечают поплавковые (интегрирующие) акселерометры, изготавливаемые по традиционным (макромеханическим) технологиям. Всем акселерометрам этой группы

присуща высокая стоимость, обусловленная сложными технологическими процессами их изготовления, чувствительность к ускорениям по перекрестным осям, отсутствие в некоторых моделях сервисной электроники или, наоборот ее усложнение.

В навигационных системах для СТС специального назначения наиболее широкое применение получили поплавковые маятниковые акселерометры. Помимо маятниковых акселерометров поплавкового типа, определенный интерес представляют маятниковые акселерометры компенсационного типа ДА-11, разработки Раменского приборостроительного конструкторского бюро и капиллярные маятниковые акселерометры компенсационного типа АК, разработки Арзамасского ОКБ «Темп».

Указанные акселерометры имеют следующие характеристики:

- диапазон измерений – до 100 g;
- порог чувствительности – $10^{-6}g$;
- частотный диапазон измерений – 0-60 Гц;
- диапазон рабочих температур – $-60 \div +80$;
- масса – 800г;
- нулевой сигнал – $\pm 1,5 \times 10^{-4}$.

Кроме макромеханических акселерометров разработаны отечественными и зарубежными фирмами и используются в различных изделиях интегральные, микромеханические и другие типы акселерометров, использующие более современные технологии и превосходящие по критерию «цена/качество» акселерометры «макромеханической» группы. Но они пока уступают по своим точностным характеристикам, что затрудняет их использование в системах инерциальной навигации.

Погрешности акселерометров подразделяют на методические и инструментальные, а последние – на статические и динамические. Соответствующей точной установкой акселерометров на стабилизированную платформу методическую погрешность сводят к пренебрежимо малой величине.

Статические погрешности характеризуются следующими основными составляющими:

- порог чувствительности обусловлен в основном сухим трением в подвесе чувствительного элемента и конечной разрешающей способностью датчика углов цепи обратной связи;

- смещение нуля акселерометра обусловлено вредными моментами в подвесе инерционной массы (моменты тяжения токоподводов и другие), отклонением исходного положения инерционной массы от положения электрического нуля датчиков углов и моментов, дрейфом усилителя обратной связи;

- нелинейность выходной характеристики и отклонение масштабного коэффициента акселерометра от номинала обусловлены изменением плеча маятника и коэффициента передачи усилителя обратной связи и дат-

чика моментов. Одними из способов повышения точности измерений являются калибровка, электрическое спаривание и группирование акселерометров.

2. Основы построения адаптивной СНН специального транспортного средства

Комплексирование различных датчиков и систем осуществляется на основе принципов информационной и структурной избыточности [4]. Исходя из этого, в составе путевой стойки СНН специальных ТС используются дополнительные аппаратные средства, которые обеспечивают синтез структур СНН, с отмеченными адаптивными свойствами.

На рис. 8 представлена структурная схема адаптивной путевой СНН, которая включает состав аппаратной части и управляющие сигналы:

БСУ – блок связи и управления; ДИ_{*i*}, *i*=1-*k* – датчики навигационной информации; СП – стойка путевая; ВК – вычислительный комплекс; *A_p* – вход, на который поступает код внешних команд, определяющих условия функционирования комплексированной навигационной системы; τ_n – сигнал переключения каналов.

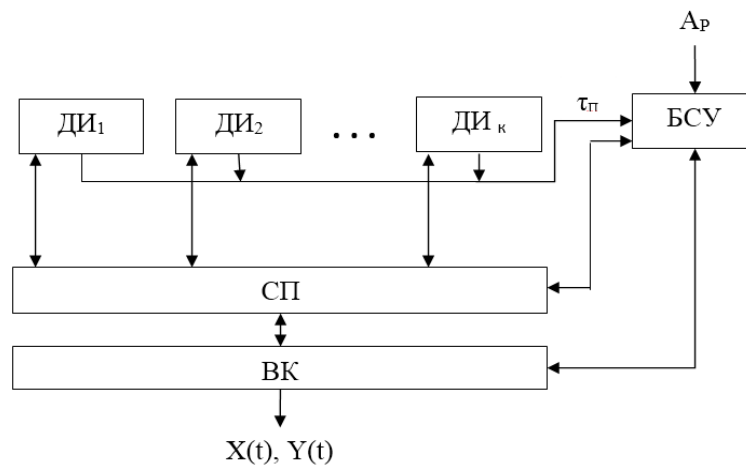


Рис. 8 - Структурная схема адаптивной путевой СНН

Важное место в рассматриваемой структуре занимает блок связи и управления. В основе метода адаптивного управления, используемого в указанном блоке, лежит применение цифрового автомата с памятью, имеющего: N_i входов – $u_1, u_2, \dots, u_N$; L внутренних переменных – $x_1, x_2, \dots, x_L$ и K выходов – $z_1, \dots, z_k$. Логическая часть БСУ выполнена на программируемых логических матрицах, память программ реконфигурации – на триггерах. Кроме этого, используются мультиплексоры в зависимости от количества датчиков навигационной информации.

Датчики навигационной информации должны иметь достаточно эффективные системы контроля, являющиеся основой для системы проведения реконфигурации адаптивной структуры СНН.

Принцип функционирования адаптивной путевой СНН заключается в следующем: информация с выходов ДИ_і работающих каналов поступает на информационные входы БСУ и на входы СП, на которую поступает также управляющий сигнал с БСУ, разрешающий прохождение информации через мультиплексоры в ВК.

В этом состоянии система находится до тех пор, пока не поступит на вход Ar новый код режима функционирования СНН или периодическая команда очередного переключения рабочих каналов τ_{II} в соответствии с функцией переключения $Y_{пері}$:

$$Y_{пері} = f(x_i, Ar, C_i, \tau_{II}), \quad (19)$$

где x_i – канал включен (выключен); C_i – канал исправен (неисправен), $i = 1, M$.

При отказе работающего канала или уменьшении точности определения им навигационных параметров по сигналу, поступающему из ВК, происходит срабатывание элементов логики БСУ в соответствии с функцией поддержания текущей конфигурации системы $Y_{ПОДі}$:

$$Y_{ПОДі} = f(x_i, Ar, C_i), \quad (20)$$

При изменении условий функционирования комплексированной системы навигации в соответствии с изменением значения кода на входе Ar в БСУ также происходит срабатывание элементов его логики и выполняется соответствующая реконфигурация структуры путевой СНН.

Сущность адаптивного управления заключается в следующем: несколько измерительных датчиков навигационной информации с различными физическими свойствами измеряют навигационные параметры СТС с целью обеспечения требуемой точности. Однако, нерасчетные внешние условия применения могут оказаться неблагоприятными для некоторых из них, и тогда возникает необходимость их исключения из процесса измерений указанных параметров. Кроме этого, в угрожаемый период может возникнуть необходимость отключения некоторых навигационных датчиков.

Использование адаптивного устройства рассматривается в составе комплекса основных средств и способов определения необходимых навигационных данных. Таким образом, при использовании рассмотренных дополнительных аппаратных средств появляется возможность организации адаптивной структуры путевой СНН.

Вывод

Адаптивный принцип построения путевой СНН позволяет решать следующие задачи:

- хранить в памяти информацию, поступающую от систем контроля датчиков СНН, измеряющих навигационные параметры СТС, об их работоспособности;
- определять находятся ли точностные параметры датчиков СНН в допустимых пределах;

- реагировать на команды и сигналы, определяющие изменения внешней обстановки, и перестраивать структуру СНН в соответствии с ними;
- обеспечивать при функционировании СНН требуемую точность определения координат $X(t)$, $Y(t)$ текущего местоположения СТС;
- определять длительность и периодичность работы каждого датчика в зависимости от условий функционирования СНН.

Список литературы

1. Попов А.П. Теория навигации. М.: Министерство обороны, 1982. 248 с.
2. Разоренов Г.Н. Введение в теорию оценивания состояния динамических систем по результатам измерений: учебное пособие. М.: Министерство обороны, 1981. 272 с.
3. Котов Н.И. Автоматизированные средства определения геодезических данных: учебное пособие для курсантов Серпуховского РВ ВИ. Серпухов, 2009. 183 с.
4. Кулешов В.В., Кутузов С.В., Макаров В.А. Патент на изобретение №2431847 от 01.2006. Способ определения скорости движения наземного транспортного средства.
5. Чистяков И.М., Берсенева Е.С. Анализ частных составляющих погрешности механического датчика скорости. Научно-технический журнал ФГУП «НПЦАП» М.: ФГУП «НПЦАП им. Н.А. Пилюгина», 2015. С. 37-43.
6. Кутузов С.В., Лупанчук В.Ю. Предложение по комплексированию измерителей системы навигации наземного транспортного средства с использованием оптоэлектронного датчика скорости. Научно-технический сборник «Известия» № 256 М.: Военная академия РВСН им. Петра Великого, 2014. С. 23-27.
7. Глушков В.М. Синтез цифровых автоматов. М.: Физматгиз, 1962. 209 с.
8. Кулешов В.В., Алимова Л.Л. Патент на изобретение № 2270477 от 12.06.2004. Многоканальное адаптивное устройство.

Лупанчук Владимир Юрьевич, канд. тех. наук, преподаватель, raketofflu@mail.ru, Россия, Балашиха, Военная академия РВСН им. Петра Великого,

Кулешов Владимир Васильевич, канд. тех. наук, доц., raketofflu@mail.ru, Россия, Балашиха, Военная академия РВСН им. Петра Великого,

Гончаров Владимир Михайлович, адъютант, vladimir-goncharov.1986@mail.ru, Россия, Балашиха, Военная академия РВСН им. Петра Великого

WAYS OF REDUCTION OF ERRORS IN THE SYSTEM OF THE GROUND NAVIGATION
OF A SPECIAL VEHICLE

V.Y. Lupanchuk, V.V. Kuleshov, V.M. Goncharov

In the article, the errors of the complex system of ground navigation of a special vehicle, which are obtained from various speed sensors, are investigated. An option is proposed to improve the accuracy of determining current navigation parameters when positioning the STS on the Earth's surface due to the additional use of an optoelectronic speed sensor and accelerometers of an inertial navigation system under adaptive navigation system control.

Key words: special vehicle, ground navigation system, mechanical speed sensor, Doppler speed sensor, optoelectronic speed sensor, accelerometer.

Lupanchuk Vladimir Yurievich, candidate of technical sciences, lecturer, raketoflu@mail.ru, Russia, Balashikha, Military Academy of the Strategic Missile Forces named after. Peter the Great,

Kuleshov Vladimir Vasilievich, candidate of technical sciences, docent, raketoflu@mail.ru, Russia, Balashikha, Military Academy of the Strategic Missile Forces named after. Peter the Great,

Goncharov Vladimir Mikhailovich, postgraduate, vladimir-goncharov.1986@mail.ru, Russia, Balashikha, Military Academy of the Strategic Missile Forces named after. Peter the Great

УДК 623

КАК СБИВАТЬ БЕСПИЛОТНЫЕ ЛЕТАТЕЛЬНЫЕ АППАРАТЫ

В.К. Зеленко

Необходимость поражения малоразмерных БПЛА чрезвычайно актуальна. В статье предлагается система поражения БПЛА стрельбой из 30-мм пушек ПВО при наличии дистанционных взрывателей на снаряде и посыле команды на взрыватель после вылета снаряда из ствола после замера фактической начальной скорости.

Ключевые слова: БПЛА (беспилотные летательные аппараты), скорость снаряда, дистанционный взрыватель, тензодатчик, эффективность поражения.

Каждый раз, рассуждая о проблеме сбития БПЛА, слышишь множество вариантов возможного решения этой проблемы, но почему-то каждый из них обладает серьезными недостатками, например:

- поражение БПЛА зенитными управляемыми ракетами комплексов «Панцирь» или «Тунгуска» и даже сухопутным «Корнетом» слишком дорого;

- стрельбой автоматическими 30-мм пушками 2А38 («Тунгуска» и «Панцирь») и даже 23-мм («Шилка») слишком неэффективно в связи с необходимостью прямого попадания в малоразмерную цель на дальностях и высоте более 2 км.

Швейцарская фирма «Эрликон» еще 25 лет назад демонстрировала сбитие малоразмерных воздушных целей своей 35-мм пушкой, имеющей надульное трехкатушечное устройство для записи V_0 каждого снаряда и выдачи команды дистанционному взрывателю при пролете третьей катушки.

На двухствольной пушке 2А38, установленной на «Панцире» на одном из стволов, тоже измеряется фактическая начальная скорость снаряда, однако замеренный параметр посылается в баллистический вычислитель для корректировки приводов наведения, но уже для последующих выстрелов. И, если так случится, что замеренная скорость принадлежит патрону, изготовленному на верхнем значении V_0 , а следующие патроны принадлежат партии, изготовленной на минимальном значении V_0 , то такая корректировка окажется более вредной, чем учет попросту среднего значения V_0 .

Учитывая, что тема «Форсайт» жива (дистанционный взрыватель к 30-мм снаряду) и предварительные стрельбы в Нижнем Тагиле показали фактическое увеличение в 3-4 раза эффективности поражения залегшей живой силы, можно добиться по-настоящему эффективного поражения малоразмерных БПЛА подобно фирме «Эрликон». Но в связи с отсутствием систем замера фактической скорости, вводится среднее значение V_0 и управляющая команда передается на расстоянии 20÷50 м после покидания снарядом ствола.

И здесь нельзя не учитывать следующее. Это разброс начальной скорости 30-мм снаряда. По ТУ он составляет 880^{+10}_{-20} м/сек. И, конечно, если мы не долетим до БПЛА 30 м или перелетим столько же, то эффективность поражения будет не так уж высока. Значит нельзя не мерить фактическую скорость вылета каждого снаряда с точностью хотя бы до 2 м и после чего посылать ее значение в виде времени подрыва во взрыватель «Форсайт».

Само собой напрашивается необходимость модернизировать датчик замера V_0 на пушке 2А38 по аналогии с 35-мм пушкой «Эрликон», то есть добавить в конструкцию третью катушку для подачи команды каждому снаряду времени подрыва.

Но почему-то продвижение темы «Форсайт» в область ПВО не осуществляется.

Возможна разработка новых специальных комплексов, в состав вооружения которых входят миниатюрные дешевые управляемые ракеты, несущие, скажем, термобарическую боевую часть или шрапнельную БЧ. Вписываются в такие комплексы и скорострельные минимального калибра (4,5÷5,45 мм) пулеметы с высокой начальной скоростью пули.

Кафедра СПВ ТулГУ по техническому заданию АО «КБП имени академика А.Г.Шипунова» провела НИР «Скорость», в которой была опробована схема замера фактической начальной скорости вылетающего снаряда. Замер производился с помощью тензодатчиков, наклеенных на наружной поверхности ствола. Способ замера отличается простотой и достаточной точностью. Датчики в отличие от устройства на пушке 2А38 и швейцарской «Эрликон» находятся вне зоны воздействия пороховых газов в период последействия. Система может достаточно легко монтироваться на действующих объектах.

Становится целесообразным разработать и испытать такую систему замеров фактической скорости вылета каждого снаряда на пушках 2А42, 2А72, 2А38, как более простую и надежную.

Естественно реализация этой задачи в связи с обеспечением управляемости неконтактным подрывом у цели позволит не только сбивать БПЛА, но и повысить эффективность поражения всех зенитных целей, включая крылатые ракеты, а также радикально увеличить эффективность поражения пушками 2А42 и 2А72 залегающей живой силы.

Список литературы

1. Проектирование спецмашин: учебник для вузов; под ред. М.В. Грязева; ТулГУ. Тула: Изд-во ТулГУ: Проектирование стрелково-пушечного вооружения (дополнительные главы) / А.Г. Шипунов [и др.]. 2010. 236 с.
2. Платонов Ю.П. Термогазодинамика автоматического оружия. КБП, Фил. "ЦКИБ СОО". М.: Машиностроение, 2009. 356 с.
3. Андреев С.Г., Бойко М.М., Селиванов В.В. Экспериментальные методы физики взрыва и удара. М: Физмат лит, 2013. 752 с.

Зеленко Виктор Кириллович, д-р техн. наук, starikov@taii@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

HOW TO CAMP WITHOUT BATTLINESS FLYING APPARATUSES

V.K. Zelenko

The need to defeat small-size UAV is extremely urgent. The article proposes a system for defeating UAVs by firing 30 mm air defense cannons with remote fuses on the projectile and sending a command to the fuse after the projectile leaves the trunk after measuring the actual initial speed.

Key words: UAV (unmanned aerial vehicles), sleep speed, remote fuse, strain gauge, damage efficiency.

Zelenko Victor Kirillovich, doctor of technical sciences, starikov@taii@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 534.6; 681.88

КОНТРОЛЬ РАЗВИТИЯ ДЕФЕКТОВ КЛАПАНОВ КОМПРЕССОРОВ ВОЗДУХОРАЗДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК МЕТОДОМ ВИБРОДИАГНОСТИКИ

А.А. Хвостов, В.В. Синюков, И.А. Казьмин, С.В. Пономарев

В работе представлен способ контроля дефектов клапанов компрессоров воздухоразделительных установок на основе исследования измерительной информации, которая формируется датчиками вибродиагностики и характеризует виброскорость, виброускорение механического воздействия на оборудование. Выполнен анализ спектров вибросигналов с использованием параметров модели компрессора, характеризующих развитие различных дефектов пневмооборудования.

Ключевые слова: вибродиагностика, измерительная информация, пневмооборудование, компрессор.

Анализ работы воздухоразделительных установок, используемых в Воздушно-космических силах ВС РФ, показал, что нештатная остановка установки при проведении компании чаще всего происходит из-за возникновения неисправностей в пневматических системах высокого давления. Основу этих систем составляют воздушные пятиступенчатые компрессоры типа АВШ, установлено, что основной причиной возникновения отказов в пневматической системе высокого давления является выход из строя клапанов всасывающей и нагнетательной магистралей. Известно что, производительность воздухоразделительной установки значительно зависит от исправности компрессорного оборудования, а эффективность работы компрессора существенно зависит от качества работы клапанов, дефекты которых приводят к снижению экономичности работы компрессора, уменьшению его КПД, значительному увеличению затрат энергии на производство сжатого до определенных давлений воздуха [1].

Поэтому, задача функционального контроля технического состояния клапанов, как наиболее критичных элементов компрессоров, является актуальной. Кроме того, с использованием измерительной информации, получаемой от систем вибрационной диагностики, основанных на использовании индивидуальных алгоритмов для обнаружения разных видов дефекта на начальной стадии его развития, представляется возможным проводить функциональную диагностику объектов в режиме штатной работы компрессора. Использование такого подхода позволит прогнозировать техническое состояние компрессорного оборудования не допустить отказов станции в критический момент.

Решение этой задачи требует разработки математической модели пневмооборудования, с учетом развития основных вероятных дефектов, что позволит в результате численных экспериментов выявить основные вибропризнаки неисправностей клапанов.

Рассмотрим синтез структуры математической модели поршневого компрессора с учетом работы клапанов для качественного описания характера виброакустического сигнала и его изменений при развитии дефектов клапанов. Ввиду необходимости получить качественное представление о характере спектров механических колебаний, возникающих в результате работы отдельных конструктивных элементов компрессора и в процессе их износа или разрушения, введем для описания допущения, соответствующие идеальному компрессору [2].

Математическая модель включает следующие элементы: поршень компрессора в цилиндре, совершающий движение под действием вынуждающей силы со стороны кривошипного механизма; всасывающий и нагнетательный клапаны компрессора, осуществляющие перемещение под действием силы, обусловленной разницей давлений в камере под поршнем и линией всасывания (нагнетания); объем камеры под поршнем, характеризующийся величиной давления (рис. 1).

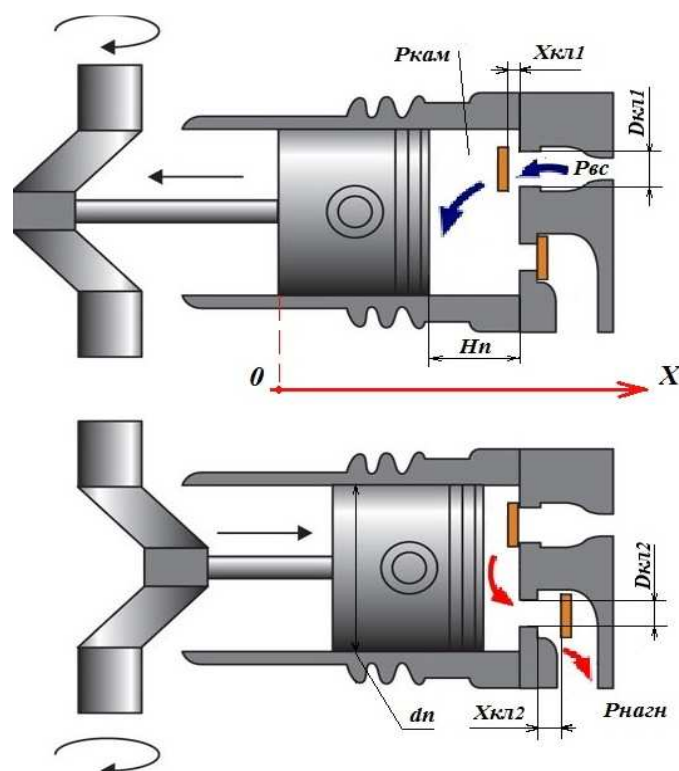


Рис. 1. Схема компрессора с указанием основных параметров, применяемых в математической модели

Уравнение движения поршня без учета изменения давления $P_{кам}$, обусловленного перемещением поршня и работой клапанов, запишется, исходя из баланса сил (компрессор находится в горизонтальном положении, проекция силы тяжести на ось x равна нулю) и модели сухого трения [3], запишется следующим образом:

$$m_n \frac{d^2 x}{dt^2} + \mu_{mp} \cdot m_n \cdot g \cdot \text{sign} \left(\frac{dx}{dt} \right) + S_n P_{кам} = F_{вын}, \quad (1)$$

где x – координата; m_n – масса поршня, площадь торцевой поверхности

$$\text{поршня } S_n \text{ sign} \left(\frac{dx}{dt} \right) = \begin{cases} 1, \text{ при } \frac{dx}{dt} > 0 \\ -1, \text{ при } \frac{dx}{dt} \leq 0 \end{cases}; \quad \mu_{mp} \text{ – коэффициент трения;}$$

$F_{вын}$ – сила, действующая со стороны кривошипного механизма.

В основу уравнения динамики $P_{кам}$ положено уравнение состояния для идеального газа при условии постоянной массы газа и изотермическом режиме [4]. Скорость изменения $P_{кам}$ запишется следующим образом:

$$\frac{dP_{кам}}{dt} = - \frac{P_{кам}}{V_{кам}} \frac{dV_{кам}}{dt}. \quad (2)$$

Объем камеры выразится с учетом «мертвого» объема камеры следующим образом:

$$V_{кам} = S_n H_k = S_n (H_n + H_{мо} - x), \quad (3)$$

где H_n – ход поршня, при этом ограничение на x : $0 \leq x \leq H_n$; $H_{мо}$ – перемещение по x , соответствующее «мертвому» объему камеры.

На рассматриваемом компрессоре АВШ-3,7/200 на I и II ступенях сжатия применяются клапаны самодействующие полосовые пластинчатые. В канале нагнетания открытие клапанов происходит при росте давления сжатого воздуха. При этом за счет перепада давлений $\Delta P = P_{кам} - P_{нагн}$ пластина прогибается, и ее края отходят от седла, воздух под давлением поступает в канал нагнетания [5].

Для обеспечения качественного соответствия реальным процессам использована упрощенная расчетная схема для самодействующих клапанов [4], в которой клапан заменяется условным отверстием без потерь на трение и теплообмен, и течение газа в клапане определяется площадями прохода $S_{кл1}$, $S_{кл2}$ (рис. 2).

Введем новую систему координат x_1 для первого клапана (линии всасывания), считая, что движение начинается с момента полного перекрытия $x_1 = 0$ до полного открытия клапана $x_1 = X_{кл1}$. Уравнение движения пластины клапана под действием сил тяжести, вязкого трения, жесткости пружины и инерции запишется следующим образом:

$$m_{кл1} \frac{d^2 x_1}{dt^2} + \tau_{кл1} \frac{dx_1}{dt} + c_{пр.кл1} x_1 = S_{кл1} (P_{вс} - P_{кам}), \quad 0 \leq x_1 \leq X_{кл1}, \quad (4)$$

где $m_{кл1}$ – масса пластины клапана; $\tau_{кл1}$ – коэффициент демпфирования клапана, зависит от конструкции клапана, вязкости и плотности газа, омы-

вающего пластину; $c_{пр.кл1}$ – коэффициент жесткости пружины; $S_{кл1}$ – площадь поверхности пластины клапана; $P_{вс}$ – давление линии всасывания.

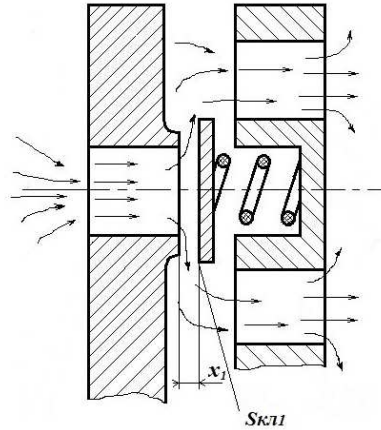


Рис. 2. Замена клапана условным отверстием без потерь на трение и без теплообмена

При движении пластины давление $P_{кам}$ в камере будет изменяться за счет истечения газа через отверстие сброса на величину $dP_{сбр}^{[1]}$. Запишем изменение давления в камере с использованием уравнения состояния. При постоянных объеме и температуре изменение давления будет обусловлено массой газа, убывающего через отверстие за время dt или массовому расходу через щель.

$$\frac{dP_{сбр}^{[1]} V^{[1]}}{RTdt} = G_{ист}^{[1]}, \quad (5)$$

где $V^{[1]}$ – объем линии всасывания, T – температура, R – универсальная газовая постоянная, $G_{ист}^{[1]}$ – расход газа через щель.

Тогда изменение давления за время dt составит

$$\frac{dP_{сбр}^{[1]}}{dt} = G_{ист}^{[1]} \frac{RT}{V^{[1]}}. \quad (6)$$

Количество газа, проходящего через переменное сечение, определится

$$G_{ист}^{[1]} = \rho S_{сеч}^{[1]}(x_1) v^{[1]}, \quad (7)$$

где $S_{сеч}^{[1]}(x_1)$ – переменное по координате x_1 сечение, ρ , $v^{[1]}$ – плотность и скорость газа.

В свою очередь, скорость газа определится разницей давлений, площадью сечения $S_{сеч}^{[1]}$ и гидравлическим сопротивлением $\xi^{[1]}$ участка. Скорость можно рассчитать следующим образом с учетом давлений в камерах

$$v^{[1]} = \sqrt{\frac{2(P_{вс} - P_{кам})}{\xi^{[1]} \rho}}. \quad (8)$$

Таким образом, с учетом возможности превышения давления в камере над давлением линии всасывания, и используя для расчета площади сечения отверстия истечения зависимость

$$S_{сеч}^{[1]} = \frac{x_1 \pi D_{кл1}^2}{4}, \quad (9)$$

где $D_{кл1}$ – диаметр клапана, изменение давления за время dt запишется в следующем виде

$$\frac{dP_{сбр}^{[1]}}{dt} = \rho S_{сеч}^{[1]}(x_1) \frac{RT}{V^{[1]}} \sqrt{\frac{2|P_{вс} - P_{кам}|}{\xi^{[1]} \rho}} \text{sign}(P_{вс} - P_{кам}), P_{сбр}^{[1]}(0) = P_{сбр0}^{[1]}. \quad (10)$$

Проводя аналогичные рассуждения, получим зависимости для изменения давления в камере за счет истечения газа через нагнетательный клапан и уравнение движения пластины клапана.

Объединяя полученные зависимости в одну расчетную схему, получим систему уравнений, описывающую работу компрессора с учетом работы всасывающего и нагнетательного клапанов:

$$\left\{ \begin{array}{l} m_n \frac{d^2 x}{dt^2} + \mu_{mp} \cdot m_n \cdot g \cdot \text{sign}\left(\frac{dx}{dt}\right) + S_n (P_{кам} + dP_{сбр}^{[1]} - dP_{сбр}^{[2]}) = F_{вын}; \\ \frac{dP_{кам}}{dt} = \frac{P_{кам}}{(H_n + H_{мо} - x)} \frac{dx}{dt}; \\ 0 \leq x < H_n; \\ m_{кл1} \frac{d^2 x_1}{dt^2} + \tau_{кл1} \frac{dx_1}{dt} + c_{пр.кл1} x_1 = S_{кл1} (P_{вс} - P_{кам}); \\ 0 \leq x_1 \leq X_{кл1}; \\ \frac{dP_{сбр}^{[1]}}{dt} = \rho \frac{x_1 \pi D_{кл1}^2}{4} \frac{RT}{V^{[1]}} \sqrt{\frac{2|P_{вс} - P_{кам}|}{\xi^{[1]} \rho}} \text{sign}(P_{вс} - P_{кам}); \\ m_{кл2} \frac{d^2 x_2}{dt^2} + \tau_{кл2} \frac{dx_2}{dt} + c_{пр.кл2} x_2 = S_{кл2} (P_{нагн} - P_{кам}); \\ 0 \leq x_2 \leq X_{кл2}; \\ \frac{dP_{сбр}^{[2]}}{dt} = \rho \frac{x_2 \pi D_{кл2}^2}{4} \frac{RT}{V^{[2]}} \sqrt{\frac{2|P_{нагн} - P_{кам}|}{\xi^{[2]} \rho}} \text{sign}(P_{нагн} - P_{кам}); \\ x(0) = x_0, \left. \frac{dx}{dt} \right|_{t=0} = x_{v0}, x_1(0) = x_{01}, \left. \frac{dx_1}{dt} \right|_{t=0} = x_{v01}, x_2(0) = x_{02}, \left. \frac{dx_2}{dt} \right|_{t=0} = x_{v02} \\ P_{кам}(0) = P_{кам0}, P_{сбр}^{[1]}(0) = P_{сбр0}^{[1]}, P_{сбр}^{[2]}(0) = P_{сбр0}^{[2]}. \end{array} \right. \quad (11)$$

где $x_2, m_{кл2}, \tau_{кл2}, c_{пр.кл2}, S_{кл2}, D_{кл2}, X_{кл2}, \xi^{[2]}, V^{[2]}, P_{сбр}^{[2]}$ – координата, масса, коэффициент демпфирования, жесткость пружины клапана, площадь, диаметр, ход, коэффициент гидравлического сопротивления, объем и перепад давления для нагнетательного клапана.

Для реализации полученной математической модели в качестве среды моделирования использована интерактивная графическая среда имитационного моделирования MathWorks Simulink™ [6]. Структурные модели основных элементов компрессора, преобразованы для реализации в среде MathWorks Simulink™ в соответствии с методикой [7]. Для численного интегрирования производных использовался метод Дорманда Принца 5-го порядка (ODE45 Dormand-Prince) из библиотеки MathWorks Simulink™.

Разработанная математическая модель позволяет, задаваясь параметрами компрессора, всасывающего и нагнетательного клапанов, получать временные характеристики амплитуды давления под поршнем компрессора, а также его виброскорости и виброускорения, передающиеся в виде механических воздействий на оборудование и фиксирующиеся датчиками вибродиагностики (пример на рис. 3).

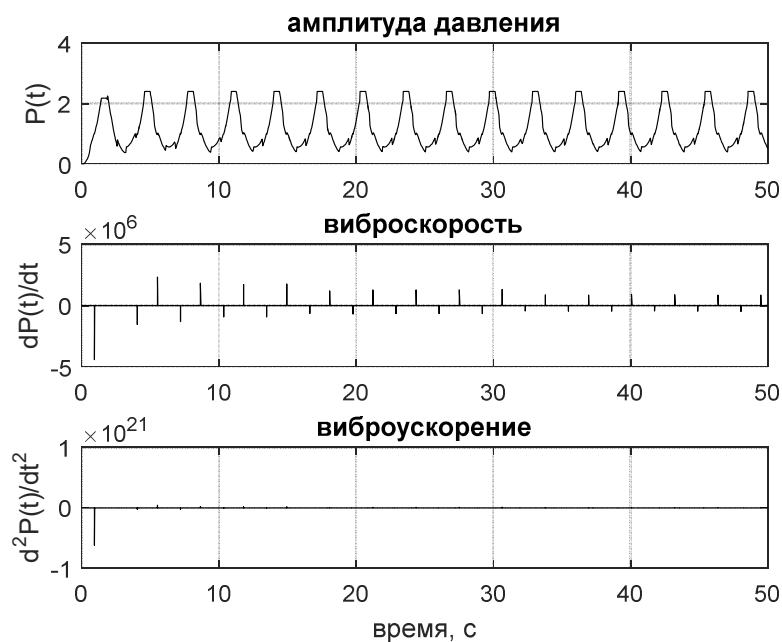


Рис. 3. Временные характеристики амплитуды давления под поршнем компрессора, а также его виброскорости и виброускорения

Для использования разработанной математической модели в задачах исследования изменения вибросигналов вследствие развития дефектов оборудования необходимо связать некоторые параметры математической модели с дефектами клапанов и задать их как математические модели развития дефектов в виде функций времени.

В качестве основных параметров, которые связаны с дефектами клапанов вследствие их износа или поломки использованы жесткость пружины клапана, площадь проходного сечения, время срабатывания и масса клапана. Варьирование этих параметров позволяет моделировать такие неисправности клапана как износ или поломка пружины клапана, его засорение, «залипание», недостаточное закрытие или открытие клапана и увеличение массы пластины вследствие загрязнения.

В таблице сведены основные дефекты клапанов и их математические модели, формализующие развитие дефекта во времени.

Математические модели основных неисправностей компрессора

№ п/п	Дефект клапана	Математическая модель
1	Износ пружины клапана	$c_{пр.кл1}(t) = v_{c1} \cdot t + c_{пр.кл1}^0,$ $c_{пр.кл2}(t) = v_{c2} \cdot t + c_{пр.кл2}^0,$ где v_{c1}, v_{c2} - скорости развития дефекта
2	«Недооткрытие» или «недозакрытие» клапана	$0 \leq x_1 \leq v_{X_{кл1}} t + X_{кл1}^0, 0 \leq x_2 \leq v_{X_{кл2}} t + X_{кл2}^0,$ $v_{X_{кл1}} t \leq x_1 \leq X_{кл1}, v_{X_{кл2}} t \leq x_2 \leq X_{кл2}^0,$ где $v_{X_{кл1}}, v_{X_{кл2}}$ - скорости развития дефекта
3	«Залипание» пластин клапана (запаздывание срабатывания)	$\tau_{кл1}(t) = v_{\tau_{кл1}} t + \tau_{кл1}^0, \tau_{кл2}(t) = v_{\tau_{кл2}} t + \tau_{кл2}^0$ где $v_{\tau_{кл1}}, v_{\tau_{кл2}}$ - скорости развития дефекта
4	Увеличение/уменьшение массы пластины	$m_{кл1}(t) = v_{m_{кл1}} t + m_{кл1}^0, m_{кл2}(t) = v_{m_{кл2}} t + m_{кл2}^0$ где $v_{m_{кл1}}, v_{m_{кл2}}$ - скорости развития дефекта

Выполнено исследование спектров вибросигналов при различных параметрах модели компрессора, которые характеризуют развитие того или иного дефекта. На рис. 4, 5 представлены спектральные характеристики системы (11) при различных значениях запаздывания времени срабатывания всасывающего клапана 0.5, 1 и 1.5 с.

Исследование спектров, которые получены на основе использования различных методов с помощью библиотеки Signal Processing Toolbox пакета MathWorks Matlab™, показало возможность выявления дефектов клапанов компрессора, моделируемых изменением параметров его математической модели. Показано, что в ряде случаев дефекты коррелируют с гармониками Фурье спектра виброускорения. В некоторых случаях изме-

нения в Фурье спектре, неразличимы на фоне помех и необходимо использовать помехоустойчивые фильтры. Например, для подавления помех и числовой оценки гармоничных компонентов сигнала удобно использовать алгоритм создания псевдоспектра на основе анализа собственных чисел и собственных векторов корреляционной матрицы сигнала типа MUSIC (MUltiple Signal Classification) [8], который позволяет получать, кроме того, пары частот и соответствующие мощности сигнала для последующей оценки их корреляции с дефектом клапана.

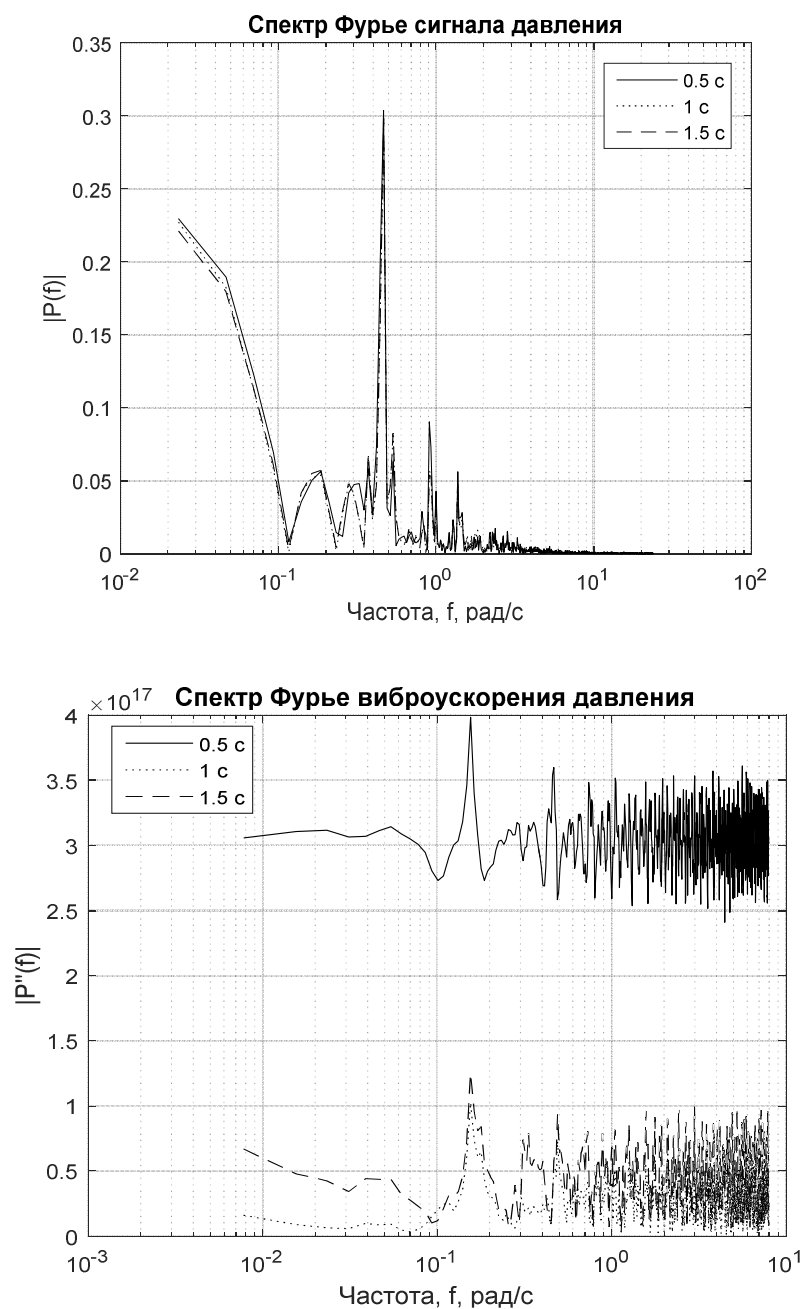


Рис. 4. Спектр Фурье сигналов давления под поршнем компрессора и его виброускорения при запаздывании времени срабатывания всасывающего клапана 0.5, 1 и 1.5 с

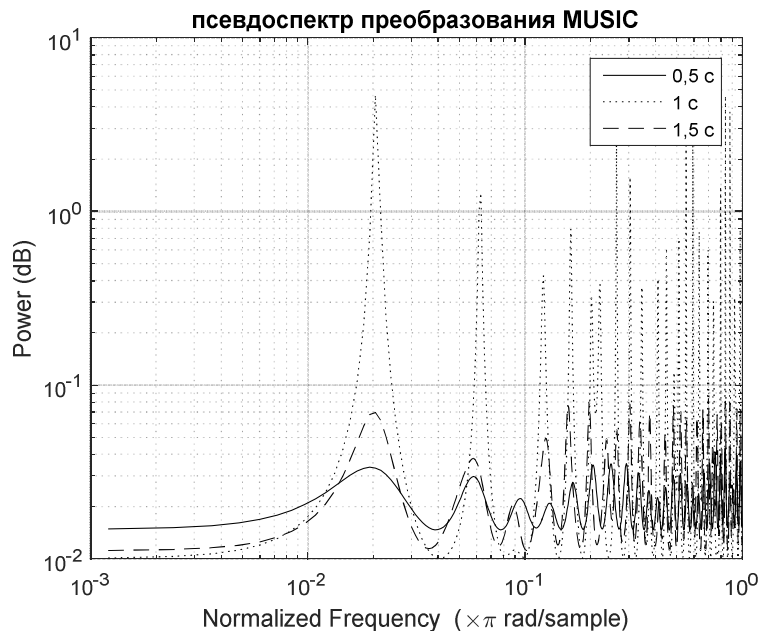


Рис. 5. Псевдоспектр преобразования MUSIC сигнала виброускорения

Например, для подавления помех и численной оценки гармонических компонентов сигнала удобно использовать алгоритм построения псевдоспектра на основе анализа собственных чисел и собственных векторов корреляционной матрицы сигнала типа MUSIC (Multiple Signal Classification) [8], который позволяет, кроме того, получать пары частот и соответствующих мощностей сигнала для последующей оценки их корреляции с дефектом клапана.

Таким образом, математические модели поршневого компрессора и дефектов всасывающего и нагнетательного клапанов, полученные в работе, дают возможность проводить вычислительные эксперименты, позволяющие качественно оценить влияние развития дефекта клапана на вид вибросигнала, снимаемого датчиками вибродиагностики с компрессора. Это позволит разработать методику обработки измерительной информации и целенаправленно подбирать датчики вибродиагностического оборудования по их метрологическим характеристикам, алгоритмы спектральных преобразований, а также оценивать влияние шумов на качество распознавания вибропризнаков развития дефектов клапанов поршневого компрессора.

Список литературы

1. Жарков А.Л., Козлов А.В. Воздухоразделительные установки. Автомобильная кислородазотодобывающая станция АКДС-70М2. Конструкция: учебное пособие. Воронеж: ВВАИУ, 2006. 157 с.
2. Кондратьев Т.Ф., Исаков В.П. Клапаны поршневых компрессоров. Л.: Машиностроение, 1983. 356 с.

3. Пластинин П.И. Поршневые компрессоры. Теория и расчет. М.: «Колосс», 2006. Т. 1. 456 с.
4. Монастыршин Р.И. Математическое моделирование сухого трения. Автоматика и телемеханика, 1958. Т. 19. Вып. 12. С. 1091-1106.
5. Григорьев В.А., Зорин В.М. Промышленная теплоэнергетика и теплотехника: справочник. М.: Энергоатомиздат, 1991. 2-е изд. 275 с.
6. Официальный сайт MathWorks [Электронный ресурс] URL: <http://matlab.ru/> (дата обращения: 02.04.2018).
7. Мещеряков В.В. Задачи по математике с Matlab&Simulink. М.: Диалог-МИФИ, 2007. 175 с.
8. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов: учебник для вузов. 2-е изд. СПб.: Питер, 2007. 227 с.

Хвостов Анатолий Анатольевич, д-р техн. наук, проф., khvtol1974@yandex.ru, Россия, Воронеж, Военный учебно-научный центр военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»,

Синюков Виктор Васильевич, канд. техн. наук, начальник отдела, sinukovhome@mail.ru, Россия, Воронеж, Военный учебно-научный центр военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»,

Казьмин Игорь Александрович, начальник электрогазовой службы командования военно-воздушных сил, kazminia@mail.ru, Россия, Москва, Главное командование Воздушно-космических сил,

Пономарев Сергей Васильевич, начальник комплекса, pnomsv@mail.ru, Россия, Воронеж, Военный учебно-научный центр военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»

CONTROL THE DEVELOPMENT OF DEFECTS VALVES COMPRESSORS OF AIR SEPARATION UNITS THE METHOD VIBRATION DIAGNOSTICS

A.A. Khvostov, V.V. Sinyukov, I.A. Kazmin, S.V. Ponomarev

The paper presents a method of defect inspection of air separation unit compressor valves based on the study of measuring information, which is formed by vibration diagnostics sensors and characterizes vibration velocity, vibration acceleration of mechanical impact on the equipment. The analysis of vibration signal spectra using the parameters of the compressor model characterizing the development of various defects of pneumatic equipment.

Key words: vibrodiagnostics, measuring information, pneumatic equipment, compressor.

Khvostov Anatoliy Anatolyevich, doctor of technical sciences, professor, khvtol1974@yandex.ru, Russia, Voronezh, Military educational scientific center air force «Air force Academy named after Professor N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin»,

Sinyukov Viktor Vasilyevich, candidate of technical sciences, head of department, sinyukovhome@mail.ru, Russia, Voronezh, Military educational scientific center air force «Air force Academy named after Professor N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin»,

Kazmin Igor Alexandrovich, head of the electro-gas service of the air force command, kazminia@mail.ru, Russia, Moscow, Main command of aerospace forces,

Ponomarev Sergey Vasilyevich, head of the complex, pnomsv@mail.ru, Russia, Voronezh, Military educational scientific center air force «Air force Academy named after Professor N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin»

УДК 355.7; 69.059.28

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СТОЙКОСТИ БЕТОНА СПЕЦИАЛЬНЫХ СООРУЖЕНИЙ ПРИ ИМПУЛЬСНЫХ НАГРУЗКАХ ВЗРЫВА

Д.П. Мандрица

Рассмотрены вопросы определения характеристик стойкости бетонов специальных сооружений в условиях воздействия взрывных нагрузок. Выполнены экспериментальные исследования воздействия ударной волны взрыва в ближней зоне действия на образцы бетона специальных сооружений. Построены экспериментально-теоретические зависимости для оценки максимальных деформаций и максимальных разрушающих нагрузок образцов бетона, подвергнутых воздействию взрывных нагрузок в ближней зоне.

Ключевые слова: стойкость бетона, специальные сооружения, напряженно-деформированное состояние, деформация, максимальные нагрузки.

В настоящее время предъявляются повышенные требования к живучести несущих конструкций и специальных сооружений стартовых комплексов (СК), эксплуатируемых в условиях сложного статического и динамического нагружений. Современный опыт проектирования таких сооружений свидетельствует о том, что основываясь только на теоретических исследованиях весьма сложно построить математическую модель поведения (деформирования) бетонных (железобетонных) конструкций при различных нагрузках и воздействиях. Поэтому в процессе проектирования, строительства и эксплуатации специальных сооружений СК проводятся обширные экспериментальные исследования как на физических моделях, так и в натурных условиях, а затем по результатам испытаний строится или уточняется математическая модель исследуемого объекта. Методы построения математических моделей являются предметом теории идентификации.

Процесс идентификации предполагает использование априорной информации для определения вида и структуры модели, и, во-вторых, обработку данных измерений для получения необходимой апостериорной информации об исследуемом объекте.

Характеристики физико-механических свойств бетонов (железобетона) используемых при создании несущих конструкций стартовых сооружений СК РКК являются исходной информацией для назначения расчетных характеристик как при проектировании, так и при эксплуатации таких сооружений. Основным источником получения указанных величин являются обширные лабораторные и натурные испытания образцов бетона и железобетона с последующей обработкой результатов экспериментальных исследований.

Существующие на сегодня модели деформирования бетона (железобетона) [1-8] учитывают динамические нагрузки, вызванные аварийными или производственными взрывами, сейсмическими воздействиями, порывами ветра, малоцикловыми перегрузками и т. п. Динамические свойства бетона исследовались в работах А.А. Гвоздева, Ю.М. Баженова, В.С. Удальцова, И. К. Белоброва, В. И. Щербины, А. Л. Амбарцумяном и др.

При действии внезапно приложенных импульсных нагрузок в несущих бетонных и железобетонных конструкциях возникают значительные пластические напряжения и деформации, которые больше чем при статическом их приложении. В работах [1-6,11,12] установлен факт повышения прочностных показателей бетона и арматуры при высокоинтенсивной динамической нагрузке. Отмечается, что механические свойства высокопрочных бетонов и арматуры значительно отличаются от свойств мягких сталей и среднемарочных бетонов.

Для тяжелых бетонов в работе [2] получена зависимость для коэффициента динамического упрочнения бетона k_{bd}

$$k_{bd} = 1,58 - 0,35 \lg \tau_{\max} + 0,07 (\lg \tau_{\max})^2,$$

где $k_{bd} = R_{bd} / R_b$; R_{bd} – расчетное сопротивление бетона сжатию при динамическом упрочнении; $\tau_{\max}$ – время нагружения до момента разрушения.

В работе [3] установлено запаздывание разрушения бетона, время задержки разрушения $\tau_{з,р}$ связано с перенапряжением

$$\lg \tau_{з,р} = 7,55 - 4,88 R_{bd} / R_b.$$

Предложенные в данных работах модели механических свойств бетона могут быть использованы только при оценке надежности бетонных и железобетонных конструкций. Для оценки живучести (стойкости) несущих конструкций используются следующие группы показателей: системные запасы прочности; компенсационные характеристики; характеристики ин-

тенсивности деградации. Учитывая, что после аварийного воздействия несущие конструкции специальных сооружений продолжают испытывать эксплуатационные нагрузки необходимо учитывать в составе первой группы показателей живучести характер и величину деформаций и остаточную прочность бетона (железобетона) после аварийного воздействия.

Основной целью экспериментально-теоретических исследований было выявление особенностей работы образцов бетона после действия импульсной нагрузки взрыва зарядов ВВ компактной формы.

Основными задачами экспериментально-теоретических исследований явились:

1. Анализ характера деформирования и образцов бетона классов В20, В30, В40 при действии импульсной нагрузки взрыва.
2. Построение диаграмм деформирования образцов бетона различных классов после воздействия импульсной нагрузки взрыва заряда ВВ.

Методика эксперимента. В качестве образцов бетона принимались бетонные кубы размерами 70*70*70 мм классов В20, В30 и В40. В качестве варьируемого фактора использовалась высота подвеса заряда ВВ, которая составляла 20,30,40 и 50 см.

Схема приложения импульсных нагрузок представлена на рис.1.



Рис. 1. Схема приложения импульсных нагрузок

Образцы бетона после испытания импульсной нагрузкой взрыва зарядов ВВ представлены на рис.2.



Рис. 2. Образцы бетона после испытания импульсной нагрузкой взрыва зарядов ВВ

Отдельные результаты статических испытаний образцов бетона различных классов представлены на рис.3.

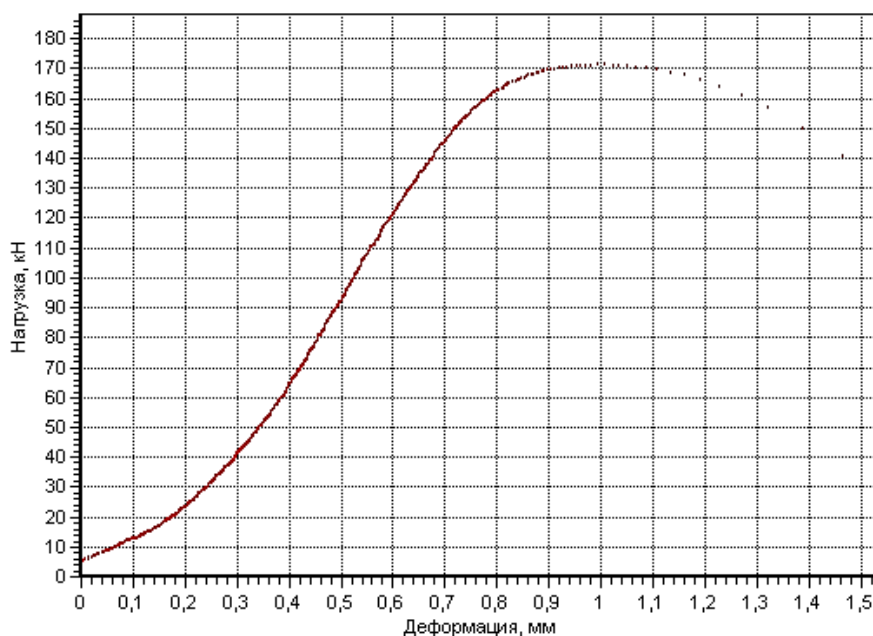


Рис. 3. Высота подвеса ВВ 20 см, бетон В30

Анализ экспериментальных исследований позволил построить регрессионные зависимости для максимальных деформаций образцов бетона и максимальных нагрузок, выдерживаемых ими до разрушения (рис. 4,5).

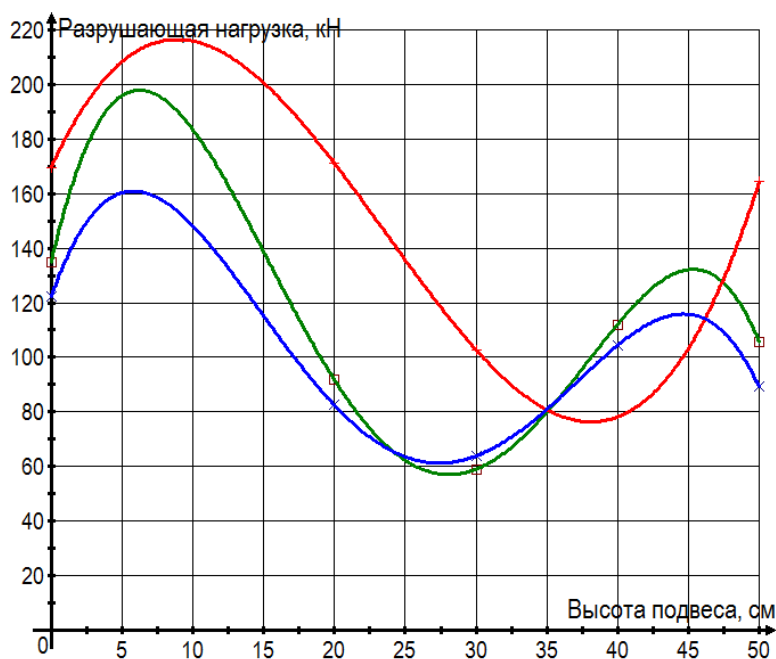


Рис. 4. График разрушающей нагрузки образцов бетона:
— бетон В20, — бетон В30, — бетон В40

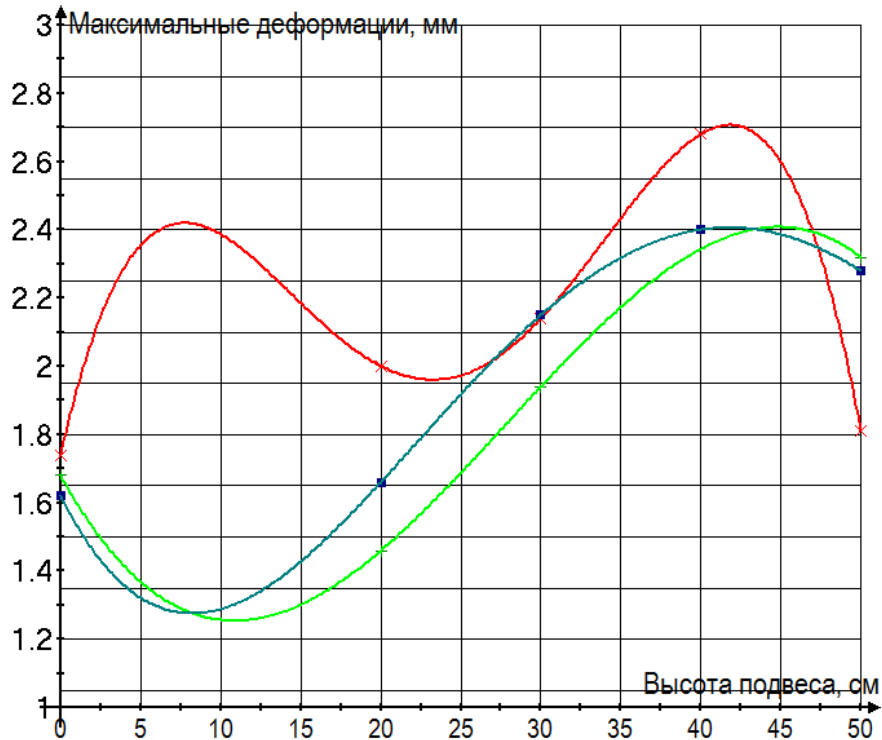


Рис. 5. График для максимальной деформации образцов бетона:
× × × × - бетон В20, + + + + - бетон В30, ■ ■ ■ ■ - бетон В40

Разрушающие нагрузки:

Бетон В20

$$F = -(7,18 \cdot 10^{-4}) h^4 + 0,02 \cdot h^3 - 0,041 \cdot h^2 + 0,386 \cdot h + 1,08.$$

Бетон В30

$$F = -(3,07 \cdot 10^{-5}) h^3 + 0,003 \cdot h^2 - 0,068 \cdot h - 0,068 \cdot h + 1,42.$$

Бетон В40

$$F = -(4,817 \cdot 10^{-6}) h^4 + (5,31 \cdot 10^{-4}) \cdot h^3 - 0,018 \cdot h^2 + 0,179 \cdot h + 1,17.$$

Максимальные деформации.

Бетон В20 × × × ×

$$Y(x) = -(7,02 \cdot 10^{-6}) \cdot h^4 + (6,81 \cdot 10^{-4}) \cdot h^3 - 0,021 \cdot h^2 + 0,21 \cdot h + 1,74.$$

Бетон В30 + + + +

$$Y(x) = -(3,07 \cdot 10^{-5}) \cdot h^3 + 0,003 \cdot h^2 - 0,068 \cdot h + 1,42.$$

Бетон В40 ■ ■ ■ ■

$$Y(x) = -(4,817 \cdot 10^{-6}) \cdot h^4 + (5,31 \cdot 10^{-4}) \cdot h^3 - 0,018 \cdot h^2 + 0,179 \cdot h + 1,17.$$

Выводы.

1. Характер деформаций и разрушений бетонных образцов после воздействия импульсных нагрузок взрыва носит неравномерный характер с наличием сколов по различным плоскостям.

2. Анализ диаграмм деформирования образцов бетона показывает, что на начальной стадии характерна значительная пластическая деформация бетона. Данная тенденция обусловлена уплотнением бетона за счет мини трещин, образовавшихся после воздействия импульсной нагрузки взрыва.

3. Максимальные деформации образцов бетона не превышают 2.4 мм при относительной деформации $\epsilon_b = 0.033$.

4. Максимальные нагрузки при статических испытаниях в бетонных образцах после воздействия импульсных нагрузок не превышают 135 кН, допустимые напряжения 24 Мпа.

Список литературы

1. Амбарцумян А.Л. К исследованию закона деформации бетона при скоростном и кратковременном нагружении. Вестник трудов ВИА. № 1431959. С. 15-20.

2. Баженов Ю.М. Бетон при динамическом нагружении. М., 1970. 372 с.

3. Баженов Ю.М., Удальцов В.С. Об эффекте задержки разрушения бетона на при динамическом нагружении. В кн.: Материалы XV итоговой научно-исследовательской конференции ВНО ВИКА. М., 1964. Вып. 11. С. 8-11.

4. Байков В.Н., Горбатов Е.В., Димитров З.А. Построение зависимости между напряжениями сжатого бетона по системе нормируемых показателей. Изв. Вузов. Сер. Строительство и архитектура, 1977. № 6. С. 75-84.

5. Белобров И.К. Особенности деформирования железобетонных балок при действии кратковременных динамических нагрузок. В кн.: Теория железобетона: М., 1972. С. 75-84.

6. Белобров И.К., Щербина В.И. Влияние быстрых загрузений на прочность железобетонных балок. В кн.: Влияние скорости нагружения, гибкости и крутящих моментов на прочность железобетонных конструкций. М., 1970. С. 37-87.

7. Ильин О.Ф., Попов Г.И. Прочность нормальных сечений железобетонных элементов из бетонополимера. М., 1978. Вып. 158. С. 38-43.

8. Котляревский В.А. Анализ работы импульсивно нагруженных балок с учетом запаздывания динамической текучести // Строительная механика и расчет сооружений, 1980. № 2. С. 59-62.

9. Котляревский В.А. Динамический расчет балки за пределом упругости с учетом эффектов скоростного деформирования // Строительная механика и расчет сооружений, 1979. № 6. С. 48-55.

10. Попов Г.И. Динамика короткого стального стержня с неоднородными свойствами запаздывающей текучести по его длине. ПМТФ, 1977. № 6. С. 149 – 154.

11. Попов Г.И. Железобетонные конструкции, подверженные действию импульсных нагрузок. М.: Стройиздат, 1986. 128 с.

Мандрица Дмитрий Петрович, канд. техн. наук, доц., MANDRIZA66@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия Им. А.Ф.Можайского

DEFINITION OF PARAMETERS OF FIRMNESS OF CONCRETE OF SPECIAL
CONSTRUCTIONS AT PULSE LOADINGS OF EXPLOSION

D.P. Mandritsa

In article questions of definition of characteristics of firmness of concrete of special constructions in the conditions of influence of explosive loadings are considered. Experimental researches of influence of a shock wave of explosion in a near operative range on samples of concrete of special constructions are executed. Experimentally-theoretical dependences for an estimation of the maximum deformations and the maximum ultimate loads of samples of concrete subjected to influence of explosive loadings in a near zone are constructed.

Key words: firmness of the concrete, the special constructions, the is intense-deformed condition, deformation, the maximum loadings.

Mandritsa Dmitry Petrovich, candidate of technical sciences, docent, MANDRIZA66@mail.ru, Russia, St. Petersburg, Mozhaisky Military Space Academy

АЛГОРИТМ ЗАЩИТЫ ОТ СПУФФИНГА АППАРАТУРЫ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ СПУТНИКОВЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Н.С. Рубцов

Представлен алгоритм защиты навигационных приёмников космического базирования от подмены радионавигационного поля. Ключевым элементом работы алгоритма является многослойная искусственная нейронная сеть, обученная на распознавание ложного радионавигационного сигнала. Работа алгоритма направлена на выявление ложного сигнала ГНСС и определение его параметров. Особенностью предложенного алгоритма является возможность восстановления достоверных навигационных определений.

Ключевые слова: защита от спуффинга, помехозащищённый навигационный приёмник, восстановление навигационных определений.

Одним из важнейших видов обеспечения полёта космических аппаратов (КА) является навигационно-баллистическое обеспечение. Полное развёртывание орбитальной группировки глобальной навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС позволяет рассмотреть применение навигационной аппаратуры потребителя (НАП) ГНСС ГЛОНАСС для обеспечения оперативной и высокоточной навигации отечественных космических аппаратов. Несмотря на большой положительный опыт обеспечения навигации КА наземными средствами измерения текущих навигационных параметров (ИТНП) наземного автоматизированного комплекса управления, будущее навигационно-баллистического обеспечения КА за автономной навигацией, обеспечиваемой бортовыми измерительными средствами [1, 2].

Значительное влияние на качество выполнения целевых задач космическими аппаратами оказывает точность знания ими своего местоположения, ориентации и времени. С этой точки зрения, применение НАП ГНСС ГЛОНАСС открывает широкие возможности по точному и непрерывному навигационно-баллистическому обеспечению КА с высотами орбит ниже 2000 километров, т.к. для данного класса потребителей навигационное поле будет непрерывным [3].

Учитывая важность решаемых КА задач и стоимость космических программ, при введении в контур навигационно-баллистического обеспечения информации НАП ГНСС, необходимо обеспечить высокую помехозащищённость навигационного приёмника. В противном случае, использование недостоверных результатов решения навигационной задачи по измерениям сигналов ГНСС может привести к срыву выполнения КА задач по предназначению.

Существует ряд методов повышения помехоустойчивости радиоэлектронных систем, однако ни один из них не является универсальным [4].

С другой стороны, применение нескольких методов повышения помехоустойчивости НАП влечёт за собой значительное усложнение аппаратной части приёмника, его массогабаритных характеристик и энергопотребления. Кроме того, способность навигационного приёмника функционировать в условиях радиоэлектронного подавления не защищает его от активно развивающегося вида имитирующих помех, в зарубежной литературе называемых спуффингом [5]. Определение местоположения КА по ложным сигналам может привести не только к срыву выполнения им целевой задачи, но и его потере или столкновению его с другими космическими объектами.

Скрытая замена истинного сигнала ГНСС ложным, позволяет злоумышленнику ввести потребителя ГНСС в заблуждение о его местоположении, скорости и текущем времени. Исключая простейшие методы подмены навигационного поля, обнаружение такой имитационной помехи требует ещё большего усложнения алгоритмов функционирования и модификации аппаратной части НАП. Ещё одним принципиальным требованием к алгоритмам защиты от спуффинга является их способность к восстановлению достоверных навигационных определений.

Таким образом, в настоящее время, складывается противоречие между возможностью удовлетворения перспективных требований к оперативности и точности навигационно-баллистического обеспечения КА, с одной стороны, и несовершенством алгоритмической базы НАП отечественных КА в части касающейся защиты от воздействия имитирующих помех. Указанное противоречие не позволяет рассматривать НАП ГНСС в качестве основного источника навигационной информации бортового комплекса управления КА.

В связи с этим, в целях осуществления возможности включения информации, предоставляемой ГНСС в технологический цикл управления КА, актуальной является задача разработки надёжных алгоритмов обработки сигналов ГНСС в условиях воздействия помех.

Принцип формирования априорной информации о состоянии орбитальной группировки ГНСС

Разработанный алгоритм защиты от спуффинга сигналов глобальных навигационных спутниковых систем на основе априорной информации о состоянии орбитальной группировки базируется на применении искусственной нейронной сети типа «многослойный персептрон» (*Multi-Layer Perceptron – MLP*) для принятия решения об истинности сигнала [6]. На основе *MLP* строится классификатор (далее *MLP*-классификатор) методом обучением с учителем [6]. На этапе проектирования программы или устройства, реализующего алгоритм, производится настройка свободных

параметров *MLP*-классификатора. На этапе применения *MLP*-классификатора синоптические веса и пороговые смещения искусственных нейронов фиксируются и на основе обработки рабочего входного вектора со свободными параметрами формируется отклик *MLP*-классификатора. Схема подготовки входных данных и вычисления отклика приведена на рис. 1.

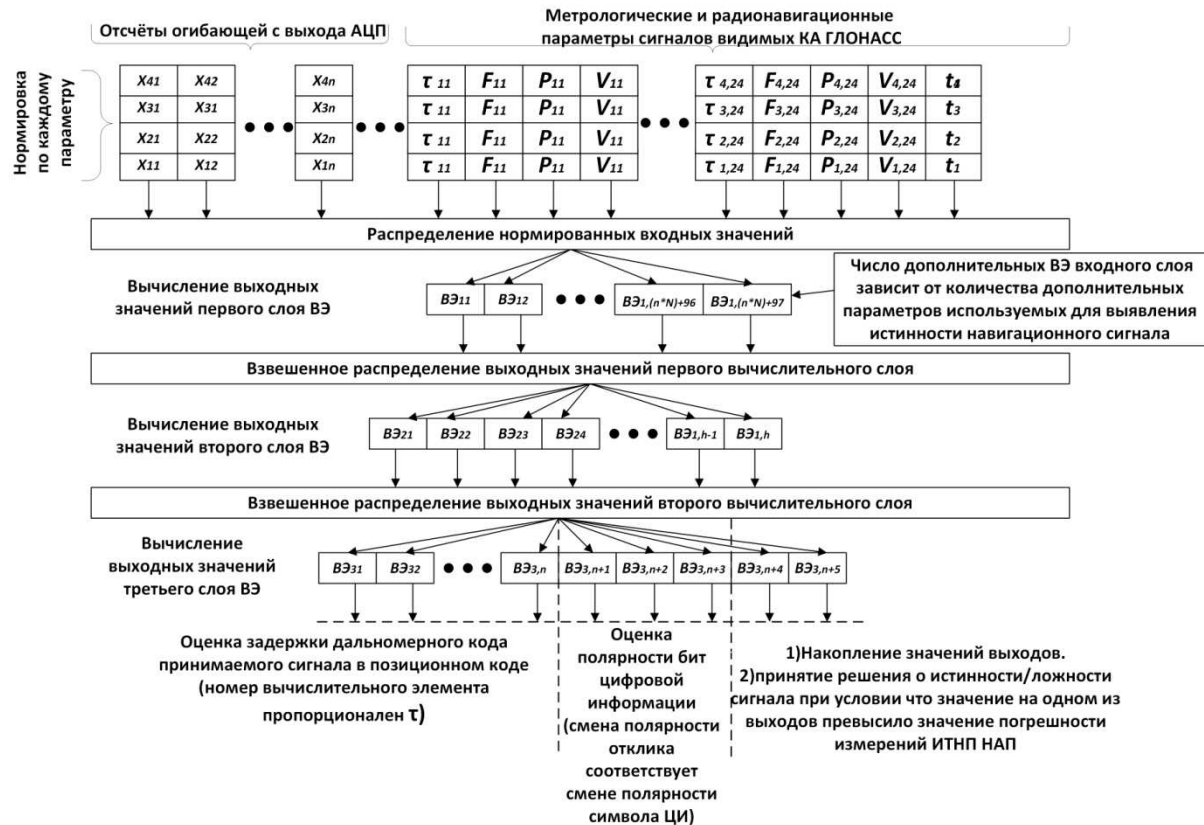


Рис. 1. Подготовка входных данных, вычисление отклика и его интерпретация

В качестве обучающей выборки используются множество векторов обучающих примеров $X \in N$ и множество целевых векторов $T \in N$. Данные для векторов обучающих примеров получаются путём моделирования радионавигационного поля при взаимном движении орбитальной группировки навигационных КА (НКА) системы ГЛОНАСС и КА-потребителя навигационной информации.

Состав векторов обучающих примеров определяется следующим образом:

- первые $n \cdot M$ разрядов представляют собой конкатенированные отсчёты символов дальномерного кода (ДК) навигационного сигнала, где n - длина периода ДК [символов], M – количество периодов ДК.

- вторые 97 разрядов представляют собой данные о четырёх параметрах (задержке ДК τ , частоте доплеровского сдвига F_D , мощности сигнала P и признака видимости потребителем НКА V) для всех двадцати четырёх НКА ГЛОНАСС, плюс значение текущего времени. Таким образом, размер одного вектора обучающего примера L_x составляет

$$L_x = nM + 97.$$

Состав целевых векторов условно разделяется на три части:

- первая группа разрядов равна длительности периода ДК n и в позиционном коде кодирует оценку задержки дальномерного кода таким образом, что значение «1» в k -том разряде равно циклическому сдвигу ДК (в векторе обучающего примера) на k позиций. При этом, значение остальных разрядов равно «0»;

- размерность следующей группы равна количеству накапливаемых периодов N помноженному на два, каждые два разряда в позиционном коде несут информацию о полярности символа цифровой информации, таким образом, что значение «1» в первом из пары разрядов означает положительную полярность, а значение второго разряда из пары равно «0» и наоборот, соответственно, при отрицательной полярности символов;

- третья группа, состоящая из двух разрядов, несёт информацию о гипотезе наличия/отсутствия ложного сигнала. Сочетание значения «1» и «0» соответствует признаку наличия ложного сигнала ГНСС, а сочетание «0» и «1» свидетельствует об отсутствии ложного сигнала.

Таким образом длина целевого вектора определяется как:

$$L_T = n + 2M + 2.$$

На рис. 2 приведён пример целевого вектора.



Рис. 2. Пример целевого вектора и его интерпретация

После формирования обучающей выборки производится настройка классификатора выбранным алгоритмом машинного обучения. При определении количества слоёв вычислительных элементов, размерностей скрытых слоёв *MLP*-классификатора и количества обучающих примеров рекомендуется пользоваться эвристическими рекомендациями по улучшению работы классификаторов на основе многослойных персептронов [6].

На этапе применения настроенного *MLP*-классификатора в составе алгоритма классификатор принимает на вход нормированные входные вектора, сформированные из отсчётов с выхода АЦП и информации из колец слежения и формирует отклик, интерпретируемый формату, описанному на рис. 2.

Логика работы алгоритма и восстановление достоверных навигационных определений

На рис. 3 представлена блок-схема разработанного алгоритма.

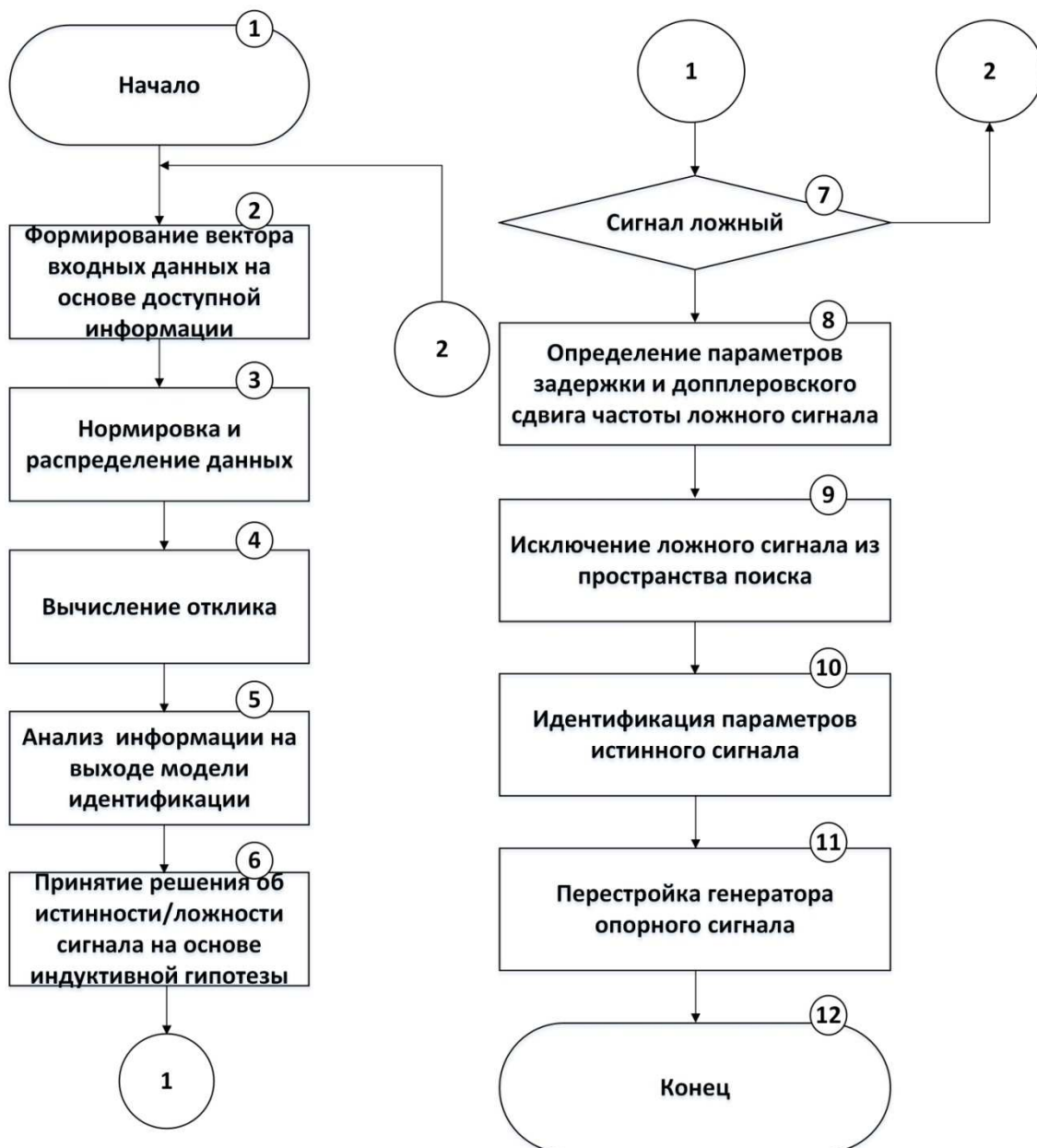


Рис. 3. Алгоритм защиты от спуффинга сигналов глобальных навигационных спутниковых систем на основе априорной информации о состоянии орбитальной группировки

На шаге 2 происходит формирование вектора входных данных на основе информации с выхода АЦП и колец слежения за задержкой и частотой.

На шаге 3 сформированный входной вектор нормируется по каждому параметру отдельно (по столбцам массива входной информации) и подаётся на распределительный слой классификатора.

На шаге 4 происходит послойное вычисление отклика *MLP*-классификатора. Время вычисления отклика зависит от реализации алгоритма (программное или аппаратное исполнение).

На шаге 5 происходит интерпретация отклика согласно группам разрядов выходного слоя классификатора.

На шаге 6, после получения отклика на выходе *MLP*-классификатора принимается решение о наличии/отсутствии ложного сигнала на входе НАП ГНСС. В случае принятия решения об отсутствии ложного сигнала шаги 2-6 повторяются.

На шаге 7, в зависимости от решения, принятого на шаге 6 происходит либо переход к пункту 2, в случае принятия решения об отсутствии на входе НАП ложного навигационного сигнала, либо работа алгоритма продолжается.

При успешном перехвате ложным сигналом ГНСС колец слежения НАП в пространстве поиска сигнала по доплеровскому сдвигу частоты и задержке дальномерного кода сложится ситуация приведённая на рис. 4.



Рис. 4. Истинный и ложный сигнал в пространстве поиска по частоте и задержке

Условием перехвата колец слежения НАП является превышение мощности ложного сигнала над мощностью истинного сигнала примерно на 1,5 дБ при равенстве остальных параметров [7]:

$$P_l > P_u, \tau_l \approx \tau_u, F_{D_l} \approx F_{D_u},$$

где P_l – мощность ложного сигнала, P_u – мощность истинного сигнала, τ_l – задержка ДК ложного сигнала, τ_u – задержка ДК истинного сигнала, F_{D_l} – доплеровский сдвиг частоты ложного сигнала, F_{D_u} – доплеровский сдвиг частоты истинного сигнала.

Однако в процессе навязывания потребителю ложных навигационных определений, в общем случае:

$$P_l > P_u, \tau_l \approx \tau_u, F_{D_l} \approx F_{D_u}.$$

Навязав КА-потребителю ложную траекторию (подставляя в ложный сигнал недостоверные эфемериды и нарушенные кодового-фазовые соотношения), постановщик имитирующей помехи невольно вынужден нарушить геометрические соотношения взаимного движения источника и потребителя навигационного сигнала, имеющие для КА повторяющийся закон изменения. В таком случае на выходе автоматической регулировки усиления НАП истинный сигнал в пространстве поиска, отстоящий от ложного по частоте доплеровского сдвига и задержке ДК (рис. 4), будет нормирован по уровню более мощного ложного сигнала.

В описанной ситуации следящие системы НАП, на шаге 8, осуществляют непрерывную оценку ложного сигнала.

На шаге 9 начинается исключение параметров ложного навигационного сигнала из пространства допоиска.

На шаге 10 классификатор, анализируя информацию с выхода АЦП оценивает значение задержки истинного сигнала, осуществляет допоиск слабого истинного сигнала алгоритмом *MLP*-классификации [8].

На шаге 11, на основе идентифицированных параметров истинного сигнала происходит подстройка опорного генератора и генератора дальномерного кода, с целью восстановления достоверных навигационных определений.

Слежение за ложным сигналом продолжается до момента его исчезновения, который определяется невозможностью продолжения оценивания его параметров следящим измерителем. После срыва слежения за параметрами ложного сигнала работа алгоритма повторяется.

На рис. 5 приведены результаты сравнения разработанного алгоритма идентификации ложного сигнала с алгоритмом контроля целостности радионавигационного поля (Receiver autonomous integrity monitoring – *RAIM*).

Алгоритм *RAIM* является единственной, реализованной в настоящее время в отечественных НАП, мерой защиты от имитирующих помех [9].

Сравнение разработанного алгоритма с алгоритмом *RAIM* проводилось при воздействии на вход приёмника имитирующих помех простого типа, несогласованных с реальным изменением параметров сигналов. В

данном случае классический алгоритм контроля целостности радионавигационного поля способен к обнаружению имитирующей помехи. Но стоит заметить, что предлагаемый алгоритм идентификации выдаёт достоверное решение приблизительно на 40 процентов быстрее.

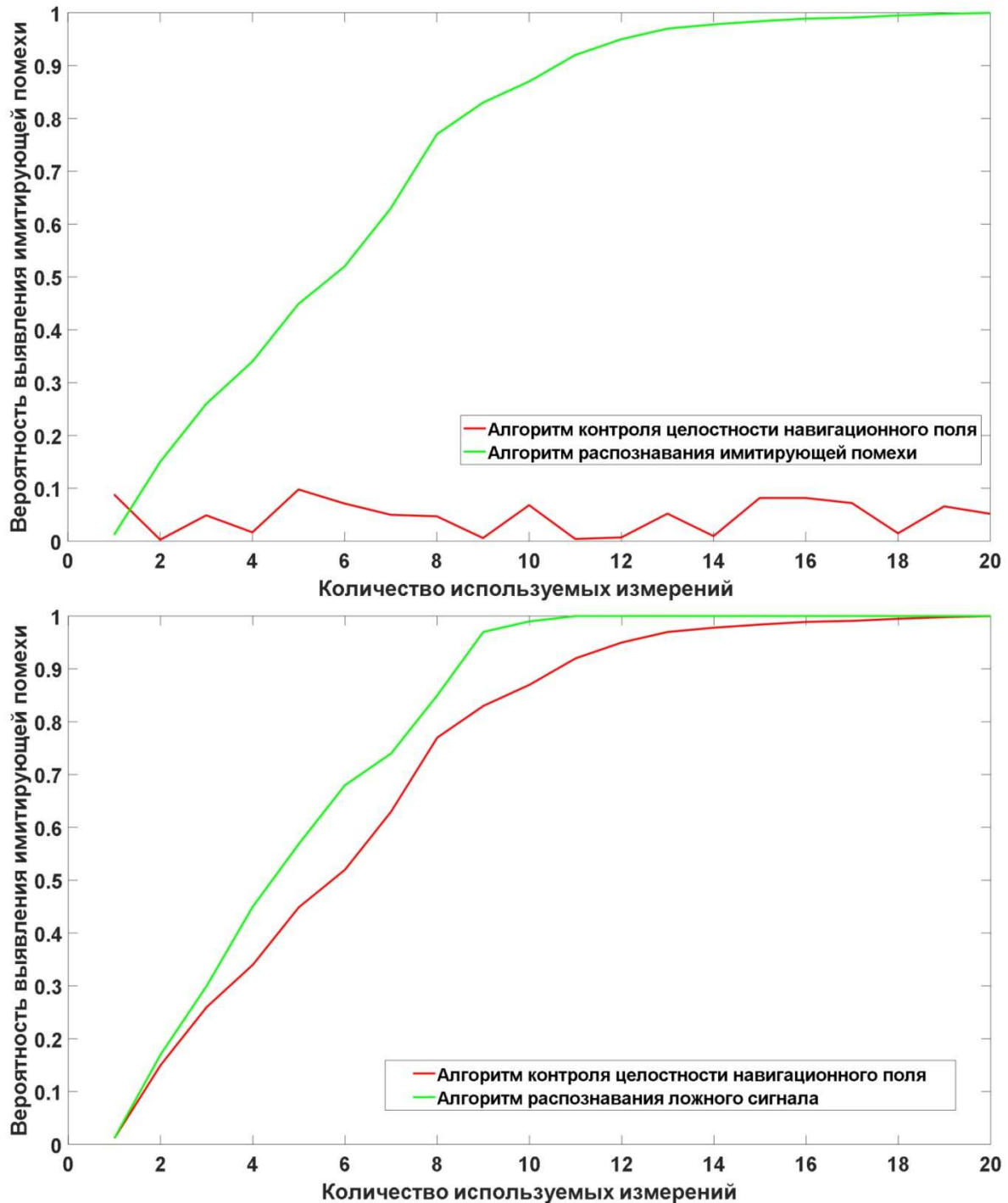


Рис. 5. Сравнение эффективности разработанного алгоритма с алгоритмом контроля целостности радионавигационного поля при воздействии имитирующей помехи простого типа(сверху) и имитирующей помехи сложного (согласованного) типа (снизу)

При воздействии имитирующей помехи сложного типа, не нарушающей кодово-фазовых соотношений присущих навигационным сигналам, классический алгоритм не способен распознать подмены радионавигационного поля, так как с его точки зрения логики работы алгоритма *RAIM* ухудшения точности решения навигационной задачи не происходит. Разработанный алгоритм в этом случае проявляет устойчивую способность к определению ложного сигнала.

Заключение

В настоящее время единственным средством защиты НАП космического базирования, как и многих других классов НАП, является применение алгоритма контроля целостности навигационного поля *RAIM*. Однако алгоритм *RAIM* чувствителен только к самым простым стратегиям спуффинга, не соблюдающим необходимых кодово-фазовых соотношений, а, следовательно, обладающих низкой скрытностью.

Включение в НАП космического базирования вспомогательного блока, реализующего предлагаемый алгоритм, делает возможным осуществление достоверных навигационных определений по сигналам ГНСС в условиях спуффинга, в том числе и при сложных, согласованных стратегиях подмены радионавигационного поля.

В отличие от фазированных антенных решеток представленный алгоритм требует значительно меньших энергетических затрат и обладает большей эффективностью, используя все преимущества методов обнаружения ложных сигналов, основанных на анализе геометрии прихода сигнала [7]. Дальнейшим направлением работы является адаптация алгоритма для авиационных и наземных потребителей с недетерминированной траекторией, требующая привлечения дополнительной информации при построении *MLP*-классификатора.

Список литературы

1. Радионавигационный план Российской Федерации [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/456034328> (дата обращения: 18.03.2018).
2. Михайлов Н.В. Автономная навигация космических аппаратов с использованием спутниковых радионавигационных систем: автореф. дис. докт. техн. наук. СПб ГУАП – СПб, 2015. 413 с.
3. ГОСТ 32448-2013. Глобальная навигационная спутниковая система аппаратура потребителей навигационная гражданского назначения для ракет-носителей, разгонных блоков и космических аппаратов Технические требования. М.: Стандартинформ, 2014. 7 с.
4. Галандзовский А.В. Радиоэлектронная защита радиоэлектронных средств: учебное пособие / А.В. Галандзовский, А.В. Паршуткин. СПб: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2016. 211 с.

5. John A. Volpe. National Transportation Systems Center “Vulnerability assessment of the transportation infrastructure relying on the Global Positioning System”, 2001.
6. Хайкин С. Нейронные сети полный курс, 2016. 1104 с.
7. Humphreys T., Psiaki M. GNSS Spoofing and Detection. Proc. Of IEEE, 2016. Vol. 104. Issue 6. P. 1258-1270.
8. Назаров А.В., Рубцов Н.С. Модель поиска и обнаружения сигналов глобальных навигационных спутниковых систем на основе параллельного анализа сложных гипотез // Сборник трудов III Всероссийской научно-практической конференции «Современные проблемы создания и эксплуатации вооружения, военной и специальной техники»: сб. трудов конференции, 2016. С. 386-391.
9. Kaplan E.D. Understanding GPS: Principle and Applications. Artech House Publishers, 1996. 703 p.

Рубцов Никита Сергеевич, адъюнкт, nikil@list.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского

ALGORITHM FOR PROTECTION OF GNSS RECEIVERS FROM SPOOFING

N.S. Rubtsov

Algorithm for protection space-based GNSS receivers from spoofing is present in this paper. The main element of the algorithm is artificial neural network tuned to false navigation signal detection. The algorithm designed for detection the false signal and estimation its parameters. Feature of the proposed algorithm is the ability of restore reliable navigation.

Key words: spoofing detection, interference, antijamming receiver, restoration of reliable navigation.

Rubtsov Nikita Sergeevich, postgraduate, nikil@list.ru, Russia, St. Petersburg, Mozhaisky Military Space Academy

СПОСОБ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ В КОМПЛЕКСИРОВАННОЙ СИСТЕМЕ НАЗЕМНОЙ НАВИГАЦИИ СПЕЦИАЛЬНОГО ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА

В.Ю. Лупанчук, В.М. Гончаров

В статье рассмотрен программный способ обработки навигационной информации, полученной от комплексированной структуры наземной навигации специального транспортного средства. Оптимальная оценка навигационной информации получена путем применения способа нахождения наиболее надежного значения неравномерно измеренной величины. Указанный способ позволяет сформировать весовые коэффициенты измерений, которые зависят от средней квадратической погрешности каждого измерительного датчика скорости.

Ключевые слова: специальное транспортное средство, система наземной навигации, навигационная информация, оптимальная оценка информации.

Уменьшение погрешностей определения приращения координат между начальной и следующей точкой маршрута можно произвести за счет использования на борту специального транспортного средства (СТС) дополнительных аппаратных и программных средств. В качестве дополнительных аппаратных средств могут использоваться инерциальные и электронно-механические высокоточные измерители навигационной информации, которые позволяют синтезировать комплексированную структуру системы наземной навигации (СНН). В качестве дополнительных программных средств могут применяться алгоритмы обработки избыточных измерений, полученных от различных измерительных датчиков скорости. В статье рассматривается программный способ уменьшения погрешностей адаптивной комплексированной СНН специального транспортного средства.

1. Программные средства построения путевой СНН специального транспортного средства

В состав бортовой измерительной системы входят несколько измерительных датчиков навигационной информации, что позволяет применять методы нахождения оптимальной оценки измерений при обработке избыточной информации.

В результате избыточности навигационной информации можно получить более точное измерение текущей скорости СТС. Наилучшими будут считаться величины, которые наиболее близкие к действительным их значениям. Обработка избыточных измерений выполняется микропроцессором, который входит в состав вычислительного комплекса адаптивной структуры СНН. Существуют различные способы обработки избыточной информации, которые подразделяются на строгие и приближенные [1].

Измерения, выполняемые в различных условиях, характеризуются различной средней квадратической погрешностью (СКП). Для получения наиболее точного результата вводится такое понятие как вес измерения

$$p_i = \frac{c}{\sigma_i^2}, \quad (1)$$

где p_i - вес измерения; σ_i^2 - известная средняя квадратическая погрешность; c - произвольная постоянная назначаемая вычислителем.

Любые измерения, как бы они тщательно не выполнялись, сопровождаются неизбежными погрешностями. Так как истинные погрешности в измерениях неизвестны и эти погрешности являются случайными, то необходимо составить такое условие, чтобы найденные поправки как можно меньше искажали результаты измерений. Для этого применяют строгие методы обработки избыточной информации, например, метод наименьших квадратов (МНК)

$$[p\vartheta^2] = \min, [p\vartheta^2] = p_1\vartheta_1^2 + p_2\vartheta_2^2 + \dots + p_n\vartheta_n^2, \quad (2)$$

где ϑ - поправка i - го измерения.

Теоретически доказано, что соблюдения условия $[p\vartheta^2] = \min$ при уравнивании приводит к наилучшим оценкам определяемых величин. МНК обеспечивает соблюдение трех требований:

- выполнение всех геометрических условий;
- нахождение наиболее точных значений измеренных величин при

условии $[p\vartheta^2] = \min$;

- оценки точности результатов измерений и их функций.

Применение МНК дает возможность использовать критерии оптимальной оценки погрешностей измерений (2), что позволяет применять этот метод для многократно и неравноточно измеренных величин [2].

В зависимости от того, какое выражение нормы вектора расхождения истинного значения от измеренного используется, критерий оценивания может носить то или иное название. Так, при использовании нормы $\|Q\|_1$ получаем критерий наименьших модулей, при использовании нормы $\|Q\|_2$ минимаксный критерий, а при использовании нормы $\|Q\|_3$ критерий наименьших квадратов

$$\|Q\|_1 = \sum_{i=1}^N |\eta_i|, \|Q\|_2 = \max_{1 \leq i \leq N} |\eta_i|, \|Q\|_3 = \left(\sum_{i=1}^N \eta_i^2 \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (3)$$

где η_i - расхождение между истинным и измеренным значениями (невязка измерения).

Для разработки математической модели комплексированной структуры путевой СНН необходимо минимизировать квадрат нормы вектора отклонений измеренного значения от истинного, поэтому может быть выбран критерий

$$Q = \min \sum_{i=1}^n p_i \eta_i^2, \quad (4)$$

где n – количество измерительных устройств; i – количество измерений.

Рассмотрим один из способов обработки независимых друг от друга измерений, который позволяет получить оптимальные оценки при небольшом количестве измерительных датчиков.

2. Основные этапы нахождения наиболее надежного значения многократно и неравноточно измеренной величины

Пусть некоторая величина, истинное значение которой равно X , измерена многократно и неравноточно и получены результаты $x_1, x_2, \dots, x_n$ со СКП соответственно $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n$. Требуется найти наиболее надежную оценку значение $\bar{x}$, измеренной величины на основе имеющейся информации, а также необходимо определить коэффициенты измерений $k_1, k_2, \dots, k_n$ при условии, чтобы величина $\bar{x}$ была получена с наибольшей точностью, т.е. с возможно меньшей СКП [3-5].

Выражаем искомую величину $\bar{x}$ в виде линейной функции

$$\bar{x} = k_1 x_1 + k_2 x_2 + \dots + k_n x_n, \quad (5)$$

где коэффициенты k_n являются некоторой функцией соответствующих величин σ_n и связаны условием

$$k_1 + k_2 + \dots + k_n = 1. \quad (6)$$

Необходимость условий (5) и (6) вытекает из следующих соображений:

1. Равноточные измерения должны рассматриваться как частный случай неравноточных, поэтому для случая равноточных измерений значения примут вид

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \dots = \sigma_n = \sigma, \text{ откуда } k_1 = k_2 = \dots = k_n = k,$$

после преобразования формула (5) будет иметь вид

$$\bar{x} = k(x_1 + x_2 + \dots + x_n), \quad (7)$$

а условие (6) будет иметь вид

$$nk = 1, \text{ откуда } k = \frac{1}{n}.$$

После преобразования формула (7) примет вид

$$\bar{x} = \frac{[x]}{n}, \quad (8)$$

2. Все результаты измерений случайно оказались равными между собой $x_1 = x_2 = \dots = x_n = x$, то $\bar{x} = x$, для этого случая формула (7) примет вид

$$\bar{x} = x(k_1 + k_2 + \dots + k_n).$$

При организации наблюдений одно из основных требований состоит в обеспечении таких условий, при которых результаты многократных измерений одной и той же величины или разных величин, по возможности, были бы между собой независимы. Любая методика навигационных измерений в той или иной мере рассчитана на выполнение указанных требований. Так как датчики СНН функционируют на разных физических принципах, логично предположить, что полученные ими значения навигационных параметров являются некоррелированными, формула определения погрешностей примет вид

$$\sigma_F = \sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial x}\right)_0^2 \sigma_x^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial y}\right)_0^2 \sigma_y^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial z}\right)_0^2 \sigma_z^2 + \dots + \left(\frac{\partial F}{\partial u}\right)_0^2 \sigma_u^2 + 2\left(\frac{\partial F}{\partial x}\right)_0 \left(\frac{\partial F}{\partial x}\right)_0 r_{xy} \sigma_x \sigma_y + \dots}, \quad (9)$$

где $\left(\frac{\partial F}{\partial x}\right)_0, \left(\frac{\partial F}{\partial y}\right)_0, \left(\frac{\partial F}{\partial z}\right)_0, \dots, \left(\frac{\partial F}{\partial u}\right)_0$ – функции коррелированных аргументов навигационных параметров; r_{xy} – коэффициент корреляции между измерениями. В случае, когда значения, полученные от путевой СНН комплексированной структуры, являются некоррелированными, коэффициенты корреляции будут равны нулю и формула (9) примет окончательный вид

$$\sigma_F = \sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial x}\right)_0^2 \sigma_x^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial y}\right)_0^2 \sigma_y^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial z}\right)_0^2 \sigma_z^2 + \dots + \left(\frac{\partial F}{\partial u}\right)_0^2 \sigma_u^2}, \quad (10)$$

$$\sigma_F = \sqrt{k_1^2 \sigma_1^2 + k_2^2 \sigma_2^2 + \dots + k_n^2 \sigma_n^2}.$$

Согласно формулам (5) и (8) при некоррелированных значениях аргументов навигационных параметров СКП при нахождении наиболее надежного значения примет вид

$$\sigma_{\bar{x}} = \sqrt{k_1^2 \sigma_1^2 + k_2^2 \sigma_2^2 + \dots + k_n^2 \sigma_n^2}. \quad (11)$$

Таким образом, задача сводится к задаче по нахождению условного экстремума функции

$$\sigma_{\bar{x}}^2 = f(k_1^2, k_2^2, \dots, k_n^2) = k_1^2 \sigma_1^2 + k_2^2 \sigma_2^2 + \dots + k_n^2 \sigma_n^2. \quad (12)$$

Данную задачу можно решить различными способами, например, способом градиентного спуска и др. В статье рассматривается способ нахождения условного экстремума по методу Лагранжа, функция Лагранжа имеет вид

$$\Phi(k_1, k_2, k_3, k_4, \lambda) = \sigma_1^2 k_1^2 + \sigma_2^2 k_2^2 + \sigma_3^2 k_3^2 + \sigma_4^2 k_4^2 + 2\lambda(k_1 + k_2 + k_3 + k_4 - 1), \quad (13)$$

где λ – подлежащий определению коэффициент, называемый множителем Лагранжа.

Далее определяются частные производные функции Лагранжа по всем переменным k_i

$$\frac{\partial \Phi}{\partial k_n} = 2\sigma_n^2 k_n - 2\lambda = 0 \quad (n=1, 2, \dots, i),$$

$$k_n = \lambda \frac{1}{\sigma_n^2}, \quad [\lambda] = \lambda \left[\frac{1}{\sigma_n^2} \right]. \quad (14)$$

Затем необходимо подставить суммарное значение коэффициентов k_i функции (6) и найти значение множителя Лагранжа, при этом формула примет вид

$$\lambda = \frac{1}{\sigma_n^2}. \quad (15)$$

Выразив в линейной функции коэффициенты k_n (6), проводятся преобразования формул (10) и (12). Конечный результат наиболее надежного значения многократно и неравноточно измеренного примет вид

$$\hat{x} = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{\sigma_i^2} x_i \right)}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_i^2}}. \quad (16)$$

Окончательный результат СКП наиболее надежного значения многократно и неравноточно измеренного примет вид

$$k_i = \frac{\sigma_1^2 \cdot \sigma_2^2 \cdot \dots \cdot \sigma_n^2}{\sigma_i^2 (\sigma_2^2 \cdot \sigma_3^2 \cdot \dots \cdot \sigma_n^2 + \sigma_1^2 \sigma_3^2 \cdot \dots \cdot \sigma_n^2 + \dots + \sigma_1^2 \sigma_2^2 \cdot \dots \cdot \sigma_{n-1}^2)},$$

$$\sigma_{\bar{x}} = \sqrt{k_1^2 \sigma_1^2 + k_2^2 \sigma_2^2 + \dots + k_n^2 \sigma_n^2}.$$
(17)

Применение способа нахождения наиболее надежного значения многократно и неравноточно измеренной величины позволяет найти оптимальную оценку с минимальной СКП с учетом весовых коэффициентов измерений. Рассмотрим применение данного способа при обработке избыточной информации, полученной от различных датчиков скорости.

3. Способ обработки информации в комплексированной системе наземной навигации

3.1 Математическая постановка задачи определения текущей скорости СТС

Исходные данные и ограничения:

1. Изменение навигационных параметров текущего положения СТС:

$$\begin{cases} \dot{X}_{TC} = V_{МДС} \cdot \cos \alpha \\ \dot{Y}_{TC} = V_{МДС} \cdot \sin \alpha \end{cases}, \quad \begin{cases} \dot{X}_{TC} = V_{ДДС} \cdot \cos \alpha \\ \dot{Y}_{TC} = V_{ДДС} \cdot \sin \alpha \end{cases}, \quad (18)$$

$$\begin{cases} \dot{X}_{TC} = V_{ОЭДС} \cdot \cos \alpha \\ \dot{Y}_{TC} = V_{ОЭДС} \cdot \sin \alpha \end{cases}, \quad \begin{cases} \ddot{X}_{TC} = \dot{V}_{АКС} \cdot \cos \alpha \\ \ddot{Y}_{TC} = \dot{V}_{АКС} \cdot \sin \alpha \end{cases},$$

где $\dot{X}_{TC}, \dot{Y}_{TC}$ – текущая скорость СТС; $\ddot{X}_{TC}, \ddot{Y}_{TC}$ – текущее ускорение СТС; $V_{МДС}$ – скорость агрегата, измеренная механическим датчиком скорости (МДС), м/с; $V_{ДДС}$ – скорость агрегата, измеренная доплеровским датчиком скорости (ДДС), м/с; $V_{ОЭДС}$ – скорость агрегата, измеренная оптико-электронным датчиком скорости (ОЭДС), м/с; $V_{АКС}$ – скорость агрегата, измеренная акселерометрами, м/с, α – дирекционный угол СТС, град.

Определение текущего положения подвижного объекта на разных скоростных интервалах может производиться при следующих ограничениях:

- МДС - $\{ 0 \text{ км/ч} \leq V_{МДС} \leq 45 \text{ км/ч} \}$;
- ДДС - $\{ 20 \text{ км/ч} \leq V_{ДДС} \leq 45 \text{ км/ч} \}$;
- ОЭДС - $\{ 0 \text{ км/ч} \leq V_{ОЭДС} \leq 45 \text{ км/ч} \}$;
- акселерометры - $\{ 0 \text{ км/ч} \leq V_{АКС} \leq 5 \text{ км/ч} \}$.

В реальных условиях функционирования СНН в процессе движения СТС условия работы измерительных устройств путевой СНН могут существенно отличаться за счет изменений, как внешних, так и внутренних факторов. Специальное адаптивное устройство позволяет учитывать эти условия. В соответствии с изменениями указанных условий производится перестройка структуры СНН с помощью адаптивного устройства, то есть отключение неисправных измерительных устройств или устройств, выполняющих измерения с недостаточной точностью [6].

2. Инструментальные погрешности датчиков скорости:

$\sigma_{МДС}$ – средняя квадратическая погрешность МДС; $\sigma_{ДДС}$ – средняя квадратическая погрешность ДДС; $\sigma_{ОЭДС}$ – средняя квадратическая погрешность ОЭДС; $\sigma_{АКС}$ – средняя квадратическая погрешность акселерометров.

3. Методические погрешности датчиков скорости:

$\sigma_{МДС}^I$ – составляющая средней квадратической погрешности МДС, обусловленные макро и микрорельефом местности; $\sigma_{МДС}^{II}$ – составляющая средней квадратической погрешности МДС, обусловленные изменением радиуса качения одометрического колеса;

$\sigma_{\text{ДДС}}^I$ – составляющая средней квадратической погрешности ДДС, обусловленной ошибкой в определении волны излучаемого сигнала и определения угла между вектором скорости и осью симметрии диаграммы направленности передающей антенны; $\sigma_{\text{ДДС}}^{II}$ – составляющая средней квадратической погрешности ДДС, обусловленной ошибкой определения доплеровской частоты;

$\sigma_{\text{ОЭДС}}^I$ – составляющая средней квадратической погрешности ОЭДС, обусловленные макро и микрорельефом местности, что определяется изменением расстояния излучения датчика скорости до отражающей поверхности; $\sigma_{\text{ОЭДС}}^{II}$ – составляющая средней квадратической погрешности ОЭДС, обусловленные измеряемой оптико-электронными элементами аппаратуры;

$\sigma_{\text{АКС}}^I$ – составляющая средней квадратической погрешности акселерометров, обусловленной геометрическим расположением чувствительных элементов акселерометра; $\sigma_{\text{АКС}}^{II}$ – составляющая средней квадратической погрешности акселерометров, обусловленные электронными элементами аппаратуры.

При решении задачи требуется найти оптимальное значение текущей скорости СТС ($\hat{V}$) при минимальной СКП

$$\Phi(k_1, \dots, k_n, \lambda) = \hat{\sigma} \rightarrow \min.$$

Рассмотрим основные этапы получения оптимальной оценки скорости, с учетом подбора весовых коэффициентов и множителя Лагранжа, при условии минимизации СКП.

3.2 Основные этапы нахождения оптимальной оценки скорости СТС комплексированной СНН

1. Истинное значение скорости $V_{\text{ИСТ}}$ СТС измерено многократно и неравноточно, получены результаты скорости $V_{\text{МДС}}, V_{\text{ДДС}}, V_{\text{ОЭДС}}, V_{\text{АКС}}$ со средними квадратическими погрешностями соответственно $\sigma_{\text{МДС}}, \sigma_{\text{ДДС}}, \sigma_{\text{ОЭДС}}, \sigma_{\text{АКС}}$.

2. СКП значений скорости специального транспортного средства от различных датчиков определены с учетом отсутствия корреляции инструментальных и методических составляющих погрешностей, изменяющихся во времени:

$$\begin{aligned}
 \sigma_1(t) &= \sqrt{\sigma_{\text{МДС}}^2 + \left[\sqrt{(\sigma_{\text{МДС}}^I)^2 + (\sigma_{\text{МДС}}^I(t))^2} + \sqrt{(\sigma_{\text{МДС}}^{\text{II}})^2 + (\sigma_{\text{МДС}}^{\text{II}}(t))^2} \right]^2}; \\
 \sigma_2(t) &= \sqrt{\sigma_{\text{ДДС}}^2 + \left[\sqrt{(\sigma_{\text{ДДС}}^I)^2 + (\sigma_{\text{ДДС}}^I(t))^2} + \sqrt{(\sigma_{\text{ДДС}}^{\text{II}})^2 + (\sigma_{\text{ДДС}}^{\text{II}}(t))^2} \right]^2}; \\
 \sigma_3(t) &= \sqrt{\sigma_{\text{ОЭДС}}^2 + \left[\sqrt{(\sigma_{\text{ОЭДС}}^I)^2 + (\sigma_{\text{ОЭДС}}^I(t))^2} + \sqrt{(\sigma_{\text{ОЭДС}}^{\text{II}})^2 + (\sigma_{\text{ОЭДС}}^{\text{II}}(t))^2} \right]^2}; \\
 \sigma_4(t) &= \sqrt{\sigma_{\text{АКС}}^2 + \left[\sqrt{(\sigma_{\text{АКС}}^I)^2 + (\sigma_{\text{АКС}}^I(t))^2} + \sqrt{(\sigma_{\text{АКС}}^{\text{II}})^2 + (\sigma_{\text{АКС}}^{\text{II}}(t))^2} \right]^2}.
 \end{aligned} \tag{19}$$

3. Формирование расчетных коэффициентов для упрощения математических операций

$$A = \sigma_2^2 \cdot \sigma_3^2 \cdot \sigma_4^2; B = \sigma_1^2 \cdot \sigma_3^2 \cdot \sigma_4^2; C = \sigma_1^2 \cdot \sigma_2^2 \cdot \sigma_4^2; D = \sigma_1^2 \cdot \sigma_2^2 \cdot \sigma_3^2. \tag{20}$$

4. Формирование весовых коэффициентов измерений

$$\begin{aligned}
 k_1 &= \frac{\sigma_2^2 \cdot \sigma_3^2 \cdot \sigma_4^2}{A + B + C + D}; k_2 = \frac{\sigma_1^2 \cdot \sigma_3^2 \cdot \sigma_4^2}{A + B + C + D}; \\
 k_3 &= \frac{\sigma_1^2 \cdot \sigma_2^2 \cdot \sigma_4^2}{A + B + C + D}; k_4 = \frac{\sigma_1^2 \cdot \sigma_2^2 \cdot \sigma_3^2}{A + B + C + D}.
 \end{aligned} \tag{21}$$

5. Оптимальную оценку скорости СТС можно рассчитать по формуле

$$\hat{V} = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{\sigma_i^2} \cdot V_i \right)}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_i^2}}, \text{ при } n=4. \tag{22}$$

6. СКП оптимального значения скорости от четырех датчиков рассчитывается по формуле

$$\sigma_V = \sqrt{k_1^2 \cdot \sigma_1^2 + k_2^2 \cdot \sigma_2^2 + k_3^2 \cdot \sigma_3^2 + k_4^2 \cdot \sigma_4^2}. \tag{23}$$

3.3 Результаты применения способа обработки избыточной информации в комплексированной системе наземной навигации СТС

При исследовании комплексированной структуры СНН количество одновременно функционирующих измерительных датчиков входной информации в путевой СНН специального транспортного средства может быть от двух до четырех, поэтому каждая структура с различным количеством датчиков информации (ДИ) может рассматриваться отдельно.

В реальных условиях функционирования СНН в процессе движения СТС условия работы ДИ путевой системы могут существенно отличаться за счет изменений, как внешних факторов, так и внутренних. В соответст-

вие с динамикой изменений скоростных условий работы ДИ производится перестройка структуры СНН, то есть отключение неисправных ДИ или датчиков, выполняющих измерения с недостаточной точностью.

В таблице сформированы исходные данные эксперимента, которые характеризуют скорость СТС и СКП измерительных датчиков на разных скоростных этапах. Время движения СТС находится в интервале от 0 до 15000 с. Рассчитана оптимальная оценка скорости при движении СТС не более 5 км/ч на всем временном интервале, которая варьируется возле значения 1,388 м/с.

**Исходные данные скорости СТС и СКП измерительных датчиков
на разных скоростных этапах**

Диапазон скорости СТС, м/с	Скорость СТС, измеренная ИД, м/с	Инструментальные СКП, м/с	Методические СКП, м/с
$V \leq 5$	$V_{\text{МДС}} = 1.390$ $V_{\text{ОЭДС}} = 1.395$ $V_{\text{АКС}} = 1.388$	$\sigma_{\text{МДС}} = 0,0122$ $\sigma_{\text{ОЭДС}} = 0,0015$ $\sigma_{\text{АКС}} = 0,0050$	$\sigma_{\text{МДС}}^1 = 0,35, \sigma_{\text{МДС}}^2 = 0,25$ $\sigma_{\text{ОЭДС}}^1 = 0,20, \sigma_{\text{ОЭДС}}^2 = 0,15$ $\sigma_{\text{АКС}}^1 = 0,05, \sigma_{\text{АКС}}^2 = 0,03$
$V \geq 5$	$V_{\text{МДС}} = 11.800$ $V_{\text{ДДС}} = 11.995$ $V_{\text{ОЭДС}} = 11.955$	$\sigma_{\text{МДС}} = 0,0122$ $\sigma_{\text{ДДС}} = 0,0020$ $\sigma_{\text{ОЭДС}} = 0,0015$	$\sigma_{\text{МДС}}^1 = 2,50, \sigma_{\text{МДС}}^2 = 5,00$ $\sigma_{\text{ДДС}}^1 = 3,50, \sigma_{\text{ДДС}}^2 = 0,10$ $\sigma_{\text{ОЭДС}}^1 = 0,05, \sigma_{\text{ОЭДС}}^2 = 0,03$

Результаты изменения погрешностей после обработки избыточных навигационных измерений при работе трех датчиков представлены на рис. 1. Из рисунка видно, что значения СКП нарастают с течением времени, но оптимальная оценка навигационной информации, которая показана линией 4 будет находиться ближе к более точному измерителю скорости, линия 3 и 2. После отключения акселерометров на 10-й минуте, навигационная информация формируется на основе МДС и ОЭДС.

Рассчитана оптимальная оценка скорости при движении СТС более 5 км/ч на всем временном интервале, которая равна 11,950 м/с. Результаты погрешностей после обработки избыточных навигационных измерений при работе трех датчиков представлены на рис. 2.

Применение программного способа обработки избыточной информации адаптивной СНН позволяет уменьшить погрешности определения текущей скорости СТС на разных скоростных этапах. Уточнение скорости, в свою очередь, позволяет более точно определять текущие навигационные параметры (X, Y) транспортного средства

$$\begin{cases} X(t) = X_0 + \int V(t) \cos \beta(t) \cos(\alpha_0 + \Delta\alpha(t)) dt, \\ Y(t) = Y_0 + \int V(t) \cos \beta(t) \sin(\alpha_0 + \Delta\alpha(t)) dt, \end{cases} \quad (24)$$

где $X(t), Y(t)$ – координаты текущего положения объекта, м; X_0, Y_0 – координаты начальной точки маршрута, м; $V(t)$ – текущая скорость движения агрегата, м/с; β – угол уклона дороги, град; α_0 – начальное значение дирекционного угла продольной оси агрегата в начальной точке маршрута, град; $\Delta\alpha(t)$ – приращение дирекционного угла продольной оси агрегата на марше, град.

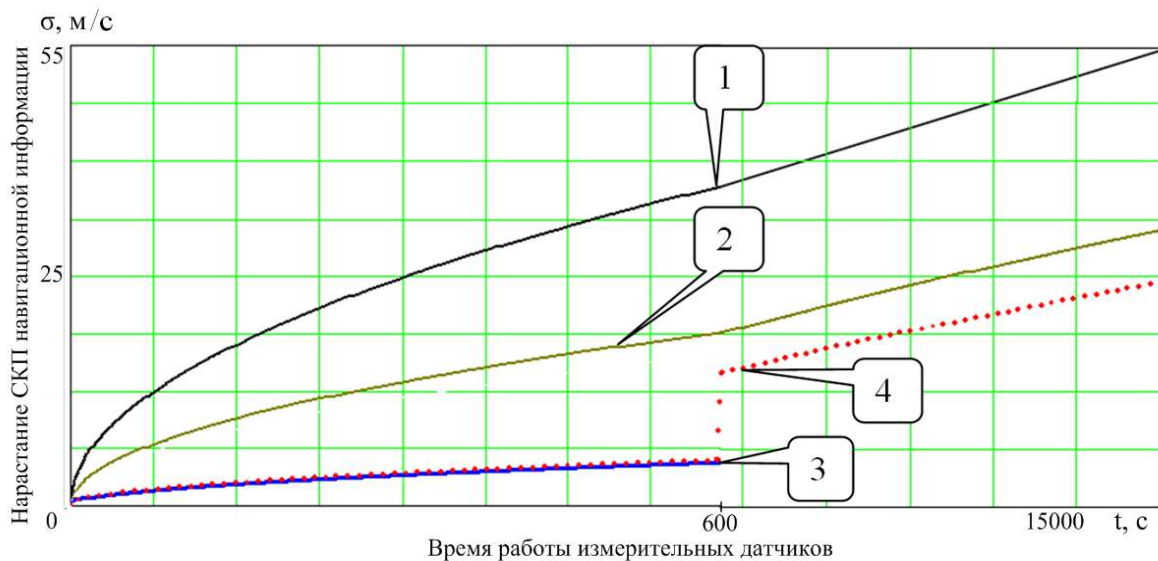


Рис. 1. График изменения СКП навигационной информации СТС:
 1 – изменение СКП при движении СТС от МДС; 2 – СКП от ОЭДС;
 3 – СКП от акселерометров; 4 – СКП комплексированной путевой СНН

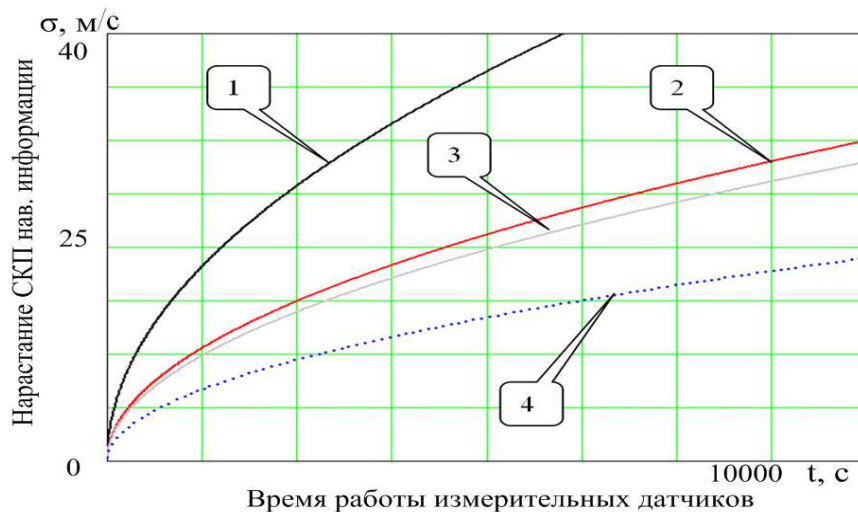


Рис. 2. График изменения СКП навигационной информации СТС:
 1 – изменение СКП при движении СТС от МДС; 2 – СКП от ДДС;
 3 – СКП от ОЭДС; 4 – СКП комплексированной путевой СНН

Средняя квадратическая погрешность определения текущих координат СТС зависит от точности измерения всех навигационных параметров, которые являются некоррелированными. Тогда, суммарную погрешность определения координат можно вычислить по формуле (25)

$$\sigma_{X,Y}(t) = \sqrt{\sigma_{X_0,Y_0}^2 + \sigma_V^2(t) + \sigma_\beta^2 + \sigma_{\Delta\alpha}^2}, \quad (25)$$

где $\sigma_{X,Y}(t)$ – СКП определения текущих координат СТС; σ_{X_0,Y_0} – СКП определения координат начальной точки маршрута ($\sigma_{X_0,Y_0} = 15$ м); $\sigma_V(t)$ – СКП измерения текущей скорости; σ_β – СКП измерения угла уклона дороги; $\sigma_{\Delta\alpha}$ – СКП измерения приращения дирекционного угла ($\sigma_\beta = \sigma_{\Delta\alpha} = 0$).

Рассмотрим эффект от применения программного способа обработки навигационной информации в комплексированной системе СТС (рис. 3, 4).

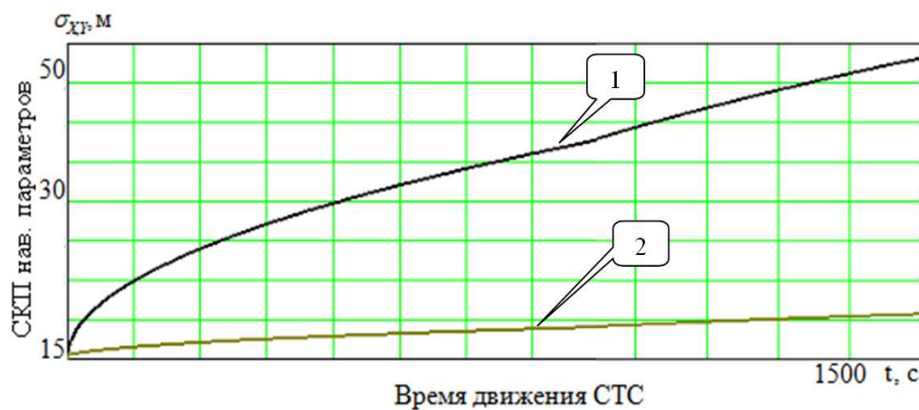


Рис. 3. График изменения СКП определения координат от измерителей скорости, при V до 5 км/ч: 1 – МДС; 2 – МДС; ОЭДС, АКС

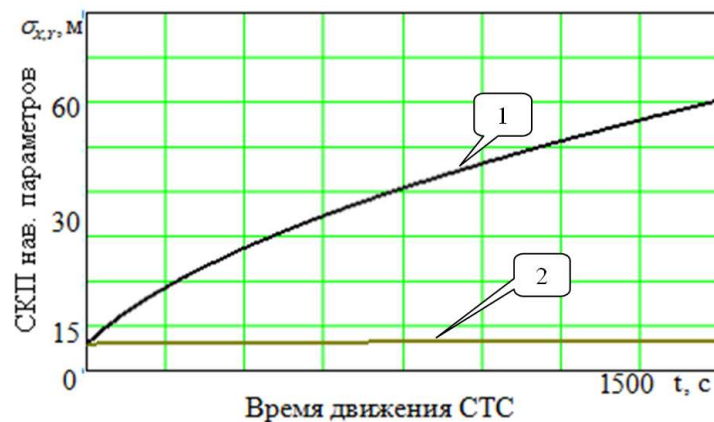


Рис. 4. График изменения СКП определения координат от измерителей скорости, при V более 5 км/ч: 1 – МДС, ДДС; 2 – МДС, ДДС, ОЭДС

Дополнительные аппаратные средства и программный способ обработки навигационной информации адаптивной комплексированной СНН специального транспортного средства позволят уменьшить погрешности определения текущих координат подвижного объекта порядка 25-35 м в конечной точке маршрута движения.

Вывод

1. Адаптивный принцип построения комплексированной навигационной системы позволяет менять ее конфигурацию не только из-за внутренних изменений в системе (отказы в аппаратуре измерительных каналов или потери точности измерений навигационных параметров), но и учитывать влияние внешних факторов при исключении отдельных измерительных датчиков, которые вносят наибольшую погрешность в измерения.

2. Повышение точности измерения расстояния, проходимого СТС, происходит за счет избыточности навигационной информации, получаемой от всех датчиков скорости и ускорения СНН, анализа их технического состояния, учета условий функционирования комплекса и автоматической коррекции единичного приращения пути МДС в зависимости от условий движения.

3. Периодическая коррекция механического датчика скорости от дополнительных измерительных датчиков с использованием способа для уравнивания результатов измерений позволяет повысить точность определения навигационной информации путевой адаптивной СНН подвижного объекта при сохранении требуемой надежности определения пройденного пути.

Список литературы

1. Поклад Г.Г., Гриднев С.П. Геодезия. М.: Академический проект, 2007. 584 с.
2. Большаков В.Д., Гайдаев П.А. Теория математической обработки геодезических измерений. М.: Недра, 1977. 367 с.
3. Лупанчук В.Ю. Применение метода наименьших квадратов для уравнивания результатов измерений. Сборник трудов V межвузовской научно-практической конференции. С.-Пб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2015. С. 184-189.
4. Лупанчук В.Ю., Алексеенко А.А., Конкевич Е.Д. Способов уравнивания неравноточных геодезических измерений. М.: Научно-технический сборник «Известия». М.: Военная академия РВСН им. Петра Великого, 2015. № 257. С. 78-83.
5. Кулешов В.В., Алимова Л.Л. Патент на изобретение № 2270477 от 12.06.2004. Многоканальное адаптивное устройство.

Лупанчук Владимир Юрьевич, канд. тех. наук, преподаватель, raketofflu@mail.ru, Россия, Балашиха, Военная академия РВСН им. Петра Великого,

Гончаров Владимир Михайлович, адъюнкт, vladimir-goncharov.1986@mail.ru, Россия, Балашиха, Военная академия РВСН им. Петра Великого

METHOD OF INFORMATION PROCESSING IN THE COMPLEX SYSTEM OF GROUND NAVIGATION OF A SPECIAL VEHICLE

V.Y. Lupanchuk, V.M. Goncharov

The article considers a software way of processing navigation information received from the complex structure of the ground navigation of a special vehicle. The optimal estimation of navigation information is obtained by applying the method of finding the most reliable value of an unevenly measured value. This method allows you to generate weight coefficients of measurements, which depend on the mean square error of each measuring sensor.

Key words: vehicle, ground navigation system, navigation information, optimal evaluation of information.

Lupanchuk Vladimir Yurievich, candidate of technical sciences, lecturer, raketoflu@mail.ru, Russia, Balashikha, Military Academy of the Strategic Missile Forces named after. Peter the Great,

Goncharov Vladimir Mikhailovich, postgraduate, vladimir-goncharov.1986@mail.ru, Russia, Balashikha, Military Academy of the Strategic Missile Forces named after. Peter the Great

УДК 534.6

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА ГРУППОВОЙ СИСТЕМЫ ОБОГРЕВА ВОЕННОЙ АВТОМОБИЛЬНОЙ ТЕХНИКИ В УСЛОВИЯХ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР

А.А. Хвостов, В.И. Ряжских, В.В. Синюков, А.А. Журавлев

В работе получены зависимости, позволяющие повысить точность контроля теплового режима параметров открытой спирали нагревательного элемента групповой системы обогрева двигателей автомобильной техники в условиях низких температур. Математическая модель нагрева дополнена зависимостью сопротивления нагревательного элемента от температуры, что позволило оценить погрешность расчёта в установившемся режиме и в динамике.

Ключевые слова: теплообмен, конвекция, контроль, нагрев спирали, нестационарный теплообмен, температурное поле, моделирование.

Военная автомобильная техника, являясь средством подвижности и маневренности войск, решающим образом влияет на поддержание их постоянной готовности в любых условиях обстановки. Значительная часть территории Российской Федерации находится в зоне со сложными

климатическими условиями. Наиболее суровыми для эксплуатации военной автомобильной техники являются зоны с очень холодным климатом (районы Якутии, Магадана, Забайкалья) и холодным климатом (Тува, Алтай, Карелия, Коми, Забайкалье, Сибирь). Эти районы характеризуются длительным зимним периодом (150-300 дней) и низким значением средней температуры ($253...243\text{K}$; $-20...-30^{\circ}\text{C}$) в это время года [1]. Низкие температуры окружающего воздуха оказывают существенное влияние на показатели готовности автомобильной техники к эксплуатации: физические свойства смазочных материалов, горючего и охлаждающей жидкости; тепловое состояние узлов и агрегатов; электрические характеристики аккумуляторных батарей. Командиры всех степеней изыскивают эффективные мероприятия по поддержанию постоянной готовности автомобильной техники в зимних условиях.

Одним из путей сокращения времени подготовки к эксплуатации автомобильной техники, хранящейся зимой на открытых стоянках, является применение электронагревательных элементов из твердых проводников с открытой и закрытой спиралью. Нагревательные элементы закрытого типа являются индивидуальными и используются для нагрева охлаждающей жидкости и масла. В результате нагрева жидкости в системе охлаждения возникает термосифонная циркуляция и тепло распределяется по массе двигателя.

Перспективным направлением является использование нагревательных элементов с открытой спиралью с целью поддержания заданных параметров температуры воздуха для обогрева масляной и охлаждающей систем автомобильных двигателей групповым методом [2].

Определение геометрии и режима работы системы группового обогрева военной автомобильной техники с использованием нагревательных элементов открытого типа требует тщательного расчета и осуществляется, как правило, без учёта влияния температуры нагревательного элемента на его сопротивление с использованием значения номинального сопротивления при некоторой «рабочей» температуре [3]. При обогреве больших объёмов воздуха, действительно, использованием конвективного отвода тепла от проводника или в случае незначительных отклонений температуры включения от рабочей, влиянием температуры можно пренебречь. Однако, в случае нагрева сравнительно небольших объёмов (как в нашем случае), влияние температуры проводника на его сопротивление будет существенным и приведет к росту погрешности расчётов. В этом случае при расчётах и проектировании нагревательных элементов с открытой спиралью для системы группового обогрева двигателей военной автомобильной техники, хранящейся на открытой стоянке в зимних условиях, а также при оценке их динамических характеристик необходимо использовать модель нагрева, учитывающую зависимость сопротивления проводника от температуры.

Рассмотрим нагревательный элемент с открытой спиралью как однородный проводник, по которому протекает электрический ток [4]. Количество теплоты, которое выделяется в проводнике за счет прохождения электрического тока, расходуется на нагрев проводника и отведение с поверхности конвекцией (излучением при этом пренебрегаем):

$$I^2 R dt = G c d(T - T_0) + \alpha F (T - T_0) dt, \quad (1)$$

где I – сила тока, проходящего по проводнику, А; R – сопротивление проводника, Ом; G – масса проводника, кг; c – удельная теплоемкость материала проводника, Дж/(кг·К); α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м² К); F – площадь поверхности теплообмена проводника, м²; T – температура проводника, °С; T_0 – начальная температура проводника (равна температуре воздуха, окружающего проводник), °С; t – время, с.

Разделим правую и левую части (1) на dt и запишем относительно неизвестного $(T - T_0)$

$$\begin{cases} \frac{d(T - T_0)}{dt} + \frac{\alpha F}{Gc} (T - T_0) = \frac{I^2 R}{Gc} \\ T(0) = T_0 \end{cases} \quad (2)$$

Полученное дифференциальное уравнение описывает нагрев проводника при постоянном сопротивлении без учета температурной поправки. Введём дополнительно зависимость сопротивления от температуры [5]

$$R = R_0 (1 + \alpha^* (T - T_0)), \quad (3)$$

где R_0 – сопротивление проводника при температуре T_0 , Ом; α^* – температурный коэффициент сопротивления, К⁻¹.

Тогда перепишем уравнение (2) в следующем виде

$$\begin{cases} \frac{d(T - T_0)}{dt} + \frac{\alpha F}{Gc} (T - T_0) = \frac{I^2 R_0 (1 + \alpha^* (T - T_0))}{Gc} \\ T(0) = T_0 \end{cases} \quad (4)$$

Решение (4) будет следующим [6]

$$T(t) = T_0 + \frac{I^2 R_0}{\alpha F - I^2 R_0 \alpha^*} \left(1 - e^{-\frac{\alpha F - I^2 R_0 \alpha^*}{Gc} t} \right). \quad (5)$$

При $\alpha^* = 0$ (5) сводится к зависимости с постоянным сопротивлением

$$\tilde{T}(t) = T_0 + \frac{I^2 R}{\alpha F} \left(1 - e^{-\frac{\alpha F}{Gc} t} \right). \quad (6)$$

В установившемся режиме оценим температуру проводника как $\lim_{t \rightarrow \infty} T(t)$ для (5)

$$T_{ycm} = \lim_{t \rightarrow \infty} T(t) = T_0 + \frac{I^2 R_0}{\alpha F - I^2 R_0 \alpha^*}, \quad (7)$$

и $\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{T}(t)$ для (6)

$$\tilde{T}_{ycm} = \lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{T}(t) = T_0 + \frac{I^2 R_0}{\alpha F}. \quad (8)$$

Для оценки средней погрешности расчёта температуры спирали без учета температурной зависимости сопротивления проводника от температуры рассчитаем среднюю температуру спирали за время нагрева τ без учета температурной поправки

$$\bar{\tilde{T}}(\tau) = \frac{1}{\tau} \int_0^\tau \left[T_0 + \frac{I^2 R}{\alpha F} \left(1 - e^{-\frac{\alpha F}{Gc} \tau} \right) \right] dt = T_0 + \frac{I^2 R}{\alpha F} - \frac{1}{\tau} \frac{I^2 R Gc \left(1 - e^{-\frac{\alpha F}{Gc} \tau} \right)}{\alpha^2 F^2}, \quad (9)$$

и с её учётом

$$\begin{aligned} \bar{T}(\tau) &= \frac{1}{\tau} \int_0^\tau \left[T_0 + \frac{I^2 R_0}{\alpha F - I^2 R_0 \alpha^*} \left(1 - e^{-\frac{\alpha F - I^2 R_0 \alpha^*}{Gc} \tau} \right) \right] dt = \\ &= T_0 + \frac{I^2 R_0}{\alpha F - I^2 R_0 \alpha^*} - \frac{1}{\tau} \frac{I^2 R Gc \left(1 - e^{-\frac{\alpha F - I^2 R_0 \alpha^*}{Gc} \tau} \right)}{(\alpha F - I^2 R_0 \alpha^*)^2}. \end{aligned} \quad (10)$$

Соответствующие значения в установившемся режиме оценим как $\lim_{\tau \rightarrow \infty} \bar{\tilde{T}}(\tau)$ для (9)

$$\bar{\tilde{T}}_{ycm} = \lim_{\tau \rightarrow \infty} \bar{\tilde{T}}(\tau) = T_0 + \frac{I^2 R_0}{\alpha F}, \quad (11)$$

что соответствует (8.10), и $\lim_{\tau \rightarrow \infty} \bar{T}(\tau)$ для (10.12)

$$\bar{T}_{ycm} = \lim_{\tau \rightarrow \infty} \bar{T}(\tau) = T_0 + \frac{I^2 R_0}{\alpha F - I^2 R_0 \alpha^*}, \quad (12)$$

что соответствует (7).

Полученные формулы (5) - (12) позволяют вывести зависимости для оценок абсолютной погрешности за время нагрева τ

$$\Delta T(\tau) = T(\tau) - \tilde{T}(\tau) = \frac{I^2 R_0}{\alpha F - I^2 R_0 \alpha^*} \left(1 - e^{-\frac{\alpha F - I^2 R_0 \alpha^*}{Gc} \tau} \right) - \frac{I^2 R}{\alpha F} \left(1 - e^{-\frac{\alpha F}{Gc} \tau} \right), \quad (13)$$

средней абсолютной погрешности за время нагрева τ

$$\Delta \bar{T}(\tau) = \left(\frac{I^2 R}{\alpha F} - \frac{I^2 R_0}{\alpha F - I^2 R_0 \alpha^*} \right) + \frac{I^2 R Gc}{\tau} \left[\frac{1 - e^{-\frac{\alpha F - I^2 R_0 \alpha^*}{Gc} \tau}}{(\alpha F - I^2 R_0 \alpha^*)^2} - \frac{1 - e^{-\frac{\alpha F}{Gc} \tau}}{\alpha^2 F^2} \right], \quad (14)$$

а также абсолютной и относительной погрешности в установившемся режиме

$$\bar{\varepsilon}_{абс} = \left| \lim_{\tau \rightarrow \infty} \Delta \bar{T}(\tau) \right| = \left| \frac{I^2 R}{\alpha F} - \frac{I^2 R_0}{\alpha F - I^2 R_0 \alpha^*} \right|, \quad (15)$$

$$\bar{\varepsilon}_{отн} = \frac{\left| \frac{I^2 R}{\alpha F} - \frac{I^2 R_0}{\alpha F - I^2 R_0 \alpha^*} \right|}{\bar{T}_{уст}} \cdot 100. \quad (16)$$

По формулам (13) – (16) можно оценить возможную погрешность при расчёте, проектировании или оценке статических и динамических характеристик систем управления нагревательными элементами с открытой спиралью.

Коэффициент теплоотдачи α , входящий в уравнения динамики нагрева (5) и (6), может быть определен по критерию Нуссельта Nu

$$Nu = \frac{\alpha \cdot d_{cn}}{\lambda_{cn}}, \quad (17)$$

где d_{cn} – диаметр спирали, м; λ_{cn} – коэффициент теплопроводности материала спирали, Вт/(м·К).

Критерий Нуссельта, в свою очередь, связан с критериями Рейнольдса Re, Грасгофа Gr и Прандтля Pr [7, 8]:

$$Re = \frac{v_{\text{в}} \cdot d_{\text{сп}} \cdot \rho_{\text{в}}}{\mu_{\text{в}}}, \quad (18)$$

где $v_{\text{в}}$ – скорость движения воздуха, м/с; $\rho_{\text{в}}$ – плотность воздуха, кг/м³; $\mu_{\text{в}}$ – динамическая вязкость воздуха, Па·с;

$$Gr = \frac{g d_{\text{сп}}^3 \rho_{\text{в}}^2 \beta_{\text{в}}}{\mu_{\text{в}}^2} \Delta t, \quad (19)$$

где $\beta_{\text{в}}$ – коэффициент температурного расширения воздуха, 1/К; Δt – температурный напор между поверхностью спирали и воздухом, °С;

$$Pr = \frac{\mu_{\text{в}} c_{\text{в}}}{\lambda_{\text{в}}}, \quad (20)$$

где $c_{\text{в}}$ – удельная теплоемкость воздуха, Дж/(кг·м³); $\lambda_{\text{в}}$ – коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м·К).

Теплообмен между нагретой спиралью и окружающим ее воздухом может осуществляться в условиях как естественной, так и вынужденной конвекции.

При естественной конвекции перемещение отдельных объемов воздуха происходит исключительно вследствие различия температур в его различных местах и вызванного этим различия плотностей. В этом случае критерием Рейнольдса допустимо пренебречь и критерий Нуссельта Nu связан с критериями Грасгофа Gr и Прандтля Pr .

По данным акад. М.А. Михеева [9], в условиях естественной конвекции возле тонких нагретых проволок возникает пленочный или переходной от пленочного к ламинарному режимы течения теплоносителя.

Для таких случаев критерий Нуссельта может быть вычислен как:

$$Nu = \begin{cases} 0,5, & \text{при } Gr \cdot Pr < 10^{-3}; \\ 1,18 Gr^{0,125} Pr^{0,125}, & \text{при } Gr \cdot Pr = 10^{-3} \div 5 \cdot 10^2. \end{cases} \quad (21)$$

В случае вынужденной конвекции интенсивность принудительного движения теплоносителя преобладает над интенсивностью его свободного движения. В этой связи критерий Нуссельта зависит от критерия Рейнольдса. Критерием Грасгофа допустимо пренебречь.

В условиях вынужденной конвекции при поперечном обтекании воздушного потока поверхности цилиндра или трубы критерий Нуссельта может быть вычислен как [9]:

$$Nu = \begin{cases} 0,76 Re^{0,4} Pr^{0,37}, & \text{при } 1 < Re < 40; \\ 0,52 Re^{0,5} Pr^{0,37}, & \text{при } 40 \leq Re < 10^3; \\ 0,26 Re^{0,6} Pr^{0,37}, & \text{при } 10^3 \leq Re < 2 \cdot 10^5; \\ 0,023 Re^{0,8} Pr^{0,4}, & \text{при } 2 \cdot 10^5 < Re < 10^7. \end{cases} \quad (22)$$

Располагая значением критерия Нуссельта, из формулы (17) можно определить значение коэффициента теплоотдачи для данных условий:

$$\alpha = \frac{\text{Nu} \cdot \lambda_{cn}}{d_{cn}}. \quad (23)$$

Проведем серию вычислительных экспериментов на примере конвективного теплообмена между воздухом и нагретой открытой спирали при протекании по ней электрического тока [10, 11].

Проведем исследование зависимостей (13) – (16) на предмет чувствительности ошибки расчётов без учёта температуры к изменению параметров, входящих в (13) – (16) и которые могут варьироваться в процессе проектирования или расчёта нагревательного элемента.

Как видно из (13) – (16) влияние на погрешность расчётов оказывают параметры $I, F, G, C, \alpha, \alpha^*, R_0$. Поскольку величины I, F, G, C взаимосвязаны функционально и определяются в большей степени геометрией проводника, их можно охарактеризовать диаметром проводника, через изменение которого произойдет изменение перечисленных выше параметров (13) – (16). Коэффициент теплоотдачи α определяется в основном расходом воздуха при обдуве и площадью поверхности теплообмена, а α^*, R_0 – типом материала. Таким образом, целесообразно провести исследование влияния диаметра проводника d_{cn} , расхода воздуха (нагреваемой среды) V и типа материала (α^*, R_0).

В качестве объекта моделирования принята электрическая спираль, изготовленная из никель-хромового сплава нихром Х20Н80, теплофизические характеристики которого представлены в табл. 1. Теплофизические свойства воздуха (при температуре 20 °С) представлены в табл. 2.

Таблица 1

Теплофизические свойства никель-хромового сплава Х20Н80

№ п/п	Название параметра	Обозначение	Значение	Единица измерения
1	Удельное электрическое сопротивление	ρ	1,1	Ом/(мм ² ·м)
2	Плотность	ρ_{cn}	8300	кг/м ³
3	Удельная теплоемкость	c_{cn}	440	Дж/(кг·К)
4	Температурный коэффициент сопротивления	α^*	0,0002	К ⁻¹

Таблица 2

Теплофизические свойства воздуха

№ п/п	Название параметра	Обозначение	Значение	Единица измерения
1	Коэффициент теплопроводности	$\lambda_{\text{в}}$	0,0305	Вт/(м·К)
2	Плотность	$\rho_{\text{в}}$	1,5	кг/м ³
3	Динамическая вязкость	$\mu_{\text{в}}$	0,000021	Па·с
4	Коэффициент температурного расширения	$\beta_{\text{в}}$	0,00343	1/К
5	Удельная теплоемкость	$c_{\text{в}}$	1009	Дж/(кг·м ³)

Эксперимент № 1. Оценка влияния температурной зависимости сопротивления на погрешность вычисления температуры спирали.

Диаметр спирали 0,8 мм. Электрическая мощность, выделяемая в спирали при прохождении тока 1000 Вт (при напряжении $U = 220$ В). Начальная температура спирали и температура окружающего воздуха принята $T_0 = 20$ °С. Скорость движения воздуха $v_{\text{в}} = 1,0$ м/с.

По известным соотношениям [6] были вычислены параметры нагревательного элемента: сила тока I , электрическое сопротивление R_0 (при $T_0 = 20$ °С), длина спирали L , масса G и площадь поверхности теплообмена F (табл. 3).

Таблица 3

Параметры нагревательного элемента

№ п/п	Название параметра	Обозначение	Значение	Единица измерения
1	Сила тока	I	4,545	А
2	Электрическое сопротивление	R_0	48,4	Ом
3	Площадь поверхности теплообмена	F	0,055	м
4	Масса проводника	G	0,092	кг
5	Длина	L	22,1	м

Критерии Рейнольдса Re , Прандтля Pr и Нуссельта Nu рассчитаны по формулам (18), (19) и (20) соответственно. Значение коэффициента теплоотдачи α вычислено по формуле (26). Температура в установившемся режиме с учетом и без учета температурной зависимости сопротивления рассчитаны по формулам (7) и (8) соответственно. Абсолютная и относительная погрешности – по формулам (15) и (16). Результаты вычислительного эксперимента представлены в табл. 4.

Таблица 4

Результаты вычислительного эксперимента № 1

№ п/п	Название параметра	Обозначение	Значение	Единица измерения
1	Начальная температура	T_0	20	°C
2	Скорость движения воздуха	v_ϕ	1,0	м/с
3	Критерий Рейнольдса	Re	56,87	-
4	Критерий Прандтля	Pr	0,7	-
5	Критерий Нуссельта	Nu	3,43	-
6	Коэффициент теплоотдачи	α	130,88	Вт/(м ² ·К)
7	Температура в установив- шемся режиме (с учетом температурной зависимо- сти сопротивления)	$T_{уст}$	161,48	°C
8	Температура в установив- шемся режиме (без учета темпер. зависимости сопротивления)	$\tilde{T}_{уст}$	157,58	°C
9	Абсолютная погрешность	$\bar{\varepsilon}_{абс}$	3,97	°C
10	Относительная погрешность	$\bar{\varepsilon}_{отн}$	2,5	%

На рис. 1 представлены результаты моделирования процесса нагрева открытой спирали.

Расчётная погрешность расчёта температуры нагрева без учета температурной поправки в установившемся режиме составила $3,97\text{ }^{\circ}\text{C}$, что составит относительно предельного значения ($161,48\text{ }^{\circ}\text{C}$) $2,5\%$.

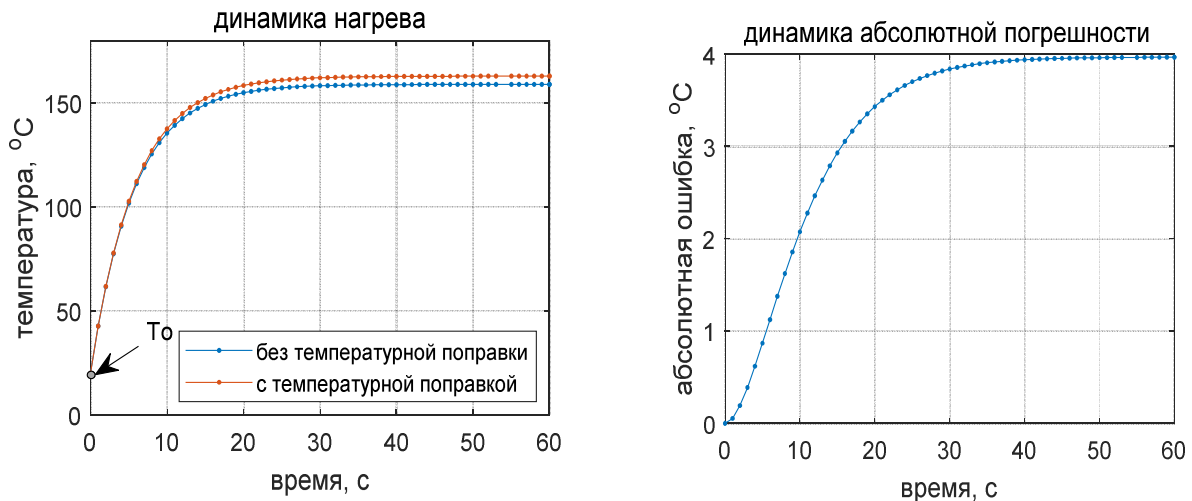


Рис. 1. Изменение температуры спирали и абсолютной погрешности расчета температуры спирали при ее нагреве

Эксперимент № 2. Оценка влияния диаметра нагревательного элемента на погрешность вычисления температуры спирали.

Электрическая мощность, выделяемая в спирали при прохождении тока 1000 Вт (при напряжении $U = 220\text{ В}$). Начальная температура спирали и температура окружающего воздуха принята $T_0 = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Скорость движения воздуха $v = 1,0\text{ м/с}$. Диаметр спирали d варьировали в диапазоне от 0,6 до 1,0 мм с шагом 0,1 мм.

По известным соотношениям [6] для заданного диаметра нагревательного элемента были вычислены его параметры: сила тока I , электрическое сопротивление R_0 (при $T_0 = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$), длина спирали L , масса G и площадь поверхности теплообмена F (табл. 5).

Критерии Рейнольдса Re , Прандтля Pr и Нуссельта Nu рассчитаны по формулам (21), (23) и (25) соответственно. Значение коэффициента теплоотдачи α вычислено по формуле (23). Температура в установившемся режиме с учетом и без учета температурной зависимости сопротивления рассчитаны по формулам (7) и (8) соответственно. Абсолютная и относительная погрешности – по формулам (15) и (16).

Результаты вычислительного эксперимента № 2 представлены в табл. 6 и на рис. 2.

Таблица 5

Параметры нагревательного элемента

Название параметра	Диаметр нагревательного элемента d_{cn} , мм				
	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
Сила тока I , А	4,54	4,54	4,54	4,54	4,54
Электрическое сопротивление R_0 , Ом	48,4	48,4	48,4	48,4	48,4
Площадь поперечного сечения S , мм ²	0,283	0,385	0,502	0,636	0,785
Длина L , м	12,43	16,92	22,11	27,98	34,54
Масса G , кг	0,029	0,054	0,092	0,147	0,225
Площадь поверхности теплообмена F , м ²	0,023	0,037	0,055	0,079	0,108

Таблица 6

Результаты вычислительного эксперимента № 2

Название параметра	Диаметр нагревательного элемента d_{cn} , мм				
	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
Критерий Рейнольдса Re	42,65	49,76	56,87	63,98	71,09
Критерий Прандтля Pr	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
Критерий Нуссельта Nu	2,97	3,21	3,43	3,64	3,84
Коэффициент теплоотдачи α , Вт/(м ² ·К)	151,14	139,92	130,89	123,4	117,07
Температура в установившемся режиме (с учетом температурной зависимости сопротивления) $T_{уст}$, °С	329,90	222,92	162,54	125,56	100,37
Температура в установившемся режиме (без учета температурной зависимости сопротивления) $\tilde{T}_{уст}$, °С	307,62	213,12	157,63	122,56	98,78
Абсолютная погрешность $\bar{\varepsilon}_{абс}$, °С	22,3	9,8	4,9	2,7	1,6
Относительная погрешность $\bar{\varepsilon}_{отн}$, %	7,2	4,6	3,1	2,2	1,6

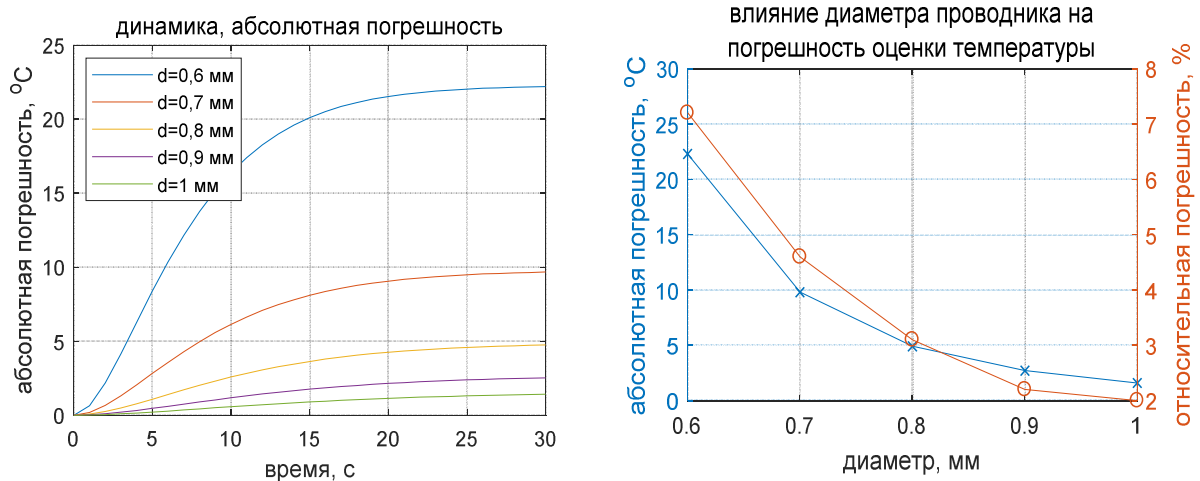


Рис. 2. Влияние диаметра спирали на абсолютную и относительную погрешности расчета температуры спирали при ее нагреве

Эксперимент № 3. Оценка влияния скорости воздуха на погрешность вычисления температуры спирали.

Электрическая мощность, выделяемая в спирали при прохождении тока 1000 Вт (при напряжении $U = 220$ В). Начальная температура спирали и температура окружающего воздуха принята $T_0 = 20$ °С. Диаметр спирали 0,8 мм. Скорость движения воздуха v_g варьировали в интервале от 0,5 до 2,5 м/с с шагом 0,5 м/с.

Параметры нагревательного элемента для данных условий соответствуют параметрам вычислительного эксперимента № 1 (см. табл. 3).

Результаты вычислительного эксперимента № 3 представлены в табл. 7 и на рис. 3.

Как видно из представленных на рис. 1 и в табл. 4 данных, в процессе нагрева погрешность расчётов без учёта температурной зависимости сопротивления проводника для заданных условий нагрева начинает увеличиваться, принимая по истечении некоторого времени постоянное значение.

По данным табл. 6 и рис. 2 можно сказать, что с увеличением диаметра спирали относительная и абсолютная ошибки расчетов в установившемся режиме снижается. То есть при расчете температурного режима тонких спиралей следует учитывать температурный коэффициент сопротивления и для оценки динамики нагрева использовать формулу (5). Расчет по формуле без учета температурной поправки приведет к существенным погрешностям. Для относительно толстых спиралей (определяется также материалом спирали) зависимость сопротивления от температуры можно не учитывать.

Результаты, представленные в табл. 7 и на рис. 3 показывают, что с увеличением скорости воздуха погрешность расчета в установившемся режиме снижается. Таким образом, в условиях активного конвективного

теплообмена с окружающей средой температурной поправкой можно пренебречь, однако в условиях низкой интенсивности теплообмена (как в случае разработки системы группового обогрева двигателей автомобилей в зимних условиях) погрешности расчетов без учета температурной поправки могут привести к существенным погрешностям.

Таблица 7

Результаты вычислительного эксперимента № 3

Название параметра	Скорость движения воздуха v_g , м/с				
	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5
Критерий Рейнольдса Re	28,43	56,87	85,31	113,74	142,18
Критерий Прандтля Pr	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
Критерий Нуссельта Nu	2,43	3,43	4,20	4,86	5,43
Коэффициент теплоотдачи α , Вт/(м ² ·К)	92,55	130,88	160,30	185,10	206,95
Температура в установившемся режиме (с учетом темп. завис. сопротивления) $T_{уст}$, °С	222,32	161,48	134,92	119,22	108,56
Температура в установившемся режиме (без учета темп. завис. сопротивления) $\tilde{T}_{уст}$, °С	214,58	157,58	132,34	117,29	107,02
Абсолютная погрешность $\bar{\varepsilon}_{абс}$, °С	8	3,97	2,6	1,97	1,6
Относительная погрешность $\bar{\varepsilon}_{отн}$, %	4,1	2,9	2,3	2	1,8

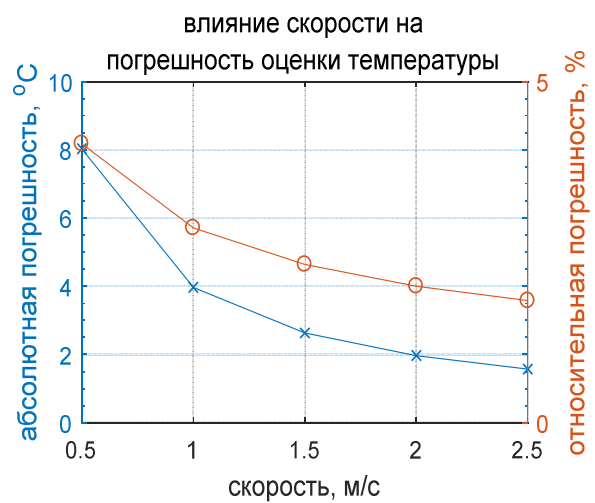
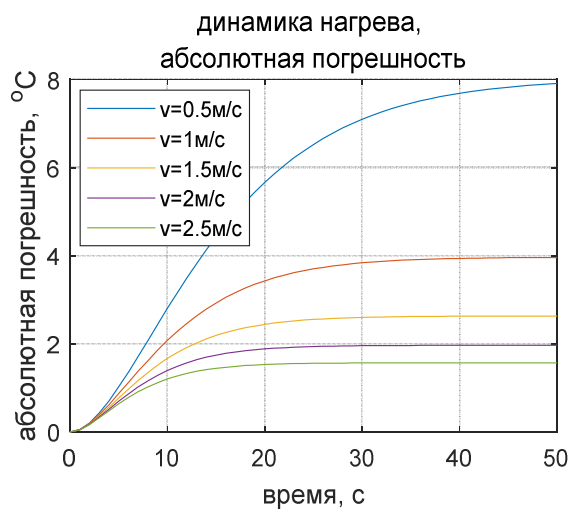


Рис. 3. Влияние скорости воздуха на абсолютную и относительную погрешности расчета температуры спирали при ее нагреве

Таким образом, полученные аналитические зависимости и результаты моделирования показали, что введение температурной поправки позволяет существенно снизить погрешность расчетов. Прогноз возможных погрешностей по зависимостям (13) – (16) позволяет оценить целесообразность введения поправки для конкретных расчётных задач. Это делает возможным повысить точность контроля параметров системы группового обогрева двигателей автомобильной техники в зимних условиях за счет введения температурной поправки, а также для оценки динамических свойств объекта управления при синтезе систем управления нагревательными элементами.

Список литературы

1. ГОСТ 16350-80. Климат СССР. Районирование и статистические параметры климатических факторов для технических целей. М.: Изд-во стандартов, 1980. 140 с.
2. Балабай И.В. Эксплуатация автомобильной техники в сложных условиях / И.В. Балабай, В.Н. Щербинин. М. Военное издательство, 1997. 128 с.
3. Козлов А.В. Сравнительный анализ характеристик открытых спиралей и ТЭНов в составе электронагревательных приборов. Расчет тепловых полей в стационарных и нестационарных режимах / А.В. Козлов, А.С. Шаповалов, В.Я. Явчуновский // Вопросы прикладной физики. Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 2008. Ч. 1. Вып. 15. С. 53 – 58.
4. Струпинский М.Л. Проектирование и эксплуатация систем электрического обогрева в нефтегазовой отрасли / М.Л. Струпинский, Н.Н. Хренков, А.Б. Кувалдин. М.: Инфра-Инженерия, 2015. 272 с.
5. Хвостов А.А., Журавлев А.А., Целюк Д.И., Журавлев Е.А. Моделирование нагрева однородного электрического проводника протекающим током // Техника и безопасность объектов уголовно-исполнительной системы: сборник материалов Международной научно-практической межведомственной конференции / ФКОУ ВО Воронежский институт ФСИН России. Воронеж: Издательско-полиграфический центр «Научная книга», 2016. С. 328 – 329.
6. Кабышев А.В. Электроснабжение объектов. Расчет электрических нагрузок, нагрев проводников и электрооборудования: учебное пособие / А.В. Кабышев. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2007. Ч. 1. 185 с.
7. Хвостов А.А. Математическая модель электронагревательного элемента с учетом температурной зависимости сопротивления / А.А. Хвостов, А.А. Журавлев, Д.И. Целюк // Новые технологии в научных исследованиях, проектировании, управлении, производстве: труды Междунар. науч.-техн. конф. Воронеж: Воронежский государственный технический университет, 2017. Т. 1. С. 179 – 182.

8. Процессы и аппараты пищевых производств / под ред. А.Н. Острикова. СПб.: Гиорд, 2012. 616 с.

9. Болгарский А.В., Мухачев Г.А., Щукин В.К. Термодинамика и теплопередача. М.: Высшая школа, 1975. 495 с.

10. Хвостов А.А. Моделирование нестационарного теплового режима нагрева открытой спирали / А.А. Хвостов, А.А. Журавлев, Д.И. Целюк // Научный вестник ВГАСУ. Серия: Информационные технологии в строительных, социальных и экономических системах. Воронеж, ГАСУ. 2017. № 1. С. 54 – 58.

11. Журавлев А.А., Целюк Д.И. Математическая модель нагрева проводника электрическим током в условиях естественной и вынужденной конвекции // Новые решения в области упрочняющих технологий: взгляд молодых специалистов: материалы Международной научно-практической конференции. Юго-Зап. гос. ун-т. Курск: Изд-во ЗАО «Университетская книга», 2016. Т. 1. С. 301 – 303.

Хвостов Анатолий Анатольевич, д-р техн. наук, проф., khvtol1974@yandex.ru, Россия, Воронеж, Военный учебно-научный центр военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»,

Рязжских Виктор Иванович, д-р техн. наук, проф., главный научный сотрудник, ryazhskih_vi@mail.ru, Россия, Воронеж, Военный учебно-научный центр военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»,

Синюков Виктор Васильевич, канд. техн. наук, начальник отдела, sinukovhome@mail.ru, Россия, Воронеж, Военный учебно-научный центр военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»,

Журавлев Алексей Александрович, канд. техн. наук, доц., научный сотрудник, zhuraa1@rambler.ru, Россия, Воронеж, Военный учебно-научный центр военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»

IMPROVING THE ACCURACY OF CONTROL PARAMETERS
THE THERMAL REGIME OF GROUP HEATING SYSTEM MILITARY VEHICLES
IN TERMS OF LOW TEMPERATURE

A.A. Khvostov, V.I. Ryazhsk, V.V. Sinyukov, A.A. Zhuravlev

Dependences allowing to increase the accuracy of control of thermal regime of parameters of open spiral of heating element of group system of heating of engines of automobile engineering in the conditions of low temperatures are received in work. The mathematical model of heating is supplemented by the dependence of the resistance of the heating element on temperature, which allowed to estimate the calculation error in steady state and dynamics.

Key words: heat exchange, convection, control, spiral heating, non-stationary heat exchange, temperature field, modeling.

Khvostov Anatoliy Anatolyevich, doctor of technical sciences, professor, khvtol1974@yandex.ru, Russia, Voronezh, Military educational scientific center air force «Air force Academy named after Professor N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin»,

Ryazhsk Victor Ivanovich, doctor of technical sciences, professor, chief researcher, ryazhskih_vi@mail.ru, Russia, Voronezh, Military educational scientific center air force «Air force Academy named after Professor N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin»,

Sinyukov Viktor Vasilyevich, candidate of technical sciences, head of Department, sinukovhome@mail.ru, Russia, Voronezh, Military educational scientific center air force «Air force Academy named after Professor N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin»,

Zhuravlev Aleksei Aleksandrovich, candidate of technical sciences, professor, research associate, zhuraa1@rambler.ru, Russia, Voronezh, Military educational scientific center air force «Air force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin»

УДК 002; 004.056

МЕТОДИКА ОПЕРАТИВНОГО РЕШЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННО-РАСЧЕТНЫХ ЗАДАЧ ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКИМ КОМПЛЕКСОМ НА ОСНОВЕ РАЦИОНАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ РЕСУРСОВ

А.В. Емельянов, И.В. Левко, К.Е. Легков

В современных условиях при планировании различных организационных операций увеличивается потребность должностных лиц, принимающих решение, в своевременном и полном информационном обеспечении. Это приводит к увеличению количества решаемых информационно-расчетных задач (ИРЗ), что в условиях ограниченных информационно-вычислительных ресурсов (ИВР) программно-технических комплексов (ПТК) с учетом внешних воздействий может создать предпосылки к увеличению продолжительности (а в некоторых случаях и к срыву) планируемой операции. Именно этот факт обуславливает актуальность разработки новых способов распределения ИВР ПТК.

Ключевые слова: программно-технический комплекс, информационно-расчетная задача, информационно-вычислительные ресурсы, планирование, распределение ресурсов.

Задачи распределения разнородных информационно-вычислительных ресурсов играют большую роль при оптимизации процессов планирования и управления. Одним из множества классов задач распределения ресурсов являются задачи математического программирования. В соответствии с общими приемами решения подобных задач разрабатываются частные алгоритмы и методики [1].

Для оперативного решения комплекса ИРЗ необходимо вначале определить перечень решаемых ИРЗ, необходимых для информационной поддержки конкретной планируемой операции. Затем необходимо распределить информационно-вычислительные возможности ИВР, определяемые производительностью вычислительных модулей по предоставлению необходимой информации (результаты решения ИРЗ) [2].

Пусть ПТК обеспечивает информационную поддержку планирования различных операций $O_1, O_2, \dots, O_i$. Определен перечень решаемых ИРЗ $B = \{B_j, j = 1, 2, \dots, m\}$, каждая из которых обеспечивает определенный вклад в информационное обеспечение процесса планирования: β_{ij} – вклад, который вносит результат решения j -й ИРЗ в информационное обеспечение планирования i -й операции.

Известны также потребности должностных лиц, осуществляющих планирование в ИРЗ: c_{ij} – потребность в j -й ИРЗ при обеспечении планирования i -й операции [3].

Таким образом, исходными данными для алгоритма является множество ИРЗ $B = \{B_j, j = 1, 2, \dots, m\}$, матрица весовых коэффициентов ИРЗ при информационной поддержке операции $\beta = |\beta_{ij}|$, матрица потребностей должностного лица ПТК (лица, принимающего решение) в предоставляемой информации $C = |c_{ij}|$.

Необходимо найти такой план $x^* = \|x_{ij}\|$, в котором $x_{ij} = 1$, если j -я ИРЗ обеспечивает информационную поддержку i -й операции, $x_{ij} = 0$ – в противном случае, при котором значение целевой функции

$$W = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{ij} \beta_{ij} \rightarrow \max.$$

При этом определены ограничения:

- для обеспечения конкретной операции каждая ИРЗ может быть решена только один раз [4];
- время решения всего перечня ИРЗ не должно превышать $T_{\max}$.

Шаг 1. Ввод исходных данных.

Шаг 2. Формирование ограничений по привлечению результатов решения каждой ИРЗ в информационном обеспечении операции

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = 1, j = \overline{1, m}$$

Шаг 3. Формирование целевой функции, определяющей максимум эффективности информационной поддержки принятия решения

$$W = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{ij} \beta_{ij} \rightarrow \max.$$

Шаг 4. Проверка условия баланса задачи

$$\max \{j\} = \max \{i\}$$

Если условие баланса задачи не соблюдается, то переход к шагу 5, на котором вводятся фиктивные ИРЗ или фиктивные операции. В частном случае назначения ИРЗ для информационной поддержки конкретной операции вводятся фиктивные операции, не требующие привлечения ни одной ИРЗ.

Шаг 6. Решение «задачи о назначениях» венгерским методом, позволяющим гарантированно получить оптимальное решение $x^* = \|x_{ij}\|$.

После получения решения осуществляется переход к шагу 7, который реализует второй этап методики [5].

Целью второго этапа является при заданном перечне ИРЗ, определяемом планом $x^* = \|x_{ij}\|$, получить план распределения k вычислительных модулей, обеспечивающих решение ИРЗ.

Шаг 8. Ввод исходных данных.

Шаг 9. Формирование плана распределения ИВР для начального состояния $x^0 = \|x_{ijk}^0\|$ с учетом потенциала доступности ВМ $\theta = \|\theta_{ijk}\|$.

Шаг 10. Расчет значений показателя качества решения ИРЗ $Q_{ijk} = \frac{1}{T_{ijk}^{obs}}.$

Шаг 11. Формирование матрицы качества $Q = \|Q_{ijk}\|$.

Шаг 12. Проверка условия соответствия полученных значений показателя качества требуемым показателям для каждого типа ИРЗ. Если показатели качества соответствуют требуемым, то окончание работы алгоритма. Если нет, то переход к следующему шагу 13.

Шаг 13. Формирование целевой функции $W = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m Q_{ij} x_{ij} \rightarrow \max.$

Шаг 14. Формирование ограничений на количество привлекаемых ВМ $\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k x_{ij} \leq N_{ij}$ и время предоставления информации $t_{pi} \leq t_{pi}^{tr}.$

Шаг 15. Формирование ограничений на целочисленность и положительность решения $x_{ij} \geq 0, x_{ij} \in \square.$

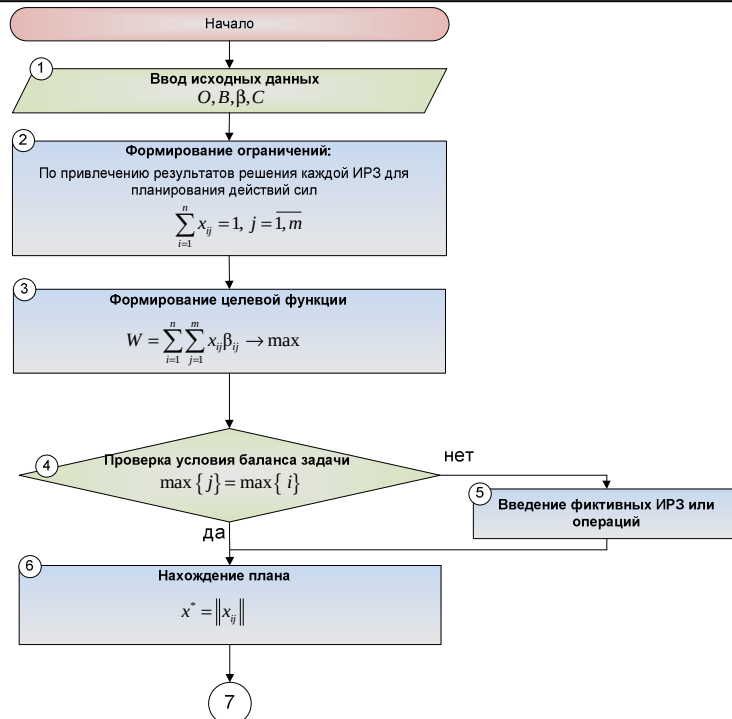


Рис. 1. Блок-схема первого этапа методики

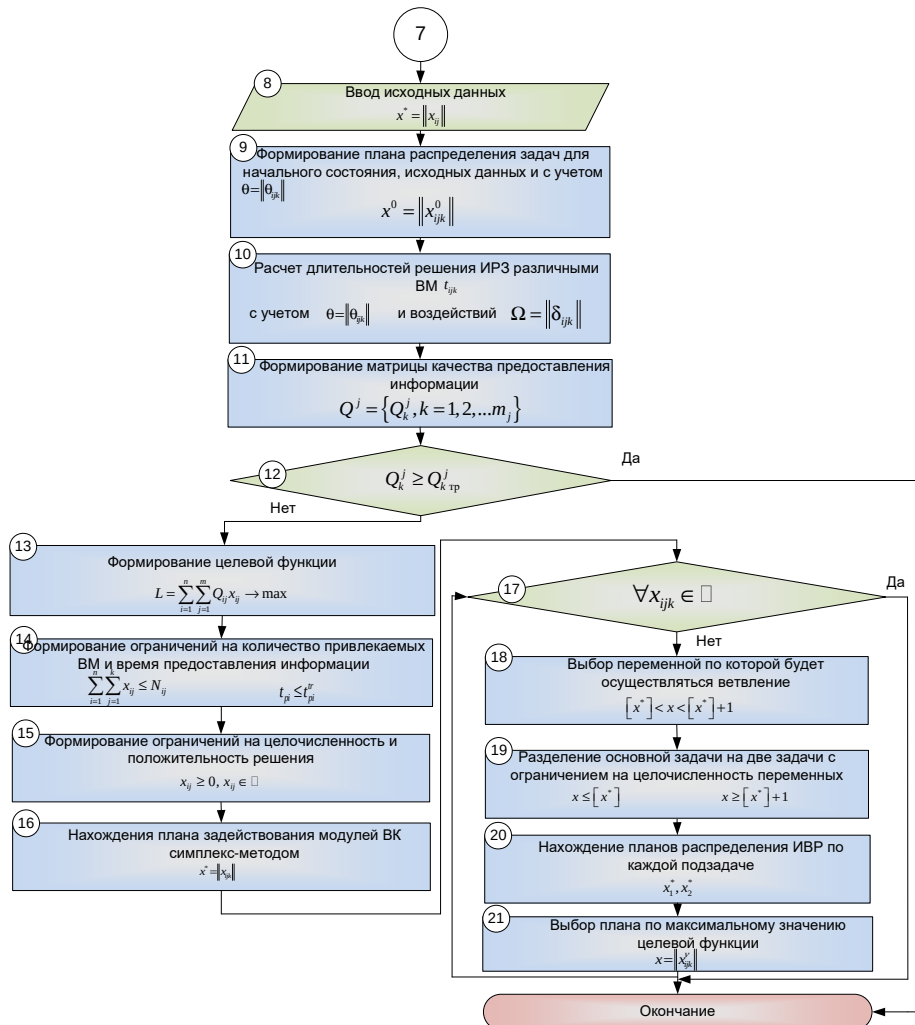


Рис. 2. Блок-схема второго этапа методики

Шаг 16. Нахождение плана распределения вычислительных модулей симплекс-методом $x^* = \|x_{ijk}\|$.

Шаг 17. Проверка условия целочисленности полученного решения. Если решение целочисленное, то окончание работы алгоритма. Если нет, то переход на следующий шаг.

Шаг 18. Выбор переменной, по которой будет осуществляться ветвление.

Шаг 19. Разделение основной задачи на две задачи с ограничением на целочисленность переменных $x \leq \lfloor x^* \rfloor$, $x \geq \lfloor x^* \rfloor + 1$.

Шаг 20. Нахождение планов распределения ИВР по каждой подзадаче x_1^*, x_2^* .

Шаг 21. Выбор плана распределения ИВР по максимальному значению целевой функции.

Заключение. В статье рассмотрены задачи распределения разнородных ИВР, основные способы их распределения и математический аппарат, применяемый при решении этих задач.

Разработанная двухэтапная методика, позволяющая перераспределять имеющиеся информационно-вычислительные ресурсы ПТК, направленная на совершенствование специального программного обеспечения ПТК, осуществляющего поддержку планирования организационных операций. Особенностью методики является использование методов линейного программирования для решения целочисленной задачи распределения вычислительных модулей при обеспечении функционирования ПТК с требуемыми показателями по оперативности решения ИРЗ.

Список литературы

1. Вентцель Е.С. Исследование операций. М., «Советское радио», 1972. 552 с.
2. Буренин А.Н., Легков К.Е. Обеспечение эффективного функционирования информационных подсистем автоматизированных систем управления сложными организационно-техническими объектами на основе процедур оперативного управления ресурсами информационных служб // Информация и Космос, 2017. №3. С. 64–72.
3. Юдин Д.Б., Гольштейн Е.Г. Линейное программирование. Теория, методы, приложения. М.: Наука, 1969. 424 с.
4. Лазарев А.А., Гафаров Е.Р. Теория расписаний. Задачи и алгоритмы. М.: МГУ имени М.В. Ломоносова, 2011. 222 с.
5. Буренин А.Н., Легков К.Е. Современные инфокоммуникационные системы и сети специального назначения. Основы построения и управления: Монография. ООО «ИД Медиа Пабlishер», 2015. 348 с.

Емельянов Александр Владимирович, адъюнкт, slash1@inbox.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского,

Левко Игорь Владимирович, канд. техн. наук, доц., levko_iv@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского,

Легков Константин Евгеньевич, канд. техн. наук, доц., начальник кафедры, constl@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского

METHODOLOGY OF OPERATIONAL SOLUTION OF INFORMATION AND
CALCULATION TASKS BY THE PROGRAM-TECHNICAL COMPLEX BASED ON
RATIONAL RESOURCE ALLOCATION

A.V. Emelyanov, I.V. Levko, K.E. Legkov

In modern conditions, when planning various organizational operations, the need for decision-makers in timely and complete information support is increases. This leads to an increase in the number of solved information and calculation tasks (ICT), which, under conditions of limited information and computing resources (ICR) of program-technical complexes (PTC) and taking into account external influences, may create the prerequisites for an increase in the duration (and in some cases also for a breakdown) planned operation. This fact that determines the urgency of developing new ways of allocating ICR of PTC.

Key words: program-technical complex, information and calculation tasks, information and computing resources, planning, resource allocation.

Emelyanov Alexandr Vladimirovich, postgraduate, slash1@inbox.ru, Russia, St. Petersburg, Mozhaisky Military Space Academy,

Levko Igor Vladimirovich, candidate of technical sciences, docent, levko_iv@mail.ru, Russia, St. Petersburg, Mozhaisky Military Space Academy,

Legkov Konstantin Evgenyevich, candidate of technical sciences, docent, head of the department, constl@mail.ru, Russia, St. Petersburg, Mozhaisky Military Space Academy

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ПРИ РЕШЕНИИ РАЗНОРОДНЫХ ИНФОРМАЦИОННО-РАСЧЕТНЫХ ЗАДАЧ

А.В. Емельянов, К.Е. Легков

В настоящее время для работы системы поддержки и принятия решения при планировании различного рода организационных операций применяются специально разработанные программно-технические комплексы (ПТК), осуществляющие решение совокупности разнородных информационно-расчетных задач (ИРЗ). Однако, с одной стороны информационно-технические возможности ПТК не позволяют решать ИРЗ с высокой оперативностью, с другой стороны в настоящее время отсутствует научно-методический аппарат рационального распределения информационно-вычислительных ресурсов ПТК, обеспечивающих решение ИРЗ. Для устранения этого противоречия в работе предлагается разработать имитационную модель процесса функционирования ПТК, сформировать статистику на основе расчета показателей оперативности решения ИРЗ и выявить «узкие» места функционирования ПТК.

Ключевые слова: программно-технический комплекс, информационно-расчетная задача, планирование, распределение ресурсов.

Основным преимуществом имитационных моделей по сравнению с аналитическими является возможность решения более сложных задач. Имитационные модели позволяют легко учитывать наличие дискретных или непрерывных элементов, нелинейные характеристики, случайные воздействия и др. [1].

При имитационном моделировании реализующий модель алгоритм воспроизводит процесс функционирования системы во времени. Имитируются элементарные явления (события), составляющие процесс, с сохранением их логической структуры и последовательности протекания во времени. Таким образом, разрабатываемая имитационная модель процесса функционирования программно-технического комплекса при решении разнородных информационно-расчетных задач (ИРЗ) является стохастической, дискретной, динамической моделью, предназначенной для оценивания вероятностно-временных характеристик процесса обслуживания заявок на решение ИРЗ.

Согласно руководящих документов, определяющих требования к работе информационных служб, выраженных в определенных значениях показателей вероятностно-временных характеристик функционирования средств автоматизации планирования организационных операций, в качестве показателя оперативности решения ИРЗ выступает показатель среднего времени решения ИРЗ и вероятности своевременного решения ИРЗ [2].

Поскольку процесс решения ИРЗ представляет собой процесс обслуживания заявок на решение ИРЗ, то выражение для расчета времени решения ИРЗ состоит из нескольких компонентов:

$$T_{\text{реш}} = t_{\text{ож}} + t_{\text{обс}} . \quad (1)$$

Так как ИРЗ разнородны и отличаются приоритетами и величиной используемого информационно- вычислительного ресурса, привлекаемого для их решения, то целесообразно рассчитывать средние времена ожидания и обслуживания групп заявок на ИРЗ со схожими характеристиками. Тогда, сокращая время ожидания заявкой обслуживания можно сократить время решения ИРЗ и время планирования в целом.

Таким образом целью имитационного моделирования является определение (расчет) значений выбранного показателя оперативности для различных стратегий проведения операции (или вариантов реализации проектируемой системы). При разработке конкретной модели цель моделирования должна уточняться с учетом используемого критерия оперативности. Для критерия пригодности модель, как правило, должна обеспечивать расчет значений показателей оперативности для всего множества допустимых стратегий. При использовании критерия оптимальности модель должна позволять непосредственно определять параметры исследуемого объекта, дающие экстремальное значение показателя оперативности [3].

В настоящее время информационная поддержка планирования организационных операций осуществляется посредством программно-технических комплексов.

Программно-технический комплекс (ПТК) автоматизированного планирования организационных операций структурно состоит из 12 функциональных групп, каждая из которых способна решать перечень ИРЗ в соответствии с графиком, типовой пример которого представлен на рис. 1 [4].

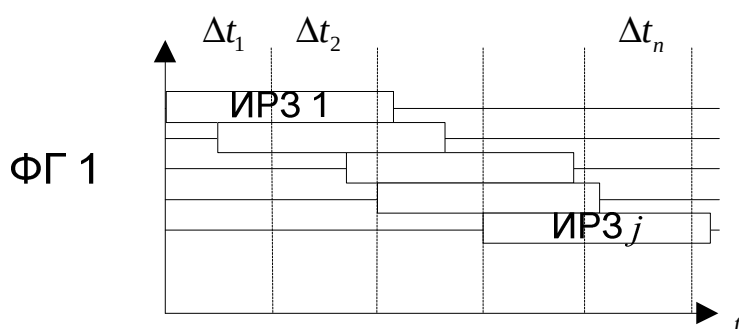


Рис. 1. Типовой план решения ИРЗ функциональной группой 1

Так как основной целью функционирования ПТК является своевременное решение ИРЗ. Целью работы имитационной модели является то, чтобы на основе статистических данных, накопленных в результате много-

кратного прогона всего комплекса ИРЗ через вычислительные модули определить «узкие» места в функционировании и на этой основе предложить решения для устранения этих недостатков.

Исходными данными модели являются (рис.2):

- множество источников заявок на решение ИРЗ (представлены блоками функциональных групп ФГ1–ФГ12);
- блок очереди (представленный сетевым коммутатором);
- множество серверов, обеспечивающих решение ИРЗ (блоки МС 1, МС 2, СБД 1, СБД 2);
- множество вычислительных модулей, обеспечивающих решение ИРЗ;
- блок приемника обслуженных заявок;
- блок формирования компьютерных атак.

Рассмотрим работу каждого блока функциональной схемы ПТК.

Блоки источников заявок. Основным элементом этих блоков является «Формирователь заявок». Настройками этого блока задается интервал времени между последовательными заявками. В модели интервал времени задается генератором интервалов времени между заявками в соответствии с планом-графиком выполнения задач должностными лицами функциональных групп.

Блок «Шлюз разрешения». Так как количество заявок на решение ИРЗ для каждой функциональной группы заранее известно, предусмотрен блок «Шлюз разрешения». Управление им осуществляется преобразованным сигналом результата сравнения заданного и фактического количества заявок. В интервалы времени, когда заданное количество заявок уже поступило в коммутатор, но еще не обслужено, выход блока формирователя заявок блокируется шлюзом разрешения.

Генератор. Разнородность ИРЗ реализуется за счет указания особенного свойства для каждой заявки – ее веса. Веса заявок задаются генератором, формирующим случайное число, распределенное равномерно в интервале от 0 до 1, которое умножается на заданный максимальный вес. Таким образом, задается и случайность этого параметра с одной стороны и управление этим параметром в зависимости от ИРЗ с другой стороны.

Основным показателем, рассчитываемым в модели, является среднее время ожидания заявкой на решение ИРЗ обслуживания, при этом вероятность предоставления результатов решения ИРЗ не должна превышать требуемой.

Таймерные блоки. Набор статистики для времени обслуживания реализуется посредством двух таймерных блоков. Первый из них («Начало периода пребывания заявки в системе») инициирует начало отсчета, а второй (в блоке приемника заявок) останавливает таймер и записывает показатель времени в базу данных временных характеристик.

Блок очереди (коммутатор сетевой). Реализует объединение путей поступления заявок и обслуживание их вычислительными модулями серверов. Процесс обслуживания имитируется, как задержка заявки на определенное время. Дисциплина очереди FIFO (первым поступил – первым вышел). Емкость очереди задана и равна количеству портов коммутатора. Кроме того, блок очереди является ценным источником статистической информации. В каждый момент опроса блок сообщает свое содержимое (количество заявок в очереди, ее длину), среднюю длину очереди и среднее время ожидания каждой заявки в очереди [5].

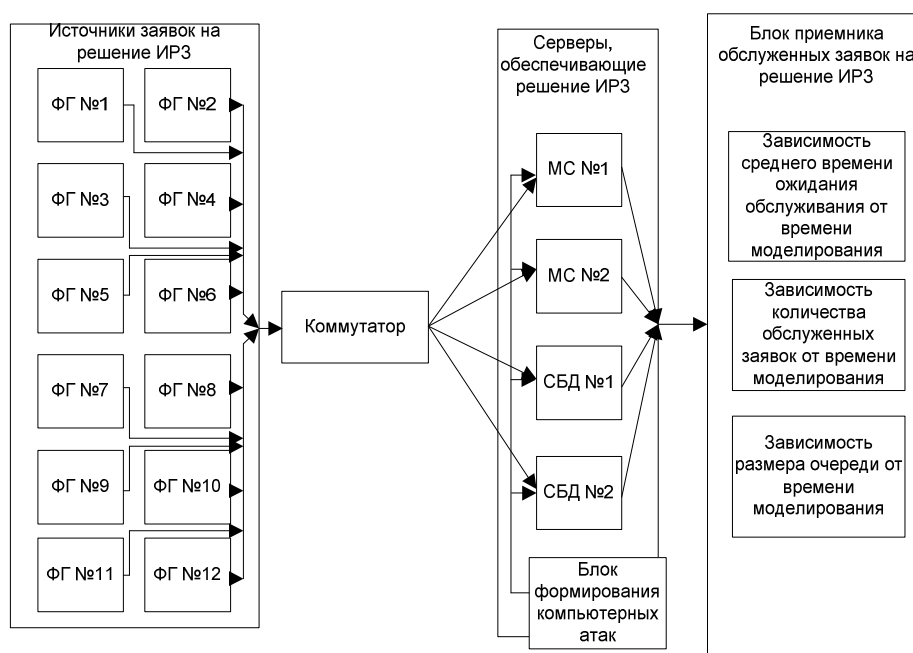


Рис. 2. Функциональная схема работы имитационной модели

Блок «Объединитель путей». Заявки в очередь могут поступать не только из источника заявок, но и по обратной связи после отказа вычислительного модуля. Однако очередь имеет лишь один вход. Решением проблемы является блок «Объединитель путей», который направляет заявки с обоих своих входов на один выход. Настройки блока таковы, что если две заявки придут в блок одновременно, на выход первой поступит заявка, пришедшая на вход IN1. Счетчик вернувшихся заявок позволит оценить еще один показатель.

Блок обслуживания. Включает в себя блоки обслуживающих устройств (серверов). Имитацией обслуживания при этом является задержка заявки в сервере на заданный период времени. Длительность обслуживания задается как входной сигнал блока обслуживания, источником которого является генератор времени обслуживания. Кроме того, в блоке учитывается вес пришедшей заявки. Этот учет проявляется в суммировании сгенерированного времени обслуживания и веса заявки [5].

Блок приемника заявок. Является конечным пунктом назначения заявок. В нем установлен счетчик количества прибывших заявок. Это количество сравнивается с заданным перед началом эксперимента. Совпадение этих значений говорит о том, что все заявки обслужены и служит сигналом для окончания моделирования.

Блок формирования компьютерных атак. Имитация воздействия компьютерной атаки производится специальным блоком. В качестве исходных данных используются значения параметров, соответствующие профильным моделям эквивалентных КА, нарушающих работоспособность вычислительных модулей. Это атаки типа: локальный отказ в обслуживании, удаленный отказ в обслуживании, «спам» и логическое отключение пользователя. Процесс воздействия представляется в виде стохастической сети [6].

В результате работы модели получены зависимости ряда показателей от времени моделирования:

- зависимость среднего времени ожидания обслуживания от времени моделирования;
- зависимость количество обслуженных заявок на решение ИРЗ от времени моделирования;
- зависимость размера очереди от времени моделирования.

Представлены временные характеристики процесса решения ИРЗ (рис. 3).

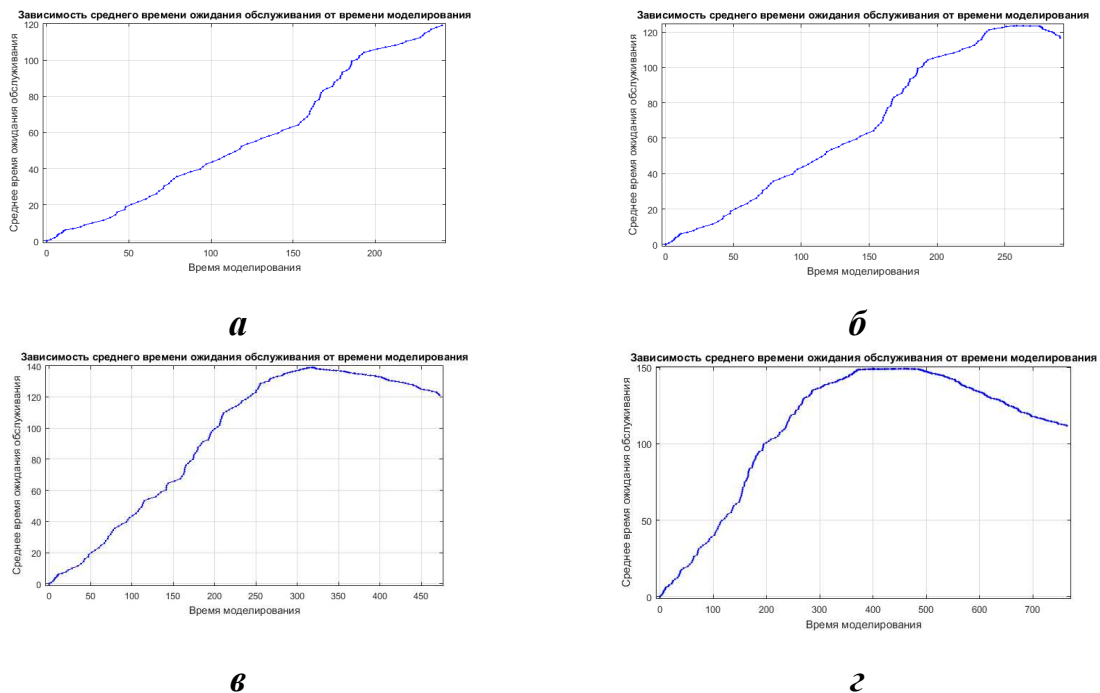


Рис. 3. Графики зависимости среднего времени ожидания заявками обслуживания от времени моделирования (вероятность отказа ИВР): а — 0; б — 0,2; в — 0,5; г — 0,7

Вывод: «узким» местом функционирования ПТК является момент решения множества параллельных ИРЗ, поступающих от функциональных групп, при котором обеспечение их решения информационно-вычислительными ресурсами спланировано по круговому циклу, что ведет к перегрузке и отказам в обслуживании. На рис.3 представлены зависимости показателя среднего времени ожидания заявкой обслуживания при решении ИРЗ ПТК от времени. Для одного и того числа решаемых ИРЗ при изменении параметров воздействий компьютерных атак (рис. 3) увеличивается общее время моделирования, а также среднее время ожидания заявкой обслуживания при решении ИРЗ ПТК.

Заключение. Разработанная имитационная модель отражает существенные свойства процесса функционирования ПТК в условиях воздействий, а результаты моделирования являются основой для разработки алгоритмов и методик рационального распределения информационно-вычислительных ресурсов, обеспечивающих решение ИРЗ.

Список литературы

1. Буренин А.Н., Легков К.Е., Оркин В.В. Вопросы применения имитационной модели при управлении функционированием информационной подсистемы автоматизированной системы управления сложными организационно-техническими объектами в условиях массовых возмущений // Известия Тульского государственного университета. Технические науки, 2017. Вып. 9. Ч. 1. С. 494–500.
2. Буренин А.Н., Легков К.Е. Современные инфокоммуникационные системы и сети специального назначения. Основы построения и управления: монография. ООО «ИД Медиа Паблишер, 2015. 348 с.
3. Васильев К.К., Служивый М.Н. Математическое моделирование инфокоммуникационных систем. М.: Горячая линия. Телеком, 2018. 236 с.
4. Лазарев А.А., Гафаров Е.Р. Теория расписаний. Задачи и алгоритмы. М.: МГУ имени М.В. Ломоносова, 2011. 222 с.
5. Клейнрок Л. Теория массового обслуживания. М.: Машиностроение, 1979. 432 с.
6. Коцыняк М.А., Кулешов И.А., Кудрявцев А.М., Лаута О.С. Киберустойчивость информационно-телекоммуникационной сети. СПб.: Бостон-спектр, 2015. 150 с.

Легков Константин Евгеньевич, канд. техн. наук, доц., начальник кафедры, constl@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского,

Емельянов Александр Владимирович, адъюнкт, slash1@inbox.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского

SIMULATION MODEL OF THE PROCESS OF FUNCTIONING
OF THE PROGRAM-TECHNICAL COMPLEX IN SOLVING VARIOUS
INFORMATION AND CALCULATION TASKS

A.V. Emelyanov, K.E. Legkov

Currently, for the support system and decision-making when planning various kinds of organizational operations specially designed program-technical complex (PTC) are used. This PTC solve a set of heterogeneous information and calculation tasks (ICT). However, on the one hand information technology capabilities of PTC do not allow to solve ICT with high efficiency, on the other hand there is currently no scientific and methodological apparatus of rational allocation of information and computing resources of PTC providing ICT solution. To eliminate this contradiction in the work it is proposed to develop a simulation model of the PTC functioning process, to form statistics based on the calculation of the indicators of the ICT resolution efficiency and to identify the «narrow» places of PTC functioning.

Key words: program-technical complex, information and calculation tasks, planning, resource allocation.

Emelyanov Alexandr Vladimirovich, postgraduate, slash1@inbox.ru, Russia, St. Petersburg, Mozhaisky Military Space Academy,

Legkov Konstantin Evgenyevich, candidate of technical sciences, docent, head of the department, constl@mail.ru, Russia, St. Petersburg, Mozhaisky Military Space Academy

УДК 004.056.052

**ПОДХОД К ЗАЩИТЕ ЦИФРОВОЙ ИНФОРМАЦИИ
В АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ СПЕЦИАЛЬНОГО
НАЗНАЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ
СКРЫТЫХ МЕТАЮЩИХ СРЕДСТВ**

С.В. Калиниченко, П.В. Корчагин, В.К. Платонов

Предлагается подход к оценке защищенности информационных ресурсов для совершенствования систем защиты информации на основе методов теории возможностей.

Ключевые слова: специальные метящие средства, сложность метящего средства, вероятность своевременного обнаружения нарушения, динамика нарастания сложности прогнозирования, перехват инициативы при защите от копирования цифровой информации.

Эффективность созданной в организации системы защиты информации (СЗИ) оценивается по степени соответствия этой системы требованиям по отражению актуальных информационных угроз. Данный подход кажется логически обоснованным и вполне разумным. Но, по вполне

объективным причинам, связанным с тем, что средства информационного нападения развиваются независимо от пожеланий разработчиков СЗИ, приведенное утверждение является не вполне верным. На момент подписания Заказчиком акта приемки только разработанной СЗИ последняя уже безнадежно устарела с точки зрения технически подготовленных и агрессивных нарушителей. В случае, даже если разработанная СЗИ на момент начала ее эксплуатации безукоризненно борется со всеми информационными угрозами, её эффективность с каждым часом будет всё время снижаться и снижаться.

Данная тенденция обусловлена пассивностью защищающейся стороны, реагирующей с большим или меньшим запаздыванием на активные действия атакующей стороны. В философском аспекте данная тенденция – отставание брони от меча – действовала всегда. Необходимо отметить следующие очень важные аспекты развития средств противоборства:

средства нападения непрерывно совершенствуются и развиваются, и только вслед за ними со значительным опозданием появляются и развиваются адекватные средства обороны;

разработка и эксплуатация систем обороны обходится Заказчику намного дороже средств нападения.

Поясним сказанное на следующих примерах:

боевое применение баллистических ракет в 1944 г. привело к появлению экспериментальных противоракетных комплексов только в 1962 г. [1];

появление противоракетных комплексов в 1962 г. привело к разработке и принятию на вооружение в 1971 г. маневрирующих боевых блоков, легко уходящих от противоракет [1];

себестоимость перехвата одного боевого блока во много раз выше себестоимости доставки боевого блока к объекту удара [1].

Не стоит думать, что тенденции, справедливые в сфере разработки и применения летального оружия, отличаются от таковых в сфере информационного противоборства. Чтобы преодолеть в этой борьбе указанные выше тенденции необходимо найти качественно новые средства и методы, причем этот поиск должен быть направлен, прежде всего, на перехват инициативы в информационном противоборстве. В противном случае уровень развития СЗИ отстанет от уровня развития средств информационного нападения навсегда.

Необходимо отметить, что первые свидетельства перелома в противоборстве средств защиты и нападения в информационной сфере уже существуют [2].

Агенты ФБР используют для разоблачения нарушителя цифровые водяные знаки (ЦВЗ) – технологию, созданную для защиты авторских прав мультимедийных файлов. Обычно цифровые водяные знаки невидимы. Однако ЦВЗ могут быть (или стать после определённого времени) види-

мыми на изображении или видео. Обычно это информация представляет собой текст или логотип, который идентифицирует автора или законного владельца.

Важнейшее применение цифровые водяные знаки нашли в системах защиты от копирования, которые стремятся предотвратить или удержать от несанкционированной утери цифровые данные. Стеганография применяется ЦВЗ, когда стороны обмениваются секретными сообщениями, внедрёнными в цифровой сигнал, кроме того используют как средство защиты документов с фотографиями – паспортов, водительских удостоверений и кредитных карт. Некоторые форматы ЦВЗ могут также нести в себе дополнительную информацию, называемую метаданными. Эта информация внедрена прямо в объект мультимедиа, который в этом случае будет представлять собой контейнер (носитель) метаданных.

Отметим, что технология ЦВЗ в настоящее время устаревает, потому что разработаны достаточно эффективные средства обнаружения и удаления (маскировки) цифровых водяных знаков. Однако идея разработки специальных метящих средств в настоящее время весьма актуальна.

Специальные метящие средства традиционно характеризуются следующим набором показателей:

внедряемый объём информации – это количество скрытой информации в сообщении, которое внедряется в сигнал;

извлекаемый объём информации – это количество скрытой информации, которое извлекается из сигнала при его анализе администраторами безопасности;

сложность метящего средства – определяется суммарной сложностью технических средств и алгоритмов, которые используются при внедрении скрытых меток в файл и для извлечения информации из сигнала при его анализе администраторами безопасности;

сложность обнаружения и удаления скрытых меток – определяется суммарной сложностью алгоритмов, которые используются нарушителем для обнаружения и удаления скрытых меток;

вероятность своевременного удаления скрытых меток ($P_{удCM}^{C\epsilon}(x_{ij})$) – определяется вероятностью обнаружения и удаления j -м нарушителем скрытых меток до момента актуализации конфиденциальной информации, содержащейся в i -й скрытой метке;

вероятность своевременного обнаружения нарушения ($P_{Обн}^{C\epsilon}(x_{ij})$) – определяется вероятностью обнаружения действий j -го нарушителя до момента актуализации конфиденциальной информации, содержащейся в i -й скрытой метке;

вероятность обнаружения нарушения ($P_{Обн}^{Нар}(x_{ij})$) – определяется вероятностью обнаружения действий j -го нарушителя в течении произвольного отрезка времени даже после актуализации конфиденциальной информации, содержащейся в i -й скрытой метке.

Вероятности своевременного удаления скрытых меток ($P_{удсм}^{C\delta}(x_{ij})$), своевременного обнаружения нарушения ($P_{обн}^{C\delta}(x_{ij})$) также, как и вероятность обнаружения нарушения ($P_{обн}^{Har}(x_{ij})$) – по своей сути являются «непознаваемой по Канту вещью в себе» [3]. Данные для оценки указанных показателей обычными статистическими методами собрать практически невозможно по многим причинам. Главная из них: невозможно ни сохранить условия проведения эксперимента (наблюдения) неизменными, ни найти преобразования, позволяющего соотнести одни условия проведения, с другими. Однако можно установить определённые рамки, за пределы которых упомянутые вероятности не выходят. Рамки можно установить путем применения методов интервального анализа [4], но авторы предпочитают методы теории возможностей [5, 6].

Рассмотрим два показателя: $P_{удсм}^{C\delta}(x_{ij})$ и $P_{обн}^{Har}(x_{ij})$. Сторона «похитителей» информации (нарушители) в данной статье отмечается индексом A (*antagonistic*), сторона, защищающая информацию, отмечается индексом B (*bodyguard*), событие, заключающееся в своевременном удалении скрытых меток, обозначается как $A_{уд}$, событие, заключающееся в обнаружении нарушения, обозначается как $B_{обн}$. Связь между показателем $P_{удсм}^{C\delta}(x_{ij})$ и событием $A_{уд}$ определяется через функцию принадлежности $\mu_A(p)$ [5, 6], где $p \in [0, 1]$ – параметр, определяющий конкретное значение $P_{удсм}^{C\delta}(x_{ij})$. Связь между показателем $P_{обн}^{Har}(x_{ij})$ и событием $B_{обн}$ определяется через функцию принадлежности $\mu_B(p)$, где $p \in [0, 1]$ – параметр, определяющий конкретное значение $P_{обн}^{Har}(x_{ij})$. Физическая интерпретация функции принадлежности – описание полученной оценки при помощи интервала с нечёткими (размытыми; пушистыми, как считают американцы; диффузными, как считают поляки) границами.

На основе экспертных оценок, базирующихся на исходных данных, были получены нечеткие рамочные оценки, представленные в виде пары указанных функций принадлежности (рис. 1).

Из графиков, представленных на рис. 1, следует:

интервалы возможных значений вероятностей p , характеризующиеся функциями принадлежности $\mu_A(p)$, $\mu_B(p)$ невелики, как и их средние значения;

средние значения нечётких интервалов близки друг к другу.

В рассматриваемом случае указанные свойства нечётких интервалов являются отражением мнения экспертов, которые хорошо понимают, что решение как задачи своевременного удаления скрытых меток, так и задачи обнаружения нарушения, сами по себе очень сложны, алгоритмы их решения приблизительно эквивалентны по сложности, а сами задачи не всегда могут быть успешно решены даже при выделении для их решения значительных ресурсов.

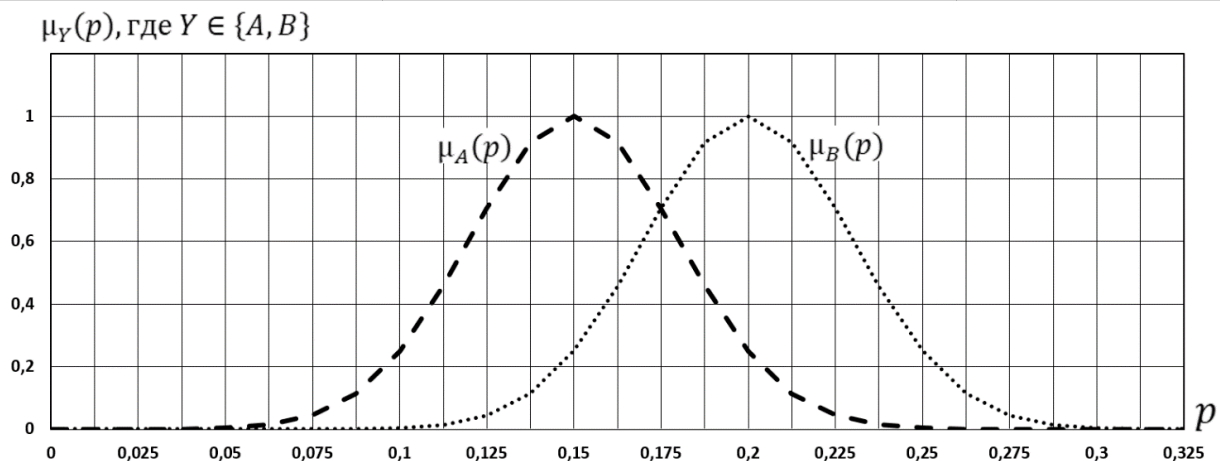


Рис. 1. Вид функции принадлежности $\mu_A(p)$, характеризующей нечёткую интервальную оценку вероятности своевременного удаления скрытых меток, и функции принадлежности $\mu_B(p)$, характеризующей нечёткую интервальную оценку вероятности обнаружение нарушения

На рис. 2 в схематичном виде представлена динамика нарастания сложности прогнозирования информационным противником (стороной *A*) возможных вариантов модифицированных средств постановки скрытых меток стороной *B*.

Начальный период применения принципиально новых технологий, в том числе и технологий скрытых меток – очень сложный и противоречивый процесс, который может начинаться как снизу – от рядового исполнителя, так и сверху.

Смелое и решительное внедрение новых технологий в сферу информационной борьбы всегда является неожиданным для стороны *A*, но, в целом, предсказуемым и ожидаемым. Первый вариант нового технического решения, например, средства постановки скрытых меток в файле с конфиденциальной информацией, после первого шокирующего воздействия на сторону *A* быстро разгадывается. Для удаления или маскирования указанных меток сторона *A* находит адекватные средства. Но сторона *B*, разобравшись в сложившейся ситуации, более глубоко вникнув в проблему и освоив новые знания, разрабатывает новые более эффективные и уникальные средства постановки скрытых меток второго поколения (рис. 2).

Есть такой афоризм: «Стратеги всегда готовятся к прошлой войне». Чтобы нестать похожими на таких стратегов сторона *A* должна заранее отработать несколько возможных вариантов обнаружения и удаления меток, создаваемых средствами второго поколения. Только в этом случае реакция на реальное средство второго поколения будет оперативной. Но если ресурсы стороны *A* окажутся недостаточными для отработки требуемого чис-

ла вариантов, которые могут быть использованы стороной B , вероятность успешного удаления скрытых меток при появлении нового поколения метящих средств снизится так, как показано на рис. 3.

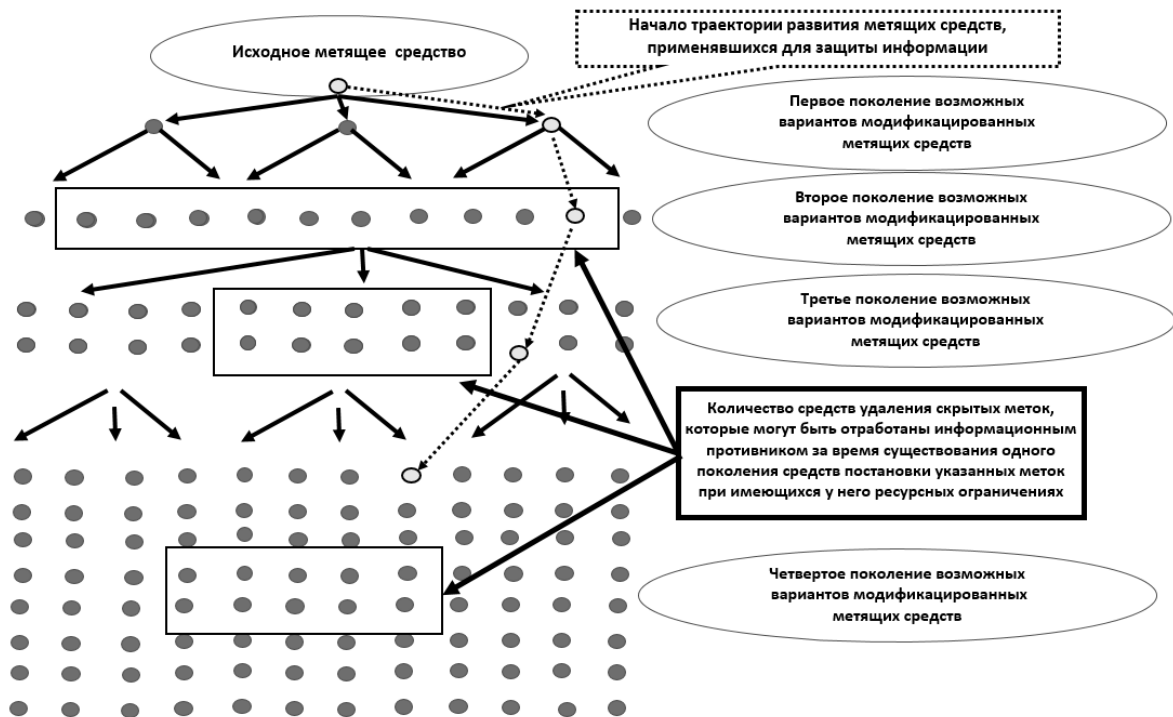


Рис. 2. Схема, характеризующая динамику нарастания сложности прогнозирования информационным противником возможных вариантов модифицированных средств постановки скрытых меток: ○ – реально используемое метящее средство; ● – технически возможный вариант метящего средства

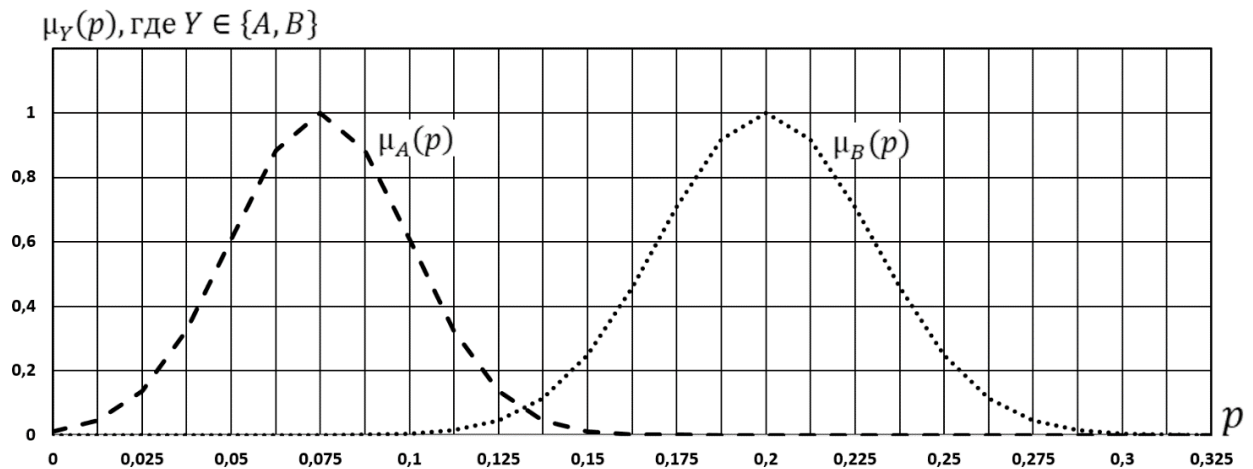


Рис. 3. Вид функций принадлежности $\mu_A(p)$ и $\mu_B(p)$ после создания метящих средств второго поколения

Из графиков, представленных на этом рисунке следует, что нечёткий интервал оценок, характеризующий возможности стороны B по обнаружению нарушителя, не меняет своего исходного положения, а нечёткий интервал оценок, характеризующий возможности стороны A по обнаружению и удалению скрытых меток, смещается влево. Средние значения нечётких интервалов уже удалены друг от друга существенно больше чем на рис. 1. Необходимо отметить, что полученный результат относится к случаю, когда ресурсные ограничения (финансирование, количество исполнителей), используемые стороной A остаются неизменными.

При подготовке к отражению метящих средств 3-го, 4-го и так далее поколений сторона A должна отрабатывать все большее количество возможных вариантов обнаружения и удаления меток. Если по мере роста номера поколений метящих средств ресурсы стороны A не возрастают, то вероятность успешного обнаружения и удаления скрытых меток будет продолжать снижаться. Данная тенденция отображена на рис. 4. Из графиков, представленных на рисунке, следует:

среднее значение интервалов возможных значений вероятностей обнаружения и удаления меток при росте j (номера поколения метящих средств) смещается к нулю;

ширина интервалов возможных значений вероятностей обнаружения и удаления меток при росте j постоянно снижается.

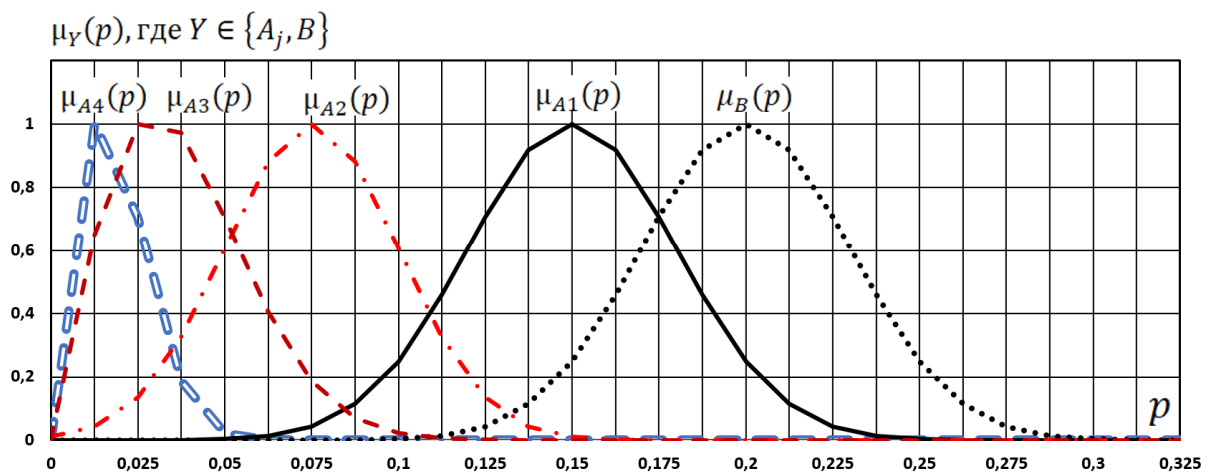


Рис. 4. Вид функций принадлежности $\mu_{A_j}(p)$ и $\mu_B(p)$ после создания метящих средств j -го поколения

То есть, при фиксированных ресурсах, выделяемых на разработку сложных систем обнаружения и удаление скрытых меток из файла, эффективность этих систем неизменно будет снижаться [7]. Это снижение обусловлено высокой степенью неопределённости, связанной с прогнозированием

нием стороной Аоблика и принципов функционирования метящих средств, разрабатываемых стороной В. Эффективность разработки стороной В остается постоянной даже при использовании фиксированных ресурсов. Объясняется данное обстоятельством тем, что в поединке сторон А и В инициатива всегда остается за стороной, защищающей свои информационные ресурсы (за стороной В).

Таким образом, применение специальных метящих средств, обеспечивающих высокую сложность обнаружения и удаления из файлов скрытых меток и создающих метки с большим объемом извлекаемой информации, предоставляет возможность стороне, защищающей свои информационные ресурсы, не только существенно повысить надежность их защиты от несанкционированного копирования, но осуществить перехват инициативы для интенсивного противоборства в информационном пространстве.

Список литературы

1. Уваров В.С. Противоракетная оборона России: Взгляд через годы. Чебоксары: Новое время, 2017. 300 с.
2. Член жюри «Оскара» помогал видеопиратам? [Электронный ресурс]. URL: <https://lenta.ru/news/2004/02/05/expel>. (дата обращения: 11.01.2017).
3. Шаповалов В.Ф., Философия науки и техники: О смысле науки и техники и о глобальных угрозах научно-технической эпохи: учебное пособие. М.: ФАИР-ПРЕСС, 2004. 320 с.
4. Шарый С.П. Конечномерный интервальный анализ: монография. Институт вычислительных технологий СО РАН. Новосибирск: Издательство «XYZ», 2008. 726 с.
5. Дюбуа Д., Прад А. Теория возможностей: приложения к представлению знаний в информатике; пер. с фр. М.: Радио и связь, 1990. 288 с.
6. Пытьев Ю.П. Возможность: Элементы теории и применения. М.: Эдиториал УРСС, 1990. 192 с.
7. Вентцель Е.С. Теория вероятностей: учеб. для вузов. М.: Физматлит, 1962. 564 с.

Калиниченко Сергей Владимирович, канд. техн. наук, sergeybka@yandex.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского,

Корчагин Павел Викторович, канд. техн. наук, pavel.v.korchagin@gmail.com, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского,

Платонов Владимир Константинович, platonov.vk@gmail.com, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского

**APPROACH TO THE PROTECTION OF DIGITAL INFORMATION IN AUTOMATED
SPECIAL SYSTEMS BASED OF THE USE OF HIDDEN TAGGING TOOLS**

S.V. Kalinichenko, P.V. Korchagin, V.K. Platonov

An approach is proposed to assess the security of information resources for improving information security systems on the basis of methods of the theory of possibilities.

Key words: special tagging tools, complexity of the specialtagging tools, probability of timely detection of a violation, dynamics of increasing complexity of forecasting, the capture of the initiative in the protection against copying of digital information.

Kalinichenko Sergey Vladimirovich, candidate of technical sciences, sergeybka@yandex.ru, Russia, St. Petersburg, Mozhaisky Military Space Academy,

Korchagin Pavel Viktorovich, candidate of technical sciences, pavel.v.korchagin@gmail.com, Russia, St. Petersburg, Mozhaisky Military Space Academy,

Platonov Vladimir Konstantinovich, platonov.vk@gmail.com, Russia, St. Petersburg, Mozhaisky Military Space Academy

УДК 621.86

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ЛИФТОВЫХ ЛОВИТЕЛЕЙ РЕЗКОГО ТОРМОЖЕНИЯ

П.В. Витчук, Н.В. Трухов, А.В. Усачев

Кратко рассмотрена классификация лифтовых ловителей и проблемы, возникающие при их расчете. Предложена методика расчета ловителей резкого торможения. Показано, что при расчете аварийной скорости для лифтов с номинальной скоростью движения до 0,63 м/с целесообразно использовать рекомендации ВНИИПТМАШ. Приведены зависимости для расчета замедления кабины при посадке на ловители резкого торможения. Даны примеры расчета эксцентрикового и роликового ловителей. Показано, что при расчете геометрических параметров рабочих элементов ловителей целесообразно использовать многовариантную процедуру расчета с использованием прикладных программ для ЭВМ.

Ключевые слова: лифт, ловитель, эксцентрик, ролик, клин, многовариантный расчет, проектирование.

Безопасность эксплуатации лифтов обеспечивается на основе введения в их конструкцию автоматически действующих ловителей, предназначенных для остановки и удержания на направляющих кабины или противовеса в случае достижения ими заранее определенной (аварийной) скорости, независимо от причины, по которой увеличилась скорость.

По характеру нарастания тормозного усилия ловители бывают: резкого торможения (используются при номинальной скорости лифта до 0,63 м/с), резкого торможения с амортизирующим элементом (до 1 м/с) и плавного торможения (свыше 1 м/с). В качестве рабочих элементов ловителей используют клинья, эксцентрики и ролики [1]. В ловителях резкого торможения рабочие элементы непосредственно воздействуют на направляющие, в ловителях резкого торможения с амортизирующим элементом и плавного торможения – через податливую систему энергонакопительного или энергорассеивающего типа (пружину, амортизатор и др.).

Наибольшую сложность при расчете ловителей представляет случай самозаклинивания, который имеет место при посадке кабины или противовеса на ловители резкого торможения, так как в этом случае при торможении возникают неопределенные по своей величине силы. Эти силы

определяются начальными условиями торможения и геометрическими параметрами рабочих элементов ловителей. Поэтому известные методики расчета лифтовых ловителей, изложенные в источниках [1-3 и др.], изобилуют большим числом допущений и эмпирических коэффициентов. Это приводит к тому, что результаты расчета параметров ловителей и действующих на пассажиров в процессе торможения ускорений могут сильно разниться в зависимости от выбранных допущений и коэффициентов [4, 5].

Кроме того, приведенные в известной литературе [1, 2] значения эмпирических коэффициентов были получены более 60 лет назад, что ставит вопрос об их актуальности в настоящий момент.

С целью некоторой компенсации неопределенностей, возникающих при расчете ловителей резкого торможения, предлагается методика расчета, отличительной особенностью которой является то, что расчет параметров, информация о которых носит спорный характер, выполняется в конце расчета. Таким образом, при необходимости внесения каких-либо изменений в расчет, объем вычислений, подлежащий перерасчету, минимален. Предлагаемая методика состоит из следующих этапов:

1. Выбор типа ловителя в зависимости от номинальной скорости кабины или противовеса (см. п.5.4.6.4 ГОСТ Р 53780-2010).

2. Выбор формы рабочих элементов ловителей в зависимости от назначения и грузоподъемности лифта. При этом могут быть использованы рекомендации, данные в [3], или имеющиеся сведения о лифтах-аналогах проектируемому.

3. Выбор материала рабочих элементов ловителей. Из [1-3] известно, что для изготовления роликов, эксцентриков и клиньев наиболее часто используют Сталь 35, 45 и 20Х. В грузовых лифтах малой грузоподъемности могут быть также использованы эксцентрики из латуни.

4. Расчет геометрических параметров рабочих элементов ловителей и проверка их на прочность в соответствии с зависимостями [1-3]. Если условие прочности не выполняется, то следует изменить материал рабочего элемента или его геометрические параметры.

5. Расчет аварийной скорости и замедления кабины лифта, сравнение полученной величины замедления с допустимым значением по ГОСТ Р 53780-2010.

Для расчета минимальной $V_{a \min}$ и максимальной $V_{a \max}$ аварийных скоростей лифта могут быть использованы рекомендации, приведенные в ГОСТ Р 53780-2010 или разработанные ВНИИПТМАШ [2].

В соответствии с п. 5.4.7.1 ГОСТ Р 53780-2010 ограничитель скорости, приводящий в действие ловители кабины, должен срабатывать, если скорость движения кабины вниз превысит номинальную не менее чем на 15 % и составит не более: а) 0,8 м/с – для ловителей резкого торможения; б) 1,5 м/с – для ловителей плавного торможения и ловителей резкого торможения с амортизирующим элементом при номинальных скоростях не

более 1 м/с; в) $1,25V + 0,25 / V$ м/с для ловителей плавного торможения при номинальных скоростях более 1,0 м/с, где V – номинальная скорость кабины, м/с.

В соответствии с рекомендациями ВНИИПТМАШ [2] минимальная аварийная скорость в момент включения ловителей (также, как и в ГОСТ Р 53780-2010) составляет $V_{a \min} = 1,15V$, а максимальная рассчитывается по формуле:

$$V_{a \max} = kV, \text{ м/с} \quad (1)$$

где k – коэффициент, зависящий от номинальной скорости лифта.

С учетом того факта, что большинство лифтов выполняют со стандартными значениями номинальной скорости по ГОСТ Р 53770-2010 (ИСО 4190-1:1999) «Лифты пассажирские. Основные параметры и размеры» и ГОСТ Р 53771-2010 (ИСО 4190-2:2001) «Лифты грузовые. Основные параметры и размеры», можно рассчитать минимальное и максимальное значения аварийной скорости, при которых будет осуществляться включение ловителей. Результаты расчета представлены в таблице.

Как видно из таблицы, некоторые ситуации, рассчитанные в соответствии с ГОСТ Р 53780-2010, являются маловероятными, например, то, что лифт с номинальной скоростью движения 0,25 м/с разгонится до 0,80 м/с. Поэтому введем допущение – для диапазона номинальных скоростей 0,25...0,50 м/с будем использовать значения аварийных скоростей, полученных с учетом рекомендаций ВНИИПТМАШ, а для диапазона скоростей 0,63...6,00 м/с – рекомендаций ГОСТ Р 53780-2010. Полученные значения аварийных скоростей могут быть использованы при определении величин замедления кабины, необходимых для расчета каждого известного типа ловителей. Кроме того, из таблицы видно, что, начиная с номинальной скорости движения лифта $V = 1$ м/с, значения аварийных скоростей, полученные с использованием ГОСТ Р 53780-2010 и рекомендаций ВНИИПТМАШ различаются несущественно.

Значения аварийных скоростей в момент включения ловителей

Номинальная скорость, м/с	Аварийная скорость, м/с		
	минимальная	максимальная	
		ГОСТ Р 53780-2010	ВНИИПТМАШ
0,25	0,29	0,80	0,35
0,40	0,46	0,80	0,56
0,50	0,58	0,80	0,70
0,63	0,72	0,80	0,88
1,00	1,15	1,50	1,40
1,60	1,84	2,16	2,13
2,00	2,30	2,63	2,66

Номинальная скорость, м/с	Аварийная скорость, м/с		
	минимальная	максимальная	
		ГОСТ Р 53780-2010	ВНИИПТМАШ
2,50	2,88	3,23	3,33
3,00	3,45	3,83	3,99
3,50	4,03	4,45	4,66
4,00	4,60	5,06	5,00
5,00	5,75	6,30	6,25
6,00	6,90	7,54	7,50

Величина максимально возможного замедления кабины при посадке на ловители с эксцентриковыми и роликовыми рабочими элементами может быть рассчитана [1-3]:

$$a = \frac{V_{a \max}^2}{S}, \text{ м/с}^2, \quad (2)$$

где S – путь, который кабина проходит до полной остановки, м.

Значения величины S в современной литературе [1, 3] отсутствуют. В книге [2], опубликованной около 60 лет назад, приведены сведения, что путь кабины до полной остановки составляет $S \approx 0,015$ м, при этом не указан тип ловителей, скорость и грузоподъемность лифта и др. Поэтому определение значений S представляет собой самостоятельную задачу, требующую отдельного экспериментального исследования.

Для расчета замедления кабины при посадке кабины на ловители с клиновыми рабочими элементами известны два способа. Первый (экспериментально-теоретический) базируется на большом числе экспериментальных исследованиях, проведенных ВНИИПТМАШ [1], а второй (аналитический), разработанный в МГСУ (бывший МИСИ им. Куйбышева), – на учете сопротивлений пластическому деформированию направляющей [6].

В соответствии с первым способом [1]:

$$a = A(V_{a \max}^2 - \gamma), \text{ м/с}^2, \quad (3)$$

где A – коэффициент, зависящий от угла заострения клина (при $\alpha = 8-11^\circ$ $A = 45 \div 50$, при $\alpha = 9^\circ 30'$ $A = 47 \div 48$); γ – коэффициент, зависящий от формы тормозящей поверхности (при гладкой поверхности $\gamma = 0,13$, при поверхности с мелкой насечкой $\gamma = 0,08$, а для крупного зуба $\gamma = 0,18$).

Для вывода формулы, позволяющей рассчитать замедление кабины в соответствии со вторым способом [6], введем следующие обозначения:

$Q_{\Sigma}^K = Q + Q_K + Q_{ПК} + Q_{КЭ}$ и $Q_{\Sigma}^П = Q_{П} + Q_{КЭ}$, где Q_{Σ}^K и $Q_{\Sigma}^П$ – суммарная

улавливаемая масса со стороны кабины и противовеса соответственно; Q , Q_K , Q_{II} , $Q_{ПК}$, $Q_{КЭ}$ – грузоподъемность лифта, масса кабины, противовеса, подвесного кабеля и компенсирующих элементов соответственно.

Опуская преобразования, получим:

– для кабины:

$$a = \frac{Q_{\Sigma}^K g^2}{F - Q_{\Sigma}^K g}, \text{ м/с}^2, \quad (4)$$

– для противовеса:

$$a = \frac{Q_{\Sigma}^{II} g^2}{F - Q_{\Sigma}^{II} g}, \text{ м/с}^2; \quad (5)$$

В свою очередь:

$$F = \frac{n_{КЛ} n_{Л} k_z Z \sigma_T k_T b h k_B (\sin \beta + \mu \cos \beta)}{k_H \sin \beta}, \text{ Н}; \quad (6)$$

где σ_T – величина предела текучести материала, из которого изготовлена направляющая, МПа; $k_T = 1,3$ – коэффициент, учитывающий увеличение предела текучести при быстром изменении нагрузки; h – глубина врезания зуба ловителя в направляющую, мм; $k_B = 1,15$ – коэффициент, учитывающий высоту валика деформации; μ – величина коэффициента трения пластически деформируемого материала направляющей по передней грани зуба; β – угол врезания зуба в направляющую.

Очевидно, что формулы (4-6) содержат величины A , γ , h , k_T , k_B , полученные эмпирическим путем. Разброс их значений, приводимых в имеющейся литературе, обуславливает расхождение результатов расчета в десятки раз в зависимости от использованных допущений [4] и [5]. Таким образом, задача определения этих величин также требует отдельных экспериментальных исследований.

Рассмотрим применение предлагаемой методики на некоторых примерах.

Пример 1.

Необходимо подобрать и рассчитать ловители для кабины малого грузового лифта со следующими параметрами: номинальная скорость движения кабины $V = 0,25$ м/с; грузоподъемность $Q = 100$ кг; масса кабины $Q_K = 110$ кг; масса подвесного кабеля $Q_{ПК} \approx 5$ кг; масса компенсирующих элементов $Q_{КЭ} \approx 20$ кг.

Решение

1. В соответствии с п.5.4.6.4 ГОСТ Р 53780-2010 для лифта со скоростью движения кабины $V = 0,25$ м/с назначаем тип ловителей – ловители резкого торможения.

2. В малых грузовых лифтах рационально использовать наиболее простые по конструктивному исполнению элементы, в том числе ловители. Поэтому принимаем форму рабочих элементов ловителей – эксцентрики. Примем самую простую конструкцию эксцентриковых ловителей, когда в каждом ловителе установлено только по одному эксцентрику. Материал, из которого изготавливают эксцентрики, как правило – Сталь 35 или 45, примем Сталь 35. В качестве материала оси, относительно которой поворачиваются эксцентрики, примем Сталь 45.

3. Из конструктивных соображений зададимся предварительными значениями плеча нормальной реакции $r_N = 15$ мм (рис. 1) и диаметра оси эксцентрика $d_C = 10$ мм. Тогда радиус оси эксцентрика составит $r_C = d_C/2 = 10/2 = 5$ мм.

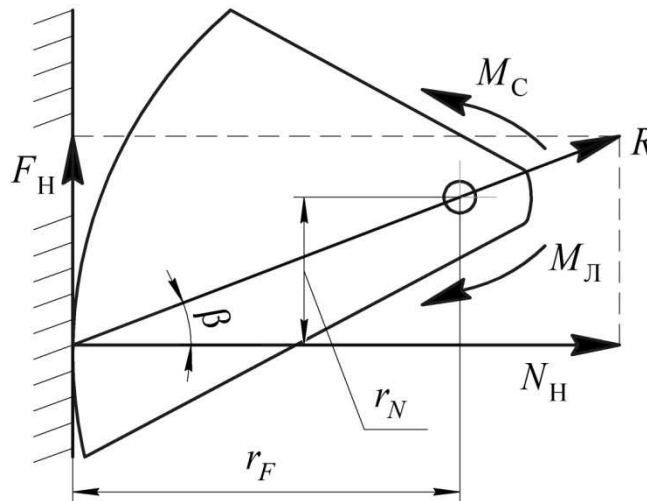


Рис. 1. Схема действия сил в ловителе резкого торможения с эксцентриковым рабочим элементом: $M_Л$ – момент, необходимый для срабатывания ловителей; $M_С$ – момент сопротивления; F_H – сила трения эксцентрика о направляющую; N_H – нормальная реакция при контакте эксцентрика и направляющей; r_F и r_N – плечи сил F_H и N_H соответственно; R – равнодействующая силы трения и нормальной реакции; β – угол контакта

Выразим величину r_F из зависимостей, изложенных в [1]:

$$\frac{r_N}{r_F} = \mu - \mu_C \frac{r_C}{r_F} \sqrt{1 + \mu^2} \Rightarrow r_F = \frac{r_N + \mu_C r_C \sqrt{1 + \mu^2}}{\mu},$$

где μ – приведенный коэффициент трения эксцентрика о направляющую; μ_C – приведенный коэффициент трения в оси эксцентрика.

Примем $\mu_C = 0,10$. Согласно рекомендациям ВНИИПТМАШ [2] при расчете на самозаклинивание коэффициент трения принимается $\mu = 0,30 \dots 0,35$ для скорости лифта от 0,25 до 0,50 м/с (большие значения коэффициента трения относят к меньшим скоростям) и $\mu = 0,25 \dots 0,30$ для скорости лифта от 0,50 до 1,00 м/с.

Примем $\mu = 0,35$, тогда:

$$r_F = \frac{15 + 0,1 \cdot 5 \cdot \sqrt{1 + 0,35^2}}{0,35} \approx 44 \text{ мм.}$$

4. Угол между осью эксцентрика и точкой контакта эксцентрика и направляющей:

$$\operatorname{tg} \alpha = r_N / r_F = 15 / 44 \approx 0,341 \Rightarrow \alpha \approx 19^\circ.$$

5. Тормозная сила (сила трения между ловителем и направляющей, необходимая для уравнивания силы тяжести груженной кабины), развиваемая одним эксцентриком:

$$F = k_H \frac{(Q + Q_K + Q_{ПК} + Q_{КЭ}) g}{n_L} = 1,25 \cdot \frac{(100 + 110 + 5 + 20) \cdot 9,81}{2} \approx 1440 \text{ Н,}$$

где $k_H = 1,25$ – коэффициент неравномерности распределения тормозной силы по ловителям; n_L – число ловителей.

6. Равнодействующая тормозной силы F и нормальной реакции в точке контакта эксцентрика и направляющей N :

$$R = \sqrt{F^2 + N^2} = F / \sin \alpha = 1440 / \sin(19^\circ) \approx 4460 \text{ Н.}$$

7. Выразим ширину зуба эксцентрика из формулы Герца:

$$\sigma_K = 0,418 \sqrt{\frac{RE}{br_F}} \leq [\sigma]_K \Rightarrow b \geq \frac{(0,418)^2 RE}{r_F [\sigma]_K^2},$$

где E – модуль упругости материала, из которого изготовлены направляющие (современные направляющие, как правило, изготавливают из Стали 30, для которой $E = 2,1 \cdot 10^5$ МПа); $[\sigma]_K = 0,8\sigma_B$ – допускаемые напряжения при расчете на контактную прочность; σ_B – предел прочности наименее прочного материала из образующих контактную пару (эксцентрика или направляющей).

Получим: $[\sigma]_K = 0,8\sigma_B = 0,8 \cdot 530 = 424$ МПа.

Тогда:

$$b \geq \frac{(0,418)^2 \cdot 4460 \cdot 2,1 \cdot 10^5}{61 \cdot (424)^2} \approx 14,9 \text{ мм, принимаем } b = 15 \text{ мм.}$$

8. Проверка прочности оси эксцентрика по напряжениям среза (использованы общеизвестные зависимости из курса «Детали машин»).

Допускаемое напряжение среза для Стали 45:

$$[\tau] = (0,2 \dots 0,3) \sigma_T = 0,25 \cdot 360 = 90 \text{ МПа.}$$

Действующее напряжение среза:

$$\tau = \frac{4R}{\pi(d_C)^2} = \frac{4 \cdot 4460}{3,14 \cdot (10)^2} \approx 56,8 \text{ МПа}$$

$$\tau = 56,8 \text{ МПа} < [\tau] = 90 \text{ МПа} - \text{проверка выполняется.}$$

9. Проверка отверстия для оси в эксцентрикe по напряжениям смятия (использованы общеизвестные зависимости из курса «Детали машин»).

Допускаемое напряжение смятия для Стали 35:

$$[\sigma]_{CM} = 0,8 \sigma_T = 0,8 \cdot 300 = 240 \text{ МПа.}$$

Примем, что зубья выполнены на всю ширину поверхности эксцентрика, тогда ширину эксцентрика можно принять равной ширине его зуба, в этом случае условие прочности по напряжениям смятия будет иметь вид:

$$\sigma_{CM} = \frac{R}{bd_C} = \frac{4460}{15 \cdot 10} = 29,7 \text{ МПа} < [\sigma]_{CM} = 240 \text{ МПа,}$$

то есть условие прочности отверстия в эксцентрикe по напряжениям смятия выполняется с большим запасом.

10. Величина максимально возможного замедления кабины при посадке на ловители:

$$a = \frac{V_{a \max}^2}{S} = \frac{(0,35)^2}{0,015} \approx 8,17 \text{ м/с}^2.$$

$$a = 8,17 \text{ м/с}^2 < [a] = 25 \text{ м/с}^2 - \text{проверка выполняется.}$$

Пример 2.

Необходимо подобрать и ловители для кабины грузового лифта со следующими параметрами: скорость движения кабины $V = 0,4 \text{ м/с}$; грузоподъемность $Q = 2000 \text{ кг}$; масса кабины $Q_K = 3200 \text{ кг}$; масса подвесного кабеля $Q_{ПК} \approx 20 \text{ кг}$; масса компенсирующих элементов $Q_{КЭ} \approx 200 \text{ кг}$.

Решение

1. В соответствии с п.5.4.6.4 ГОСТ Р 53780-2010 для лифта со скоростью движения кабины $V = 0,4 \text{ м/с}$ назначаем тип ловителей – ловители резкого торможения.

2. В грузовых лифтах большой грузоподъемности, как правило, используют роликовые ловители, поэтому принимаем форму рабочих элементов ловителей – ролики. Материал, из которых изготавливают ролики, как правило – Сталь 35, 45 или 20Х, примем ролик из Стали 20Х закаленной.

3. Для скорости лифта $V = 0,4 \text{ м/с}$ примем $\mu = 0,31$. Тогда наибольший допустимый угол наклона опорной плоскости корпуса из условия самозатягивания ролика (рис. 2):

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{2\mu}{1 - \mu^2} = \frac{2 \cdot 0,31}{1 - (0,31)^2} \approx 0,686 \Rightarrow \gamma \approx 33,4^\circ.$$

4. Грузовые лифты большой грузоподъемности, как правило, работают на четырех направляющих, то есть число ловителей составит $n_{\text{Л}} = 4$. Тогда тормозная сила, развиваемая одним роликом, составит:

$$F = \frac{k_{\text{Н}}(Q + Q_{\text{К}} + Q_{\text{ПК}} + Q_{\text{КЭ}})g}{n_{\text{Л}}} = \frac{1,25 \cdot (2000 + 3200 + 20 + 200) \cdot 9,81}{4} \approx 16600 \text{ Н}$$

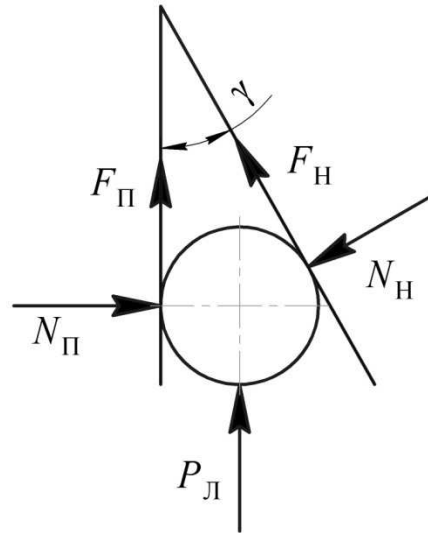


Рис. 2. Схема действия сил в ловителе резкого торможения с роликовым рабочим элементом: $P_{\text{Л}}$ – сила, необходимая для срабатывания ловителей; $F_{\text{Н}}$ и $F_{\text{П}}$ – сила трения ролика о направляющую и колодку соответственно; $N_{\text{Н}}$ и $N_{\text{П}}$ – нормальная реакция при контакте ролика о направляющую и колодку соответственно; γ – угол контакта

5. Нормальная реакция в точке контакта ролика и направляющей:

$$N = Ftg\gamma = 16600 \cdot 0,686 \approx 11400 \text{ Н.}$$

6. Допускаемые напряжения при расчете на контактную прочность:

$$[\sigma]_{\text{К}} = 0,8\sigma_{\text{В}} = 0,8 \cdot 530 = 424 \text{ МПа}$$

7. Из конструктивных соображений примем радиус ролика $r = 30$ мм, тогда ширина ролика составит:

$$b \geq \frac{(0,418)^2 NE}{r[\sigma]_{\text{К}}^2} = \frac{(0,418)^2 \cdot 11400 \cdot 2,1 \cdot 10^5}{30 \cdot (424)^2} \approx 78 \text{ мм, примем } b = 80 \text{ мм.}$$

8. Величина максимально возможного ускорения замедления кабины при посадке на ловители:

$$a = \frac{V_{a\text{max}}^2}{S} = \frac{(0,56)^2}{0,015} \approx 20,9 \text{ м/с}^2.$$

$$a = 20,9 \text{ м/с}^2 < [a] = 25 \text{ м/с}^2 - \text{проверка выполняется.}$$

Из рассмотренных примеров, а также работ [4, 5] видно, что при расчете ловителей резкого торможения ряд параметров (материал, из которых изготовлены рабочие элементы, их геометрические параметры и др.) приходится выбирать из конструктивных соображений. Это обуславливает рациональность проведения многовариантного расчета с целью подбора наилучшего варианта. Для упрощения и автоматизации подобного расчета могут быть использованы прикладные программы для ЭВМ, в частности, MathCAD [7], LabVIEW [8]. Например, в КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана были разработаны программы, позволяющие производить многовариантный расчет лифтовых ловителей резкого торможения. При этом варьируемыми параметрами являются материал, из которого изготовлены рабочие элементы, и его геометрические размеры. В качестве примера результатов такого расчета на рис. 3 представлена зависимость ширины ролика ловителя от его радиуса и грузоподъемности лифта. Окончательный вариант может быть выбран по технологическим соображениям.

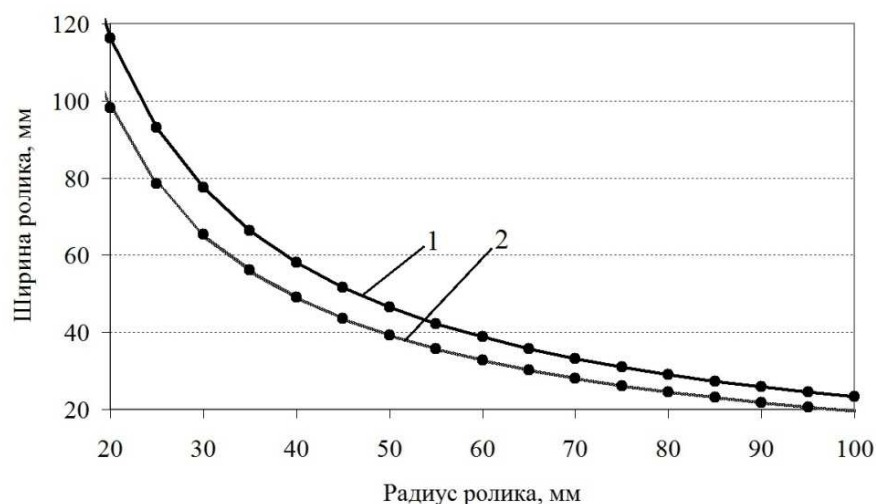


Рис. 3. Результаты расчета ширины роликового ловителя для грузового лифта грузоподъемностью: 1 – 2000 кг; 2 – 1600 кг

Выводы:

1. Известные методики расчета лифтовых ловителей содержат большое число эмпирических коэффициентов, а также допущений, обусловленных недостаточностью знания о процессе взаимодействия рабочих поверхностей ловителя и направляющей. Это приводит к тому, что результаты расчета параметров ловителей и действующих на пассажиров в процессе торможения ускорений могут сильно разниться.

2. Для расчета аварийной скорости лифтов с номинальными скоростями 0,25...0,50 м/с целесообразно использовать рекомендаций ВНИИПТМАШ, а для скоростей 0,63...6,00 м/с – ГОСТ Р 53780-2010.

3. При расчете ловителей резкого торможения возможно варьировать рядом параметров, что обуславливает рациональность проведения процедуры многовариантного расчета, которая может быть выполнена с использованием прикладных программ для ЭВМ.

4. Для снижения недостаточности знаний о процессе взаимодействия рабочих поверхностей ловителя и направляющей целесообразно проведение дополнительных экспериментальных исследований, в процессе которых имитируется случай аварийной посадки кабины на ловители.

Список литературы

1. Лифты: учебник для вузов / под общей ред. Д.П. Волкова. М.: Изд-во АСВ, 1999. 480 с.

2. Г.К. Корнеев [и др.] Лифты. М.: Машгиз, 1958. 567 с.

3. Яновски Л. Проектирование механического оборудования лифтов. Третье изд-е. М.: Издательство АСВ, 2005. 336 с.

4. Витчук П.В., Шубин А.А., Потапов Д.В. Зависимость ускорения замедления кабины от параметров клина ловителя // Известия Тульского государственного университета. Технические науки, 2013. Вып. 7. Ч. 1. С. 171-177.

5. Витчук П.В., Осницкий А.В., Грачева Е.В. Совершенствование методов расчета и испытаний лифтовых ловителей // Известия Тульского государственного университета. Технические науки, 2014. Вып. 11. Ч. 1. С. 447-452.

6. Архангельский Г.Г. Расчет ловителей резкого торможения кабины лифта с учетом пластической деформации поверхности направляющей. // Исследование строительных машин: Сб. науч. трудов. М.: МИСИ, 1993. С. 5-11.

7. Анцев В.Ю., Толоконников А.С. Калабин П.Ю. Оптимизация металлических конструкций грузоподъемных машин мостового типа // Известия Тульского государственного университета. Технические науки, 2009. Вып. 4. С. 18-22.

8. Мокин Д.Г. Применение среды LabVIEW при моделировании объектов и процессов подъемно-транспортного машиностроения // Известия Тульского государственного университета. Технические науки, 2013. Вып. 7. Ч. 1. С. 195-198.

Витчук Павел Владимирович, канд. техн. наук, zzzVentor@yandex.ru, Россия, Калуга, Калужский филиал Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет),

Трухов Николай Викторович, студент, 240594k@mail.ru, Россия, Калуга, Калужский филиал Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет),

Усачев Александр Игоревич, студент, alexandr_igorevi4@mail.ru, Россия, Калуга, Калужский филиал Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)

METHOD OF CALCULATING THE ELEVATED BRAKE LIFT TRAPS

P.V. Vitchuk, N.V. Trukhov, A.V. Usachev

The classification of elevator catchers and the problems that arise when calculating them are briefly considered. A technique for calculating sharpshooters is proposed. It is shown that when calculating the emergency speed for elevators with a nominal speed of motion up to 0.63 m/s, it is advisable to use the recommendations of VNIPTMASH. Dependencies are presented for calculating the deceleration of the cabin when landing on the safety catcher braking. Examples of calculation of eccentric and roller catchers are given. It is shown that when calculating the geometric parameters of working elements of catchers it is expedient to use a multivariate calculation procedure using computer applications.

Key words: elevator, catcher, eccentric, roller, wedge, multivariate calculation, design.

Vitchuk Pavel Vladimirovich, candidate of technical science, zzzVentor@yandex.ru, Russia, Kaluga, Bauman Moscow State Technical University Kaluga Branch,

Trukhov Nikolay Viktorovich, student, 240594k@mail.ru, Russia, Kaluga, Bauman Moscow State Technical University Kaluga Branch,

Usachev Alexander Igorevich, student, alexandr_igorevi4@mail.ru, Russia, Kaluga, Bauman Moscow State Technical University Kaluga Branch.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СВЕРЛЕНИЯ ТРУДНООБРАБАТЫВАЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ ЗА СЧЕТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СОТС

Т.Г. Ивченко, И.А. Петряева, А.Н. Михайлов

Предложена методика оценки эффективности сверления с использованием СОТС по критериям повышения производительности и снижения себестоимости обработки. Методика основана на оценке возможностей интенсификации оптимальных режимов резания за счет повышения стойкости инструмента и снижения сил резания. Выполнен сравнительный анализ возможностей повышения производительности и снижения себестоимости сверления различных труднообрабатываемых материалов при использовании различных СОТС.

Ключевые слова: сверление, стойкость, скорость резания, подача, производительность, себестоимость

Низкая обрабатываемость специальных марок нержавеющей, жаропрочных и высокопрочных сталей и сплавов, широко распространенных в деталях и узлах современных машин, обуславливает высокую трудоемкость и низкую себестоимость их изготовления. Использование смазочно-охлаждающих технологических сред (СОТС) при обработке этих материалов – наиболее распространенный способ интенсификации процесса резания и повышения его эффективности.

Несмотря на то, что в настоящее время накоплен достаточный опыт применения СОТС при обработке резанием [1], рациональный выбор СОТС, вследствие большого разнообразия самих СОТС и способов их подачи в зону резания, весьма затруднен.

При анализе эффективности обработки с использованием СОТС наиболее распространены критерии повышения стойкости, снижения сил и температур резания, уменьшения шероховатости обработанной поверхности, определяемые, как правило, экспериментальным путем [2, 3].

Не менее важна оценка возможностей интенсификации процесса резания при использовании СОТС, выполняемая на основании оптимизации режимов резания по различным критериям. Наиболее объективной является количественная оценка эффективности использования СОТС по критериям повышения производительности и снижения себестоимости в различных условиях обработки [4, 5]. Представляет интерес дальнейшее развитие этой методики применительно к операциям сверления.

Цель работы – оценка возможностей интенсификации режимов резания и повышения эффективности сверления различных труднообрабатываемых материалов при использовании различных СОТС.

При сверлении с использованием СОТС достигается повышение стойкости сверл T и снижение крутящего момента $M_{кр}$:

$$T = \left(C_V K_V K_T D^{q_V} / V S^{y_V} \right)^{1/m}; \quad M_{кр} = C_M K_P K_M D^{q_M} S^{y_M}, \quad (1)$$

где K_T, K_M – коэффициенты повышения стойкости сверла и снижения крутящего момента при сверлении с использованием СОТС; D – диаметр сверла; C_V, K_V, m, q_V, y_V – коэффициенты и показатели, характеризующие влияние стойкости T , диаметра D и подачи S на скорость резания V ; C_M, K_P, q_M, y_M – коэффициенты и показатели степеней, характеризующие влияние диаметра D и подачи S на крутящий момент M_{KP} при сверлении.

Оценка возможностей интенсификации процесса сверления с использованием СОТС осуществляется на основе оптимизации режимов резания по критериям производительности и себестоимости.

Целевые функции, выражающие зависимость критериев оптимизации (максимальной производительности P и минимальной себестоимости C) от скорости резания V и подачи S , при сверлении с использованием СОТС имеют вид:

$$P(V, S) = VS; C(V, S) = V^{-1}S^{-1} + MK_T^{-1}V^{k_V}S^{k_S}, \quad (2)$$

где $M = (t_c + A_u/A) \left(1/C_V K_V D^{q_V} \right)^{1/m}$; $k_V = 1/m - 1$; $k_S = y_V/m - 1$; A – стоимость станко – минуты, A_u – стоимость одного периода стойкости сверла; t_c – время смены инструмента.

Основным ограничением при сверлении (при достаточной жесткости сверла) является ограничение по прочности:

$$\sigma/K_S \geq 1,73 C_M K_M D^{q_M} S^{y_M} / W, \quad (3)$$

где σ – предел прочности материала сверла; $K_S \approx 1.5 \dots 2.0$ – коэффициент запаса прочности; $W = 0,02 D^3$ – момент сопротивления сверла.

Установлены аналитические зависимости подач S_o и скоростей резания, оптимальных по критерию производительности V_{oP} и себестоимости V_{oC} от параметров сверления [3]:

$$S_i = \left(\frac{0,012 \sigma D^{3-q_M}}{C_M K_M K_S} \right)^{1/y_M}; V_{iP} = \frac{C_V K_V K_T D^{q_V}}{T^m S_o^{y_V}}; V_{iC} = \frac{K_{VC} C_V K_V K_T D^{q_V}}{T^m S_o^{y_V}}, \quad (4)$$

где K_{VC} – коэффициент, учитывающий различие оптимальных по различным критериям (производительности и себестоимости) скоростей резания: $K_{VC} = [m/(1-m)(t_c + A_u/A)]^m$.

В результате анализа полученных зависимостей (4) определены коэффициенты интенсификации режимов резания за счет использования СОТС: коэффициенты изменения подач K_S , а так же скоростей резания для критериев максимальной производительности K_{VP} и минимальной себестоимости K_{VC} :

$$K_{S1} = K_M^{-1/y_M}; K_{VP} = K_T^m K_M^{y_V/y_M}; K_{VC} = K_T^{-m} K_M^{-y_V/y_M}. \quad (5)$$

На основании указанных коэффициентов интенсификации режимов резания – подачи и скорости (5) установлены коэффициенты повышения производительности $K_P = P(V, S)_{СОТС} / P(V, S)$ и снижения себестоимости

$K_C = C(V,S)_{\text{СОТС}}/C(V,S)$ сверления с использованием СОТС в сравнении с обработкой без СОТС:

$$K_P = K_T^m K_M^{y_M} \cdot \frac{(y_V - 1)}{(1 - y_V)} ; K_C = K_T^{-m} K_M^{y_M} \cdot \frac{(1 - y_V)}{(y_V - 1)} \quad (6)$$

Достоинством установленных коэффициентов интенсификации режимов резания и повышения эффективности обработки является возможность их оценки для любых условий обработки только по коэффициентам повышения стойкости и снижения крутящих моментов, представленным в справочно-нормативной литературе [1], либо определяемых экспериментальным путем.

Результаты экспериментальных исследований влияния различных СОТС на стойкость сверл и крутящий момент при сверлении приведены для следующих материалов: сталь 2Х13, сталь Х18Н9Т, сплав ЭИ654 (45Х14Н14В2М).

В экспериментах использовались СОТС: 5 % - ные водные эмульсии из эмульсулов:

1 - эмульсол Э-2 с преимущественно охлаждающим эффектом;
2 - эмульсол НГЛ-205, состоящий из масляного раствора сульфоната натрия и пассивирующих добавок водорастворимых ингибиторов коррозии - нитрита натрия и тринатрийфосфата, с охлаждающим и частично смазывающим эффектом;

3 - эмульсол СДМу, содержащий масло, сульфонат натрия, растворимые ингибиторы коррозии и небольшое количество (до 3 %) дисульфида молибдена, прошедшего ультразвуковую обработку, с усиленным смазывающим действием.

В результате испытаний (рис. 1) экспериментально определены степень влияния скорости резания V на стойкость инструмента T и коэффициенты повышения стойкости K_T (табл. 1), а так же коэффициенты снижения крутящего момента K_M (табл. 2) при использовании различных СОТС (сверло Р18 диаметром $D = 10,5$ мм; подача $S = 0,09$ мм/об).

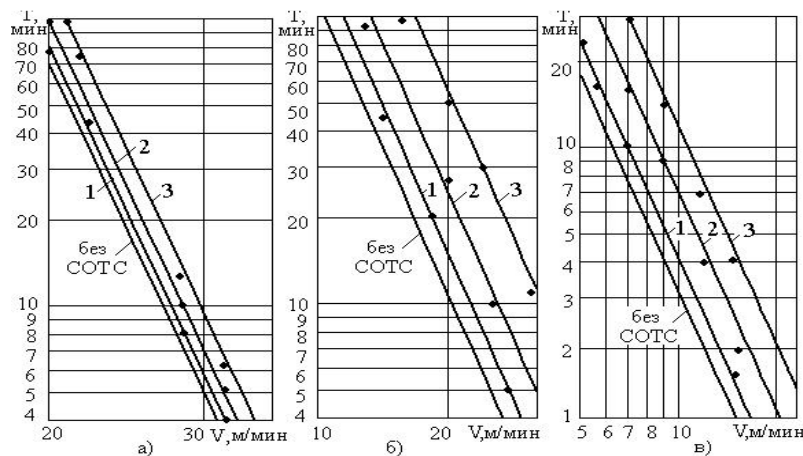


Рис. 1. Графики зависимости стойкости сверл T от скорости резания V для различных СОТС и обрабатываемых материалов:
а – сталь 2Х13; б – сталь Х18Н9Т; в – сплав ЭИ654

Таблица 1

Коэффициенты повышения стойкости сверл K_T

Обрабатываемый материал	Показатель степени m	Коэффициенты повышения стойкости сверл K_T для различных СОТС		
		Э-2	НГЛ-205	СДМу
сталь 2Х13	0,15	1,2	1,8	3,2
сталь Х18Н9Т	0,25	1,3	2,2	4,3
ЭИ654	0,4	1,1	1,4	1,9

Таблица 2

Коэффициенты снижения крутящего момента при сверлении K_M

Обрабатываемый материал	Коэффициенты снижения крутящего момента K_M при сверлении для различных СОТС		
	Э-2	НГЛ-205	СДМу
сталь 2Х13	1	0,9	0,85
сталь Х18Н9Т	1	0,9	0,85
ЭИ654	1	1	0,95

При сверлении с использованием в качестве СОТС эмульсола Э-2 с преимущественно охлаждающим эффектом обеспечивается минимальное повышение стойкости в сравнении со стойкостью при обработке без СОТС и не наблюдается снижение крутящего момента.

При использовании эмульсола НГЛ-205 к охлаждающему эффекту добавляется эффект смазывающий, что усиливает повышение стойкости и снижение крутящего момента.

Наибольший эффект повышения стойкости инструмента и снижения крутящего момента наблюдается при использовании эмульсола СДМу с усиленным смазывающим действием.

Представленные на рис. 2 и рис. 3 графики позволяют для различных обрабатываемых материалов количественно оценить влияние коэффициента повышения стойкости K_T , а так же от коэффициента снижения крутящего момента K_M на коэффициенты повышения производительности K_P и снижения себестоимости K_C сверления с использованием СОТС

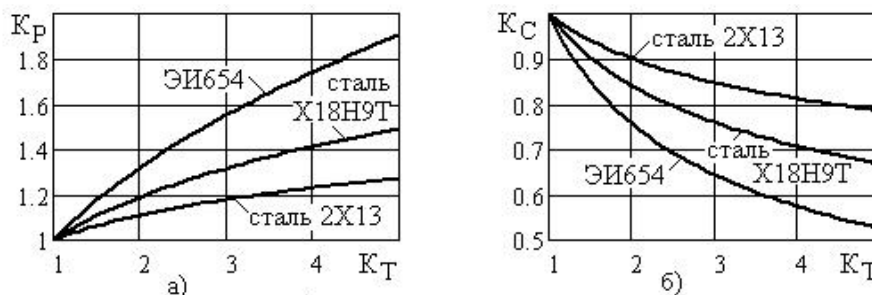


Рис. 2. Графики зависимости коэффициентов повышения производительности K_P (а) и снижения себестоимости K_C (б) от коэффициента повышения стойкости K_T при сверлении с использованием СОТС

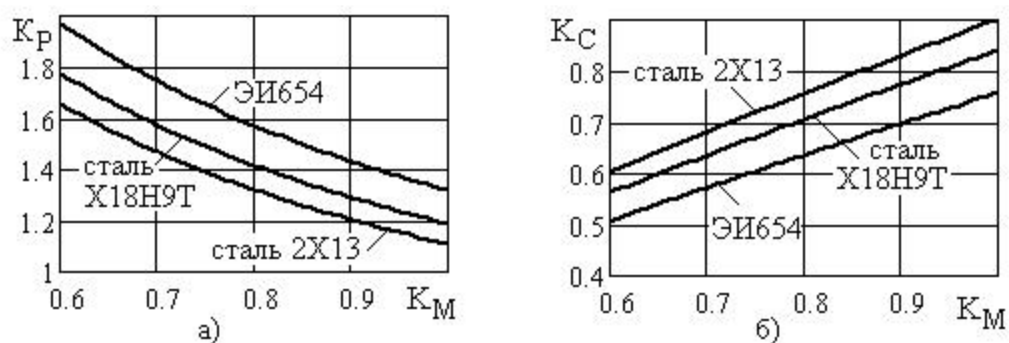


Рис. 3. Графики зависимости коэффициентов повышения производительности K_p (а) и снижения себестоимости K_c (б) от коэффициента снижения крутящего момента K_M при сверлении с использованием СОТС

Коэффициенты повышения производительности K_p и снижения себестоимости K_c с учетом одновременного изменения коэффициентов повышения стойкости K_T и снижения крутящего момента K_M при сверлении с использованием СОТС, установленных по результатам экспериментальных исследований, представлены в табл. 3.

Таблица 3
Коэффициенты повышения эффективности сверления с использованием СОТС

Обрабатываемый материал	Коэффициенты повышения производительности K_p и снижения себестоимости K_c сверления для различных СОТС					
	Э-2		НГЛ-205		СДМу	
	K_p	K_c	K_p	K_c	K_p	K_c
сталь 2X13	1,03	0,97	1,19	0,84	1,35	0,74
сталь X18H9T	1,05	0,96	1,26	0,80	1,52	0,66
ЭИ654	1,08	0,93	1,27	0,79	1,66	0,60

При сверлении с использованием в качестве СОТС эмульсола Э-2 с преимущественно охлаждающим эффектом обеспечивается минимальное повышение производительности и снижение себестоимости в сравнении с другими СОТС.

Наибольший эффект повышения производительности и снижения себестоимости (более чем в 1,5 раза) наблюдается при использовании эмульсола СДМу с усиленным смазывающим действием, обеспечивающего, как было показано ранее, наибольшее повышение стойкости и снижение крутящего момента.

Таким образом, на основании выполненных исследований установлены коэффициенты интенсификации режимов резания, а также коэффициенты повышения производительности и снижения себестоимости сверления с использованием СОТС.

Список литературы

1. Смазочно-охлаждающие технологические средства и их применение при обработке резанием: справочник / Л.В. Худобин, А.П. Бабичев, Е.М. Булыжев [и др.]. М.: Машиностроение, 2006. 544 с.
2. Богуславский В.А., Ивченко Т.Г., Польченко В.В., Зайцева И.Ю. Оценка эффективности использования смазочно-охлаждающих технологических сред при точении труднообрабатываемых материалов // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Донецк: ДонНТУ, 2012. Вып. 43. С. 59-65.
3. Богуславский В.А., Ивченко Т.Г., Польченко В.В. Влияние СОТС на себестоимость операций сверления нержавеющей сталей // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Донецк: ДонНТУ, 2014. № 4 (50). С. 41-47.
4. Ивченко Т.Г. Оценка эффективности использования СОТС при тонком точении инструментами из сверхтвердых материалов // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. Донецк: ДонНТУ, 2016. Вып. 1 (52). С. 62-68.
5. Ивченко Т.Г., Петряева И.А., Михайлов А.Н. Оценка эффективности использования режущих инструментов с износостойкими покрытиями // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2017. Вып. 8. Ч. 2. С. 190-198.

Ивченко Татьяна Георгиевна, канд. техн. наук, доц., ivchenko.sovet@gmail.com, Донецк, Донецкий национальный технический университет,

Петряева Ирина Алексеевна, канд. техн. наук, ассист., irina_petryaeva@mail.ru, Донецк, Донецкий национальный технический университет,

Михайлов Александр Николаевич, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой, tm@mech.dgtu.donetsk.ua, Донецк, Донецкий национальный технический университет

INCREASE OF DRILLING EFFICIENCY OF THE STAINLESS MATERIALS WITH APPLICATION OF TECHNOLOGICAL CUTTING FLUID

T.G. Ivchenko, I.A. Petryaeva, A.N. Mikhailov

It is offered the method of estimation of drilling efficiency with use technological cutting fluids on the criteria of the machining productivity increase and prime price decline. The method is based on the estimation of the possibilities of intensification of the optimum cutting regimes due to the increase of the tool life and declines of cutting forces. The comparative analysis of possibilities of the drilling productivity increase and prime price decline of stainless materials with application of technological cutting fluid is executed.

Key words: drilling, tool life, cutting speed, feed, productivity, prime price

Ivchenko Tatiana Georgievna, candidate of technical science, docent, ivchenko.sovet@gmail.com, Donetsk, Donetsk National Technical University,

Petryaeva Irina Alexseevna, candidate of technical science, assistant, irina_petryaeva@mail.ru, Donetsk, Donetsk National Technical University,

Mikhailov Alexcandr Nicolayevich, doctor of technical science, professor, manager of department, tm@mech.dgtu.donetsk.ua, Donetsk, Donetsk National Technical University

УДК 539.3

ИЗГИБ КОМПОЗИТНОЙ БАЛКИ С УЧЁТОМ СДВИГОВОЙ ДЕФОРМАЦИИ

В.В. Фирсанов

В статье представлен вариант теории изгиба балки с отступлением от некоторых классических гипотез. Задаётся такое распределение касательных напряжений по высоте балки, чтобы граничные условия по ним на протяжённых границах были автоматически удовлетворены. Учёт сдвигов приводит к постановке задачи в смешанной форме: основными неизвестными являются прогиб и касательные напряжения. Продольные перемещения определяются из соотношения, которое можно трактовать как уравнение совместности. Разрешающие уравнения задачи, которые выводятся с использованием вариационного принципа Лагранжа, имеют более высокий порядок в сравнении с классической теорией Бернулли. В уравнениях и граничных условиях появляются новые кинематические и внутренние силовые факторы.

Ключевые слова: балка, изгиб, нагрузка, деформация, напряжение, жёсткость, момент, сила, депланация, бимомент.

Классическая теория изгиба балок построена на двух основных гипотезах: отсутствие сдвигов и линейных деформаций в направлении, перпендикулярном оси балки. Эти гипотезы были сформулированы Бернулли, а затем Кирхгоф распространил их на теорию изгиба пластин. И для изгибаемых балок, и для пластин получены, благодаря этим гипотезам, относительно простые разрешающие уравнения и их точные решения для довольно большого класса задач. Развивая теорию Бернулли в задачах изгиба балок и Кирхгофа в задачах изгиба пластин, некоторые авторы подвергали сомнению одну из гипотез, а именно, гипотезу отсутствия сдвигов. Особенно это стало актуальным при все более возрастающем применении композиционных, слоистых материалов в промышленности. Межслоевой сдвиг в этих материалах играет существенную роль, и пренебрегать им значит допустить существенное искажение результатов решения. Сдвиговые деформации можно учесть неоднозначно [1], [2], но несмотря на идентичность полученных разными авторами разрешающих уравнений, полного совпадения, тем не менее, не наблюдается. Одним из существенных недостатков некоторых вариантов теории является то, что учет сдвигов приводит к появлению касательных напряжений на поверхности балки, что, в какой-то степени, искажает исходную задачу [2].

Предлагаемый подход к построению теории изгиба балок, возможно, также несвободный от недостатков, является более последовательным, строгим и не искажает существа исходной задачи изгиба балки.

Основной рабочей гипотезой предлагаемой теории является гипотеза отсутствия линейной деформации ε_y .

$$\varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} = 0, \quad v = v(x),$$

где v – прогиб балки; ось x совпадает с упругой осью балки; ось y перпендикулярна ей.

Деформация сдвига не равна нулю, а выражается через касательные напряжения согласно физическому закону. Для ортотропной структуры

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\tau_{xy}}{G_{xy}},$$

откуда

$$u = \int \left(\frac{\tau_{xy}}{G_{xy}} - v' \right) dy + u_0(x), \quad (1)$$

где $u_0(x)$ – произвольная функция интегрирования. При изгибе в центральных осях $u_0(x) = 0$.

Учет сдвигов приводит, таким образом, к постановке задачи в смешанной форме, в которой основными неизвестными являются прогиб балки v и касательные напряжения τ_{xy} . В связи с этим равенство (1) следует рассматривать как условие совместности при постановке задачи в смешанной форме.

Зададим касательные напряжения в таком виде, чтобы однородные условия по ним на протяжённых границах балки были удовлетворены тождественно

$$\frac{\tau_{xy}}{G_{xy}} = \bar{\tau}_1(x) S_z^{\text{отс}} = \bar{\tau}_1(x) \frac{h^2}{4} \left(1 - \frac{4y^2}{h^2} \right) = \tau_1(x) \left(1 - \frac{4y^2}{h^2} \right), \quad (2)$$

где $S_z^{\text{отс}}$ – статический момент отсечённой части сечения балки; h – высота балки; $\tau_1(x)$ – неизвестная функция продольной координаты.

Внося (2) в (1), получим

$$u = (\tau_1 - v')y - \frac{4}{3} \tau_1 \frac{y^3}{h^2}. \quad (3)$$

Равенство (3) можно представить в виде

$$u = \left[\tau_1 \left(1 - \frac{4C_1}{3} \right) - v' \right] y - \frac{4}{3} \tau_1 \left(\frac{y^3}{h^2} - C_1 y \right).$$

Подберём C_1 таким образом, чтобы функция, соответствующая деформации была ортогональна функции, соответствующей гипотезе плоских сечений.

$$2 \int_0^{h/2} \left(\frac{y^3}{h^2} - C_1 y \right) y \delta dy = 0,$$

откуда $C_1 = \frac{3}{20}$, здесь δ - толщина балки (размер в направлении оси z).

Следовательно,

$$u = \left(\frac{4}{5} \tau_1 - v' \right) y - \frac{4}{3} \tau_1 \left(\frac{y^3}{h^2} - \frac{3y}{20} \right). \quad (4)$$

Если ввести обозначение $u_1 = \frac{4}{5} \tau_1 - v'$, выразить отсюда $\tau_1 = (u_1 + v') \frac{5}{4}$ и подставить это в (4), то получим окончательное выражение для продольных перемещений, определяемых двумя ортогональными составляющими – углом поворота u_1 и деформацией поперечного сечения $(u_1 + v')$.

$$u = u_1 y - \frac{5}{3} (u_1 + v') \left(\frac{y^3}{h^2} - \frac{3}{20} y \right).$$

С целью получения разрешающих уравнений задачи воспользуемся вариационным принципом Лагранжа.

Выражение полной энергии балки при изгибе её поперечной нагрузкой $q(x)$ имеет вид

$$\begin{aligned} \Theta &= \int_0^l \int_{-h/2}^{+h/2} \left[\frac{E_x}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \frac{G_{xy}}{2} \tau_1^2 \left(1 - 4 \frac{y^3}{h^2} \right)^2 - \frac{q}{\delta} v \right] \delta dx dy = \\ &= \int_0^l \left[\frac{E_x I_1}{2} (u_1')^2 + \frac{E_x I_2}{2} (u_1' + v'')^2 + \frac{G_{xy} F}{2} (u_1 + v')^2 - qv \right] dx, \end{aligned}$$

где $I_1 = \int_{-h/2}^{+h/2} y^2 \delta dy$, $I_2 = \frac{25}{9} \int_{-h/2}^{+h/2} \left(\frac{y^3}{h^2} - \frac{3y}{20} \right)^2 \delta dy$, $F = \int_{-h/2}^{+h/2} \left(1 - \frac{4y^2}{h^2} \right) \delta dy$.

Следовательно, полная энергия балки есть функционал, зависящий от продольной координаты, искомых функций и их производных.

$$\Theta = \int_0^l \Phi(x, u_1, u_1', v, v', v'') dx.$$

Условием стационарности полной энергии является равенство нулю первой вариации функционала. В результате этой процедуры можно получить систему разрешающих уравнений и естественных граничных условий на торцевых границах балки. В общем виде эта система имеет вид

$$\frac{d}{dx} \frac{\partial \Phi}{\partial u_1'} - \frac{\partial \Phi}{\partial u_1} = 0; \quad \frac{d^2}{dx^2} \frac{\partial \Phi}{\partial v''} - \frac{d}{dx} \frac{\partial \Phi}{\partial v'} + \frac{\partial \Phi}{\partial v} = 0,$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial u_1'} \delta u_1 \Big|_0^l = 0, \left(\frac{\partial \Phi}{\partial v'} - \frac{d}{dx} \frac{\partial \Phi}{\partial v''} \right) \delta v \Big|_0^l = 0, \frac{\partial \Phi}{\partial v''} \delta v' \Big|_0^l = 0.$$

Систему естественных граничных условий необходимо преобразовать к виду, в котором имела бы место работа бимоментов на вариации деформации поперечного сечения. Для этого к равенству

$$\left[\frac{\partial \Phi}{\partial u_1'} \delta u_1 + \left(\frac{\partial \Phi}{\partial v'} - \frac{d}{dx} \frac{\partial \Phi}{\partial v''} \right) \delta v + \frac{\partial \Phi}{\partial v''} \delta v' \right] \Big|_0^l = 0$$

прибавим и вычтем выражение $\frac{\partial \Phi}{\partial v''} \delta u_1 \Big|_0^l$. В результате получим

$$\left[\left(\frac{\partial \Phi}{\partial u_1'} - \frac{\partial \Phi}{\partial v''} \right) \delta u_1 + \left(\frac{\partial \Phi}{\partial v'} - \frac{d}{dx} \frac{\partial \Phi}{\partial v''} \right) \delta v + \frac{\partial \Phi}{\partial v''} \delta(u_1 + v') \right] \Big|_0^l = 0.$$

Исходя из того, что вариации угла поворота, прогиба и деформации на границах балки независимы, получим физически более обоснованную систему граничных условий

$$\left(\frac{\partial \Phi}{\partial u_1'} - \frac{\partial \Phi}{\partial v''} \right) \delta u_1 \Big|_0^l = 0, \left(\frac{\partial \Phi}{\partial v'} - \frac{d}{dx} \frac{\partial \Phi}{\partial v''} \right) \delta v \Big|_0^l = 0, \frac{\partial \Phi}{\partial v''} \delta(u_1 + v') \Big|_0^l = 0.$$

Первое выражение представляет собой равенство нулю работы краевого момента на вариации угла поворота, второе - равенство нулю работы краевой перерезывающей силы на вариации прогиба, третье - равенство нулю работы краевого бимоментов на вариации деформации поперечного сечения.

Вычисляя производные функционала по всем обобщённым координатам и подставляя в систему разрешающих уравнений и граничных условий, получим:

$$E_x I_1 u_1'' + E_x I_2 (u_1'' + v'') - G_{xy} F(u_1 + v') = 0,$$

$$E_x I_2 (u_1' + v')'' - G_{xy} F(u_1 + v')' - q = 0. \quad (5)$$

$$E_x I_1 u_1' \delta u_1 \Big|_0^l = 0,$$

$$\left[G_{xy} F(u_1 + v') - E_x I_2 (u_1 + v')'' \right] \delta v \Big|_0^l = 0, \quad (6)$$

$$E_x I_2 (u_1 + v')' \delta(u_1 + v') \Big|_0^l = 0.$$

Вводя обозначение $\varphi(x) = u_1 + v'$, считая нагрузку постоянной по длине балки и интегрируя систему уравнений (5), получим

$$\varphi = C_1 e^{-\beta(l-x)} + C_2 e^{-\beta x} - \frac{q_0 x}{E_x I_2 \beta^2} - \frac{a_1}{\beta^2}, \quad (7)$$

$$u_1 = - \left(\frac{q_0}{E_x I_2 \alpha} \frac{x^3}{6} + \frac{a_1}{\alpha} \frac{x^2}{2} + a_2 x + a_3 \right), \quad (8)$$

где C_1, C_2, a_1, a_2, a_3 - произвольные константы интегрирования, α и β - коэффициенты, определяемые через жесткостные характеристики балки:

$$\beta^2 = \frac{G_{xy} F}{E_x I_2}, \alpha = \frac{I_1}{I_2}.$$

Прогиб v определим путём интегрирования дифференциального уравнения

$$v' = \varphi - u_1.$$

Отсюда

$$v = \frac{1}{\beta} \left(C_1 e^{-\beta(l-x)} - C_2 e^{-\beta x} \right) - \frac{q_0}{E_x I_2 \beta^2} \frac{x^2}{2} - \frac{a_1}{\beta^2} x + \frac{q_0}{E_x I_2 \alpha} \frac{x^4}{24} + \frac{a_1}{\alpha} \frac{x^3}{6} + a_2 \frac{x^2}{2} + a_3 x + a_4. \quad (9)$$

Используя решения (7) - (9), определим внутренние силовые факторы в балке

$$\begin{aligned} M_z &= E_x I_1 u_1' = - \left(q_0 \frac{x^2}{2} + E_x I_2 a_1 x + E_x I_1 a_2 \right), \\ Q_y &= -E_x I_2 (\varphi'' - \beta^2 \varphi) = -(q_0 x + E_x I_2 a_1), \\ B &= E_x I_2 \varphi' = E I_2 \beta (C_1 e^{-\beta(l-x)} - C_2 e^{-\beta x}) - \frac{q_0}{\beta^2}. \end{aligned} \quad (10)$$

Естественные граничные условия (6) преобразуем для консольной балки, на торцевых поверхностях которой реализуются следующие условия:

$$\begin{aligned} x=0 \quad v &= 0, u_1 = 0, \varphi = 0. \\ x=l \quad M_z &= 0, Q_y = 0, B = 0. \end{aligned}$$

Подставляя сюда (7)-(10), определим константы интегрирования

$$C_1 = \frac{q_0}{E_x I_2 \beta^3}, C_2 = -\frac{q_0 l}{E_x I_2 \beta^2}, a_1 = -\frac{q_0 l}{E_x I_2}, a_2 = \frac{q_0 l^2}{2 E_x I_1}, a_3 = 0, a_4 = -\frac{q_0 l}{E_x I_2 \beta^3}.$$

Подставляя найденные константы в выражения (7)-(10), получим окончательное решение поставленной задачи для консольной балки, изгибаемой постоянной по её длине погонной нагрузкой q_0

$$\begin{aligned}
 v &= \frac{q_0 l}{E_x I_2 \beta^3} \left(e^{-\beta x} + \frac{1}{\beta l} e^{-\beta(l-x)} \right) + \frac{q_0 l^2}{E_x I_2 \beta^2} \left(\frac{\beta^2 x^4}{\alpha l^2 24} - \frac{\beta^2 x^3}{l \alpha 6} + \frac{\beta^2 l^2 - 2\alpha x^2}{2\alpha l^2 2} + \frac{x}{l} - \frac{1}{\beta l} \right) \\
 u_1 &= -\frac{q_0 l^3}{2E_x I_2 \alpha} \left(\frac{x^3}{3l^3} - \frac{x^2}{l^2} + \frac{x}{l} \right), \\
 \varphi &= \frac{q_0 l}{E_x I_2 \beta^2} \left(e^{-\beta x} + \frac{1}{\beta l} e^{-\beta(l-x)} + 1 - \frac{x}{l} \right), M_z = -\frac{q_0 l^2}{2} \left(\frac{x}{l} - 1 \right)^2, \\
 Q_y &= -q_0 l \left(\frac{x}{l} - 1 \right), B = \frac{q_0}{\beta^2} \left(e^{-\beta(l-x)} + \beta l e^{-\beta x} - 1 \right). \quad (11)
 \end{aligned}$$

Следствием системы дифференциальных уравнений (4) является следующее уравнение

$$\alpha u_1''' = -\frac{q}{E_x I_2},$$

где u_1 - угол поворота. Для классической задачи изгиба балок $u_1 = -v'$.

Исключая u_1 из приведённого уравнения, получим классическое уравнение изогнутой упругой оси балки

$$E_x I_1 v^{IV} = q.$$

Для постоянной нагрузки q_0 и сформулированных выше граничных условиях решение задачи имеет вид

$$\begin{aligned}
 v &= \frac{q_0 l^4}{E_x I_1} \left(\frac{x^4}{24l^4} - \frac{x^3}{6l^3} + \frac{x^2}{4l^2} \right), v' = -\frac{q_0 l^3}{2E_x I_1} \left(\frac{x^3}{3l^3} - \frac{x^2}{l^2} + \frac{x}{l} \right), \\
 M_z &= -\frac{q_0 l^2}{2} \left(\frac{x}{l} - 1 \right)^2, \\
 Q_y &= -q_0 l \left(\frac{x}{l} - 1 \right). \quad (12)
 \end{aligned}$$

Сравнивая (11) и (12), отметим совпадение результатов для углов поворота, изгибающих моментов и перерезывающих сил. Не совпадают формулы, определяющие прогиб. Кроме того, в решении (11) содержатся новые функции, отсутствующие в (12) – это обобщенная функция депланации $\varphi(x)$ и обобщенный бимомент $B(x)$.

Уточнение по прогибу v в значительной степени зависит от геометрических характеристик балки, а также от соотношения сдвиговой $G_{xy}F$ и изгибной $E_x I_1$ ее жесткостей.

Список литературы

1. Амбарцумян С.А. Теория анизотропных пластин. М.: Наука, 1987. 360 с.

2. Тимошенко С.П., Войновский – Кригер С. Пластинки и оболочки. М.: Физматгиз, 1963. 636 с.

3. Васильев В.В., Лурье С.А. К проблеме построения неклассических теорий пластин // Изв. АН СССР. Механика твёрдого тела, 1990. С. 158-167

4. Фирсанов В.В. Исследование напряжённо – деформированного состояния прямоугольных пластинок на основе неклассической теории// Проблемы машиностроения и надёжности машин. ИМАШ РАН, 2016. №6. С. 35 – 43.

5. Huu-Tai Thai, Seung-Eock Kim. A review of theories for the modeling and analysis of functionally graded plates and shells. Thin-Walled Structures, 2014. Vol. 82. P. 82-94.

Фирсанов Виктор Васильевич, канд. техн. наук, доц., kaf603@mai.ru, Россия, Москва, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) МАИ

BENDING OF A COMPOSITE BEAM WITH ALL OWENS FOR SHEAR DEFORMATION

V.V. Firsanov

The article presents a variant of the theory of beam bending with deviation from some classical hypotheses. The tangential stress in the beam are set so as to satisfy the boundary conditions on the long edges. Accounting for shear deformation leads to the formulation of the problem in a mixed form: the basic unknowns are deflection and tangential stress. Longitudinal displacement is determined from a relationship, which can be interpreted as a compatibility equation. The resolving equations of the problem, which are obtained using the Lagrange variational principle, have higher order than in Bernoulli theory. In equations and boundary conditions appear some additional kinematic factors and internal generalized forces.

Key words: bending, deformation, deflection, displacement, stress, stiffness, moment, force, deplanation, bimoment.

Firsanov Victor Vasilievich, candidat of technical sciences, docent, kaf603@mai.ru, Russia, Moscow, Moscow Aviation Institute (National Research University) MAI

АНАЛИЗ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ МОДЕРНИЗИРОВАННОГО ШНЕКОВОГО СТЕКАТЕЛЯ ДЛЯ ОТДЕЛЕНИЯ СУСЛА-САМОТЕКА

В.С. Кузнецов, А.В. Болтунов, Е.В. Пантюхина

Рассматривается модернизированная конструкция шнекового стекателя для отделения сусла-самотека в производстве белых столовых вин и проводится анализ влияния на производительность его основных параметров и параметров загружаемого сырья.

Ключевые слова: шнековый стекатель, сусло-самотек, белые столовые вина.

Вино пользуется широким спросом среди населения. Он содержит огромное количество натуральных природных компонентов, органических кислот, минеральных веществ и других элементов. Столовые вина изготавливают путём сбраживания свежего виноградного сока, останавливая брожение на определенной стадии или доводя его до полного сбраживания сахара в сусле [1].

Для производства белых столовых вин берется только сусло-самотек, пресовые фракции направляются на приготовление ординарных крепленых вин. В стекателях реализуется отбор сусла-самотека, из которого впоследствии и производится столовое вино. Проанализировав технологическую схему получения белых столовых вин и рассмотрев машинно-аппаратную схему их приготовления можно сказать, что отделение сусла-самотека от мезги является одной из важнейших операций при приготовлении столового вина, которая осуществляется на стекателях периодического и непрерывного действия.

Отечественные поточные линии переработки винограда комплектуются шнековыми стекателями, которые являются наиболее оптимальным выбором благодаря малым габаритам, высокой производительности и целому ряду других преимуществ. Однако на данный момент их конструкция не совершенна и может быть подвержена различного рода модернизациям, улучшающим те или иные их характеристики [2].

В результате патентно-информационного поиска были проанализированы различные конструкции шнековых стекателей и определены основные направления их модернизации, позволяющие повысить надежность конструкции, качество получаемого сусла и производительность устройства. К ним относятся: регулирование степени отжатия мезги, ввод отстойных зон, очистка сеток, введение в конструкцию дополнительных перфорированных элементов, дополнительное подпресовывание мезги, разделение суслосборника поперечной перегородкой на две части, каждая из которых имеет свой собственный патрубок и др.

На рис. 1 представлена модернизированная конструкция шнекового стекателя, которая, учитывая недостатки предыдущих устройств, эффективно обеспечивает отделение сусла-самотека при производстве столовых вин.

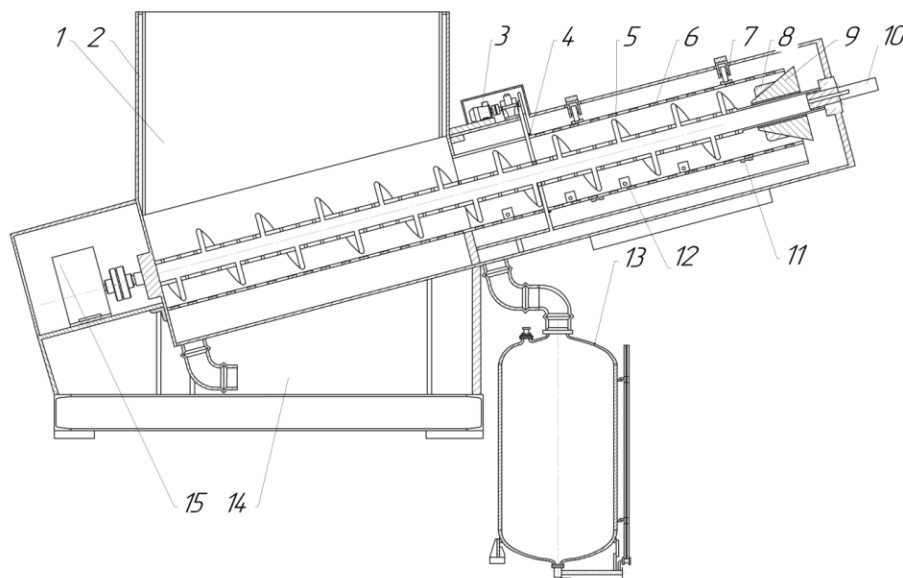


Рис. 1. Модернизированный шнековый стекатель:

**1 – бункер; 2 – неподвижный цилиндр; 3 – электродвигатель;
4 – цепная передача; 5 – шнек; 6 – вращающийся цилиндр; 7 – ролик;
8 – лопатка; 9 – конус; 10 – пневмоцилиндр; 11 – кольцо;
12 – перфорированные перегородки; 13 – сборник стальной
эмалированный; 14 – суслосборник; 15 – электродвигатель**

Стекатель работает следующим образом. Виноград или мезга подаются в неподвижный перфорированный цилиндр, в котором обеспечивается отделение сусла-самотека от мезги. При включении двигателя мезга шнеком перемещается во вращающийся с помощью цепной передачи, роликов и колец цилиндр. Через трубку, подведенную в конец вала шнека, периодически производится продувка сжатым воздухом, обеспечивающая дополнительное разрыхление мезги.

Во время вращения цилиндра одновременно с ним вращается и конус, обеспечивающий подпрессовывание мезги о перфорированные перегородки, во время которого мезга перемещается по цилиндру. Благодаря лопаткам, закрепленным на конусе, производится дополнительное разрыхление уплотняющегося слоя мезги. Сусло-самотек по желобу стекает в суслосборник, а сусло, отделенное в результате вращения шнека и подпрессовывания во вращающемся цилиндре, по желобу стекает в отстойный чан для сусла.

Предложенное модернизированное устройство позволяет за счет дополнительных перфорированных решеток, об которые мезга будет дополнительно подпрессовываться, повысить производительность устройства, а за счёт добавления в конструкцию второго патрубка для слива сусла в стальной отстойный чан, – улучшить качество получаемого сусла.

Основным элементом модернизированного устройства является шнек, от которого зависит равномерность подачи материала и производительность шнекового стекателя в целом, которая определяется по формуле:

$$\Pi = 0,25\pi \cdot (D^2 - d_{\text{пр}}^2) (H - \delta) k \cdot \rho \cdot \varphi \cdot n,$$

где D – наружный диаметр шнека; $d_{\text{пр}}$ – предельный диаметр вала шнека; H – шаг шнека; δ – толщина витка шнека; φ – коэффициент заполнения межвиткового пространства; k – коэффициент заполнения; ρ – средняя плотность продукта; n – частота вращения вала шнека.

Диаметр вала шнека d должен быть больше предельно допускаемого диаметра, который определяем по условию $d_{\text{пр}} \geq \frac{H}{\pi} f$, в котором $\tan \varphi = f$ – коэффициент трения.

Тогда толщина δ витка шнека определится из формулы

$$\delta = \sqrt{\frac{6 |M_{\text{и}}|}{\sigma_{\text{из}}}},$$

где $\sigma_{\text{из}}$ – допустимое напряжение при изгибе; $M_{\text{и}}$ – изгибающий момент в витке шнека по внутреннему контуру

Изгибающий момент в витке шнека по внутреннему контуру рассчитывается по выражению

$$M_{\text{и}} = \frac{p_{\text{max}} \cdot D^2}{32} \cdot \frac{1,9 - 0,7 \cdot a^{-4} \cdot 0,2 \cdot a^{-2} - 5,2 \ln a}{1,3 + 0,7 \cdot a^{-2}},$$

в котором $a = \frac{D}{d_{\text{пр}}}$.

С целью повышения эффективности процесса отделения сусла-самотека, проанализируем влияние на производительность шнекового стекателя его основных параметров и параметров загружаемого сырья. Анализ будем проводить при следующих значениях параметров: $f = 0,3$; $\varphi = 0,7$; $k = 1$; $\sigma_{\text{из}} = 1300 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$. Значениями наружного диаметра и шага шнека будем варьировать: $D = 0,4; 0,5; 0,6 \text{ м}$; $H = 0,1; 0,15 \text{ м}$.

На рис.2 представлены графики зависимости производительности модернизированного шнекового стекателя от частоты вращения вала шнека при различных значениях его наружного диаметра и шага.

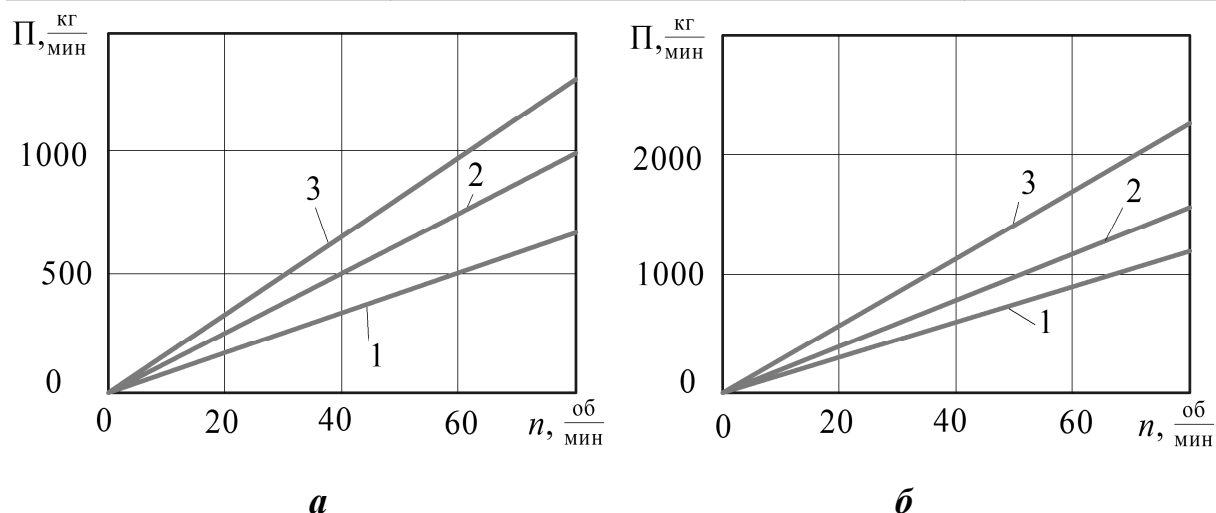


Рис.2. Графики зависимости производительности модернизированного шнекового стекателя от частоты вращения вала шнека при значениях его наружного диаметра $D = 0,4$ м (1); $0,5$ м (2); $0,6$ м (3) и шага:
а – $H = 0,1$ м; б – $H = 0,15$ м

Анализ графиков показал, что при увеличении шага шнека в 1,5 раза производительность шнекового стекателя возрастает практически в 2 раза. Так, при частоте вращения вала шнека $n = 20$ об/мин и наружном диаметре шнека $D = 0,5$ м, его производительность при шаге $H = 0,1$ м составляет 250 кг/мин, а при шаге $H = 0,15$ м достигает 500 кг/мин. При этом, чем больше размер наружного диаметра шнека, тем выше производительность шнекового стекателя.

Таким образом, модернизированная конструкция шнекового стекателя обеспечивает эффективное отделение сусла-самотека высокого качества с производительностью от 250 до 2250 кг/мин в диапазоне рабочих частот вращения от 10 до 80 об/мин.

Список литературы

1. Справочник по виноделию. Изд. 2-е, перераб. и доп. / под ред. Г.Г. Валуйко, В.Т.Косюры. Симферополь: Таврида, 2000. 624 с.
2. Зайчик Ц.Р. Технологическое оборудование винодельческих предприятий. 2-е изд., перераб. и доп. М.: ДеЛи, 2001. 522 с.
3. Прейс В.В. Методические указания по самостоятельной работе студентов «Конструирование и расчеты машин и аппаратов», 2015. 225 с.

Кузнецов Виктор Сергеевич, магистрант, viktor.kuznetsov95@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Болтунов Александр Владимирович, магистрант, boltunovsanek@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Пантюхина Елена Викторовна, канд. техн. наук, доц., elen-davidova@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

**PERFORMANCE ANALYSIS UPGRADED AUGER GLASS
FOR THE SEPARATION OF THE WORT-DRIFT**

V. S. Kuznetsov, A.V. Boltunov, E. V. Pantyukhina

The modernized design of auger glass for separation of wort in the production of white table wines is considered and the analysis of the impact on its performance of the main parameters and parameters of the loaded wine is carried out.

Key words: screw stekatel a must-own course, white table wines.

Kuznetsov Viktor Sergeevich, master, viktor.kuznetsov95@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Boltunov Alexander Vladimirovich, master, boltunovsanek@rambler.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Pantyukhina Elena Viktorovna, candidate of technical science, docent, elen-davidova@mail.ru, Russia, Tula, Tula state university

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОЧЕГО ЦИКЛА ОДНОТРУБНОГО ИМПУЛЬСНОГО ДЕТОНАЦИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

В.Ю. Гидаспов, Н.С. Северина

В настоящей работе описывается методика математического моделирования течения в ИДД в квазиодномерной нестационарной постановке. Используется сеточно-характеристический метод [4-13], позволяющий точно учитывать траектории движения и перепад параметров на ударных и детонационных волнах, а также зоны раздела между газами продувки и горючей смесью. В работе сформулирована система граничных условий, моделирующих работу стадий продувки, заполнения канала горючей смесью, инициирования и распространения детонации. Приводятся результаты численного моделирования рабочего процесса в ИДД, работающего на пропано-воздушной горючей смеси, при сверхзвуковом полете с числом Маха $M = 5$.

Ключевые слова: импульсный детонационный двигатель, численное моделирование, сеточно-характеристический метод с явным выделением разрывов, пропано-воздушная горючая смесь.

В современном представлении импульсный детонационный двигатель (ИДД) — это труба или связка труб, оборудованная системой подачи воздуха и топлива. Один конец трубы (тяговая стенка) закрыт или периодически закрыт в случае использования механического клапана. Другой конец трубы оборудован реактивным соплом. По мере заполнения трубы топливно-воздушной смесью производится инициирование детонации в смеси с помощью того или иного источника инициирования, в результате чего по смеси распространяется детонационная волна, которая, сжигая топливно-воздушную смесь, создает высокое давление на тяговой стенке [1-3]. Далее, давление в трубе снижается после выхода в атмосферу детонационной волны, и процесс повторяется.

В работе рассматриваются квазиодномерные течения газа, влиянием эффектов вязкости, теплопроводности и диффузии пренебрегается [4-14]. Такие течения реагирующего газа в каналах с пологими стенками в областях непрерывности течения описываются квазилинейной системой уравнений в частных производных [14]:

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho F + \frac{\partial}{\partial x} \rho u F = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho u F + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u^2 + p) F = p \frac{\partial F}{\partial x}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho (e + 0,5u^2) F + \frac{\partial}{\partial x} \rho u (h + 0,5u^2) F = 0, \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho F \gamma_i + \frac{\partial}{\partial x} \rho u F \gamma_i = F W_i, \quad i = 1, \dots, N. \quad (4)$$

Здесь (1) — уравнение сохранения массы (неразрывности), (2) — импульса, (3) — энергии, (4) — уравнения, описывающие изменения химического состава, $F = F(x)$ — зависимость площади канала от продольной координаты, N — число компонентов в смеси. Выражения для скорости образования i -ого компонента W_i получаются по обычным правилам химической кинетики [14]. Система уравнений (1) – (4) замыкается термическим и калорическим уравнениями состояний:

$$\rho = \rho(p, T, \gamma_1, \dots, \gamma_N), \quad e = e(p, T, \gamma_1, \dots, \gamma_N).$$

Необходимо отметить, что для корректности системы (1) – (4) должно выполняться условие

$$\sum_{i=1}^N m_i W_i = 0,$$

где m_i — молекулярный вес i -ого компонента.

В случае одномерных движений на поверхностях разрыва параметров течений выполняются соотношения Ренкина-Гюгонио, являющиеся следствием законов сохранения [14]:

$$\begin{aligned} \rho_D(D - u_D) &= \rho_3(D - u_3) = m, \\ \rho_D + \rho_D(D - u_D)^2 &= \rho_3 + \rho_3(D - u_3)^2, \\ \rho_D(D - u_D)\left(e_D + \frac{p_D}{\rho_D} + \frac{(D - u_D)^2}{2}\right) &= \rho_3(D - u_3)\left(e_3 + \frac{p_3}{\rho_3} + \frac{(D - u_3)^2}{2}\right). \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь нижний индекс D соответствует состоянию газа перед разрывом, 3 — за ним, D — скорость распространения разрыва.

Рассматриваются два типа поверхностей разрыва: контактные (тангенциальные) разрывы и ударные волны. Для поверхностей первого типа $m = 0$:

$$D - u_D = D - u_3 = 0.$$

На КР из (5) получаем условия:

$$u_D = u_3, \quad p_D = p_3.$$

Важно подчеркнуть, что КР может быть границей раздела между газами с различными уравнениями состояния.

Для разрывов второго типа — ударных волн:

$$D \neq u_D \neq u_3.$$

Соответственно, выполняются соотношения (5), которые дополняются условиями неизменности концентраций:

$$\gamma_{Di} = \gamma_{3i}, \quad i = 1, \dots, N.$$

Термодинамические свойства реагирующего газа описываются с помощью модели многокомпонентного совершенного газа в рамках допущения о равновесной заселенности энергетических уровней, отвечающих всем внутренним степеням свободы молекул и атомов. В указанном случае удельный термодинамический потенциал Гиббса имеет вид [15]:

$$G(p, T, \bar{\gamma}) = \sum_{i=1}^N \gamma_i (G_i^0(T) + RT \ln \frac{p_i}{p_0}). \quad (6)$$

Здесь $p_0 = 101325$ Па — стандартное давление, $G_i^0(T)$ — температурная часть стандартных молярных потенциалов Гиббса отдельных компонентов. В справочной литературе приводятся полиномиальные аппроксимационные формулы для приведенного стандартного потенциала $\Phi_i^0(T)$, который связан с $G_i^0(T)$ по формуле:

$$G_i^0(T) = \Delta_f H_i^0(T_0) - [h_i^0(T_0) - h_i^0(0)] - T\Phi_i^0(T),$$

где $h_i^0(0)$ — стандартная энтальпия $h(T)$ при абсолютном нуле, $h_i^0(T_0)$ — стандартная энтальпия $h(T)$ при $T_0 = 298.15$ К. Для задания $\Phi_i^0(x)$ ($x = 10^{-4}T$), в работе используются полиномы, аналогичные приведенным в справочнике Глушко:

$$\Phi_i^0(x) = \varphi_0 + \varphi_{\ln} \ln(x) + \varphi_{-2}x^{-2} + \varphi_{-1}x^{-1} + \varphi_1x + \varphi_2x^2 + \varphi_3x^3.$$

Здесь $\varphi_k, k = \ln, -2, \dots, 3$ — числовые коэффициенты, индивидуальные для каждого вещества. Другие термодинамические величины, используемые при математическом моделировании, выражаются через потенциал Гиббса и его частные производные.

Соответствующие (6) термическое и калорическое уравнения состояния имеют вид:

$$p = pR \sum_{i=1}^N \gamma_i T \text{ и } h = \sum_{i=1}^N \gamma_i H_i^0(T), H_i^0(T) = G_i^0(T) - T \frac{dG_i^0(T)}{dT}.$$

В случае произвольного механизма из N_r обратимых химических реакций вида:

$$\sum_{i=1}^N \bar{v}_i^{(r)} M_i \rightleftharpoons \sum_{i=1}^N \bar{v}_i^{(r)} M_i, r = 1, 2, \dots, N_r,$$

$$W_i = \sum_{r=1}^{N_r} (\bar{v}_i^{(r)} - \bar{v}_i^{(r)}) (\bar{K}^{(r)} \prod_{j=1}^N (p\gamma_j)^{\bar{v}_j^{(r)}} - \bar{K}^{(r)} \prod_{j=1}^N (p\gamma_j)^{\bar{v}_j^{(r)}}),$$

где M_i — символ i -ого вещества, $\bar{v}_i^{(r)}$ — стехиометрические коэффициенты, константы скорости прямых $\bar{K}^{(r)}$ и обратных $\bar{K}^{(r)}$ реакций связаны через константу равновесия. Для аппроксимации температурной зависимости констант скоростей прямых реакций используется обобщенная формула Аррениуса:

$$\bar{K}(T) = AT^n \exp\left(-\frac{E}{T}\right).$$

A, n, E — некоторые постоянные величины, индивидуальные для каждой реакции. Для корректности проводимых расчетов все реакции должны быть обратимыми, при этом константы скорости обратной реакции должны рассчитываться через константу равновесия [14-15].

В данной работе для численного решения системы уравнений (1)-(5) используется сеточно-характеристический метод [4-13], позволяющий отслеживать положение и перепады параметров для всех типов разрывов. Рассматриваемая система уравнений (1)-(4) имеет три семейства характеристик: звуковые (C^+ , C^-) и траектории (C^0), вдоль которых выполняются соответствующие соотношения:

$$C^+, C^- : \frac{dx}{dt} = u \pm a : \quad du \pm \frac{1}{\rho a} dp \pm L^\pm dt = 0,$$

$$C^0 : \frac{dx}{dt} = u : \quad dh - \frac{1}{\rho} dp = 0, \quad d\gamma_i - \frac{1}{\rho} W_i dt = 0, \quad i=1, \dots, N,$$

где

$$L^\pm = ua \frac{d \ln F}{dx} + \sum_{i=1}^N \frac{\rho \gamma_i e_T - e_{\gamma_i} \rho_T}{\rho^2 a (e_T \rho_p - e_p \rho_T)} W_i, \quad a = \frac{1}{\rho} \sqrt{\frac{\rho^2 e_T - p \rho_T}{\rho_p e_T - \rho_T e_p}},$$

a – скорость звука, нижние индексы " p ", " T " и " γ_i " обозначают частное дифференцирование термодинамической функции по соответствующему параметру.

Любой узел расчетной сетки относится к одному из следующих типов: входная и выходная границы (ВГ), жесткие стенки (ЖС), ударная волна (УВ), контактный разрыв (КР), точка на характеристике (ТХ), траектория газа (ТГ), фиксированная точка (ФТ). Вычисление параметров производится с использованием сеточно-характеристического метода. На рис. 1 представлены шаблоны расчета точек некоторых типов.

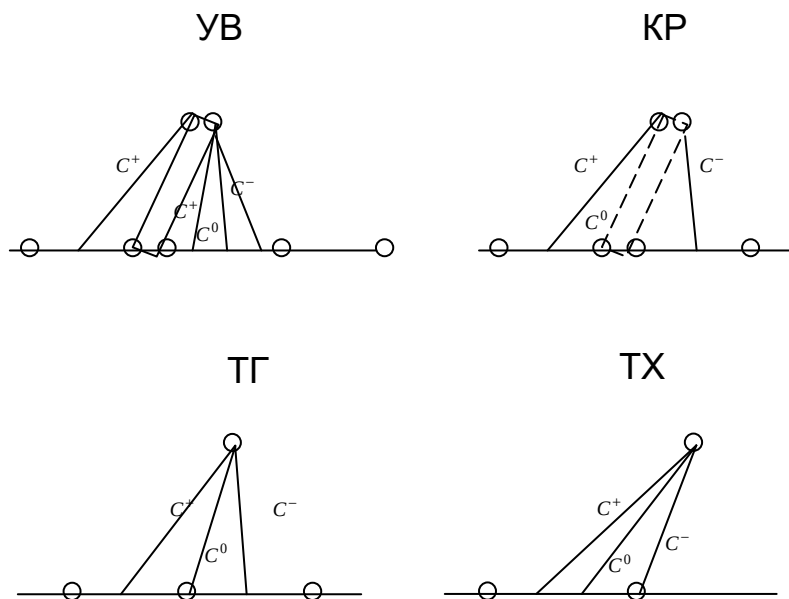


Рис. 1. Расчетные схемы

В силу специфики рассматриваемого сеточно-характеристического метода разностная сетка состоит как из подвижных, так и неподвижных узлов. Число узлов в процессе счета меняется либо в большую, либо в меньшую сторону вследствие пересечений сеточных линий. При каждом пересечении вызывается процедура обработки соответствующего взаимодействия. В табл. 1 представлены все типы взаимодействий, которые могут реализоваться в ходе вычислительного эксперимента. Пустые ячейки соответствуют нереализуемым с физической точки зрения пересечениям.

Таблица 1

Типы взаимодействий

	ВГ	ЖС	ТГ	ФТ	ТХ	УВ	КР
ВГ			X		X	X	X
ЖС					X	X	
ТГ	X			X	X	X	
ФТ			X		X	X	X
ТХ	X	X	X	X	X	X	X
УВ	X	X	X	X	X	X	X
КР	X			X	X	X	X

Как уже отмечалось, цикл работы импульсного детонационного двигателя состоит из стадий заполнения канала ствола горючей смесью, инициирования детонации, истечения продуктов детонации через сопло, продувка канала ствола воздухом. Первая стадия рабочего цикла — стадия заполнения — моделируется как распад разрыва с параметрами: слева параметры стадии (расход, полная энтальпия, состав горючей смеси), справа — параметры на входе в канал. При стадии заполнения мы считаем, что на вход предварительно перемешанная горючая смесь. В результате решения задачи о распаде разрыва образуется контактная поверхность, отделяющая горючую смесь от воздуха.

В момент времени, соответствующий стадии инициирования, клапан мгновенно закрывается. В рамках используемого алгоритма — это смена типа граничной точки Входная граница на Жесткую стенку. Также решается задача Римана, в результате которой образуется на входе веер волн разрежения. «Поджиг» моделируется с помощью решения задачи о мгновенном сгорании топлива в заданной зоне канала при фиксированных значениях плотности и внутренней энергии, при этом происходит локальное повышение температуры и давления, а также мгновенно образуются продукты сгорания вместо исходных компонент топлива. Далее происходит распад образовавшегося разрыва параметров, следствием которого является образование детонационной волны. Далее происходит истечение волны из установки.

Стадия опустошения запускается в тот момент, когда давление за клапаном подачи становится больше, чем давление перед ним на ε (варьируемый параметр). На расстояние примерно одного калибра камеры идет заполнение воздухом, после чего процесс повторяется.

Моделирование граничных условий

При формулировании граничных условий необходимо учитывать характеристические свойства рассматриваемой системы уравнений. Число краевых соотношений, задаваемых на границе расчетной области, должно быть равно числу отходящих от границы характеристик. Отходящими характеристиками называются такие характеристики, которые проходят через граничные точки и попадают в область расчета при возрастании времени t . Характер начальных и граничных условий зависит от типа течений и различается в случае дозвукового и сверхзвукового течений.

Расчет граничной точки «Входная граница»

На левой границе на стадиях продувки канала воздухом и стадии заполнения канала горючей смесью будем считать режим втекания дозвуковым (рис. 2)

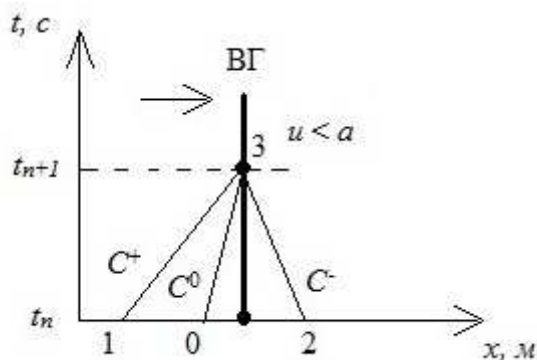


Рис. 2

В рассматриваемом случае характеристики C^+ и C^0 направлены за пределы расчетной области следовательно необходимо задать число граничных условий равное числу соотношений выполняемым вдоль данных характеристик. Предлагается считать известными расход, полную энтальпию и состав втекаемой в установку смеси газов.

$$\sum_{i=1}^N \gamma_i H_i^0(T) + \frac{u^2}{2} = H_0,$$

$$\rho u = Q.$$

Для расчета входной границы также необходимо использовать разностный аналог соотношения вдоль характеристики C^- . В случае, если в процессе итераций достигается значение скорости потока превосходящее скорость звука, то вместо соотношения вдоль характеристики C^- используется условие $u = a$. Полученная система нелинейных уравнений решается методом Ньютона.

Расчет граничной точки «Выходная граница»

При расчете выходной границы в работе рассматриваются режимы дозвукового (рис. 3), звукового и сверхзвукового истечения, а также режим дозвукового втекания атмосферного газа в установку.

В случае сверхзвукового истечения все характеристики направлены внутрь расчетной области и в дополнительных граничных условиях нет необходимости. В дозвуковом режиме истечения дополнительно считается, что давление на выходе из канала равно атмосферному (заданная величина для данной высоты полета, используется вместо соотношения вдоль характеристики C^+). В случае дозвукового втекания дополнительно задается условие равенства полной энтальпии и состава своим значениям в атмосфере (при начале втекания в выходном сечении образуется контактный разрыв). Если в процессе расчетов скорость газа превосходит скорость звука, то вместо соотношения вдоль характеристики C^+ используется условие $u = -a$.

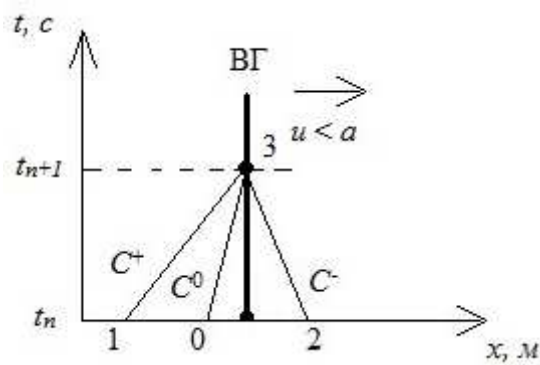


Рис. 3.

Подача топлива

После стадии продувки воздухом необходимо построить математическую модель «впрыска» горючего. Будем считать, что в канал поступает полностью перемешенная стехиометрическая смесь горючего с воздухом, при этом расход воздуха нам известен. Соответствующая система уравнений имеет вид:

$$\rho u F = \rho_1 u_1 F_1 + \rho_2 u_2 F_2 = Q,$$

$$(\rho u^2 + p)F = (\rho_1 u_1^2 + p_1)F_1 + (\rho_2 u_2^2 + p_2)F_2 = I,$$

$$\rho u F \left(h + \frac{u^2}{2} \right) = \rho_1 u_1 F_1 \left(h_1 + \frac{u_1^2}{2} \right) + \rho_2 u_2 F_2 \left(h_2 + \frac{u_2^2}{2} \right) = E,$$

$$\rho u F \gamma_i = \rho_1 u_1 F_1 \gamma_{i1} + \rho_2 u_2 F_2 \gamma_{i2}, \quad i = 1 \dots N.$$

Здесь параметры с индексом 1 — параметры окислителя, с индексом 2 — параметры горючего, без индекса — параметры перемешанной смеси.

Концентрации перемешанной смеси могут быть легко найдены. В случае стехиометрической пропано-воздушной горючей смеси

$$\frac{\rho_1 u_1 F_1 \gamma_{1O_2}}{\rho_2 u_2 F_2 \gamma_{2C_3H_8}} = 5 \text{ или } \frac{Q_1 \gamma_{1O_2}}{Q_2 \gamma_{2C_3H_8}} = 5$$

$$\Rightarrow Q_2 = \frac{Q_1 \gamma_{1O_2}}{5 \gamma_{2C_3H_8}} = \frac{1}{5} Q_1 \gamma_{1O_2} M_{C_3H_8},$$

где $M_{C_3H_8}$ — молярная масса C_3H_8 . Задавая расход Q_2 , мы тем самым обеспечиваем стехиометрическое соотношение горючего и окислителя в смеси. Концентрации смеси γ_i при этом:

$$\gamma_i = \frac{Q_1 \gamma_{i1} + Q_2 \gamma_{i2}}{Q}, \quad i = 1 \dots N.$$

Далее, предполагая, что p_2 , T_2 известны, ρ_2 находим из термического уравнения состояния, а u_2 — из выражения для расхода Q_2 . Зная параметры потоков воздуха и горючего, а следовательно Q , I , E , можно определить параметры перемешанного потока решением системы нелинейных уравнений методом Ньютона.

Результаты вычислительного эксперимента

Приводятся результаты численного моделирования циклического рабочего процесса в ИДД с *механическим* клапаном при сверхзвуковом полете с числом Маха $M = 5$ на высоте $h = 20000$ м. Схема сверхзвукового ИДД представлена на рис. 4. Осесимметричный ИДД состоит из входного устройства 1, механического клапана 2, топливного коллектора 3, источников зажигания 4, кольцевого обводного канала 5, импульсно-детонационной камеры сгорания 6 с препятствиями 7 и выходного устройства 8 [1-3].

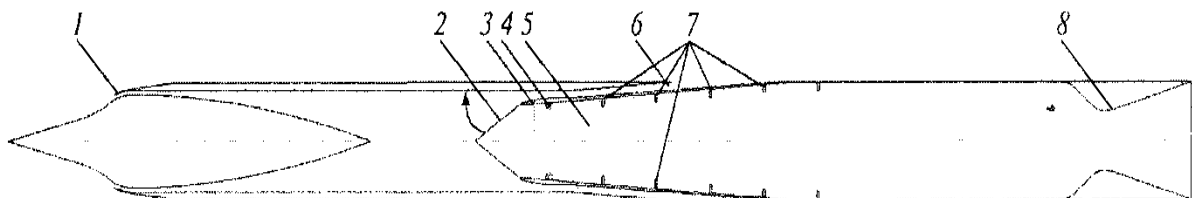


Рис. 4. Схема сверхзвукового ИДД

В данной работе расчет ведется в импульсно-детонационной камере сгорания с одним препятствием, длина камеры — 1.71 м, диаметр — 84 мм (рис. 5).

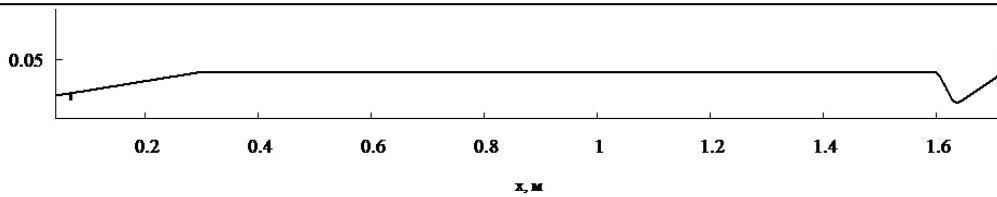


Рис. 5. Импульсно-детонационная камера сгорания

Рассматриваемый вариант двигателя работает на стехиометрической пропано-воздушной смеси, продукты сгорания которой включают 7 компонентов (C_3H_8 , O_2 , CO , CO_2 , H_2 , H_2O , N_2). Для описания химических превращений в горючей смеси используется глобальная кинетическая схема из пяти реакций окисления горючего (табл. 2) [2].

Таблица 2
Глобальная кинетическая схема из пяти реакций окисления горючего

r	Реакция	$\vec{q}^{(r)}$	$A, \left[\frac{(M^3/МОЛЬ)^{\vec{q}^{(r)}-1}}{с} \right]$	n	E, K
$r = 1$	$C_3H_8 + 3,5O_2 \rightarrow 3CO + 4H_2O$	2	A_1	0	E_1
$r = 2$	$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$	2	$1,0 \cdot 10^9 / p$	0	20885,76
$r = 3$	$CO_2 + H_2 \rightarrow CO + H_2O$	2	$3,1 \cdot 10^{10} / p$	0	24710,62
$r = 4$	$H_2 + H_2 + O_2 \rightarrow H_2O + H_2O$	3	$7,0 \cdot 10^7 / p^{0,5}$	0	10568,70
$r = 5$	$CO + CO + O_2 \rightarrow CO_2 + CO_2$	3	$8,5 \cdot 10^6 / p^{1,5}$	0	10568,70

Здесь r — номер реакции, $\vec{q}^{(r)}$ — молекулярность соответствующих элементарных реакций, т. е. число частиц, которые участвуют в элементарном акте химического взаимодействия, $p = p/p_0$. Реакция 1 рассматривается как бимолекулярная. Для аппроксимации температурной зависимости констант скоростей прямых реакций используется обобщенная формула Аррениуса:

$$\vec{K}(T, p) = AT^n \exp\left(-\frac{E}{T}\right),$$

где A , n , E — некоторые постоянные величины, индивидуальные для каждой реакции. Параметры A , E для реакции 1 приведены в табл. 3 [2-3] в зависимости от температуры, состава смеси и давления.

Таблица 3
Параметры A , E для реакции 1 в зависимости от температуры, состава смеси и давления

p , атм	A_1					E_1	
	1	20	40	80	120		
C_3H_8	$1,96 \cdot 10^9$	$1,96 \cdot 10^9$	$1,96 \cdot 10^9$	$1,96 \cdot 10^9$	$1,96 \cdot 10^9$	20130.85	$T \leq 775$
	$1,73 \cdot 10^9$	$8,77 \cdot 10^8$	$7,50 \cdot 10^8$	$6,41 \cdot 10^8$	$5,85 \cdot 10^8$	22647.21	$T > 775$

Тестирование данного механизма привело к следующим результатам (рис. 6). Для начальных данных $p_0 = 101000$ Па, $T_0 = 288.2$ К и начального состава (стехиометрия пропан-воздух) были построены ударная и детонационная адиабаты. Также была решена неравновесная задача о распространении стационарной детонационной волны с теми же начальными данными и различными скоростями детонационной волны. Видно, что на фазовой плоскости решения этой задачи (четыре прямые) приходят не на равновесную детонационную адиабату, а на другую кривую (пунктирная линия). Также, если увеличить в реакции 1 константу скорости в сто раз (при $D = 2500$ м/с, например), то прямая продлевается – т.е. выходит на другие равновесные значения (увеличенный фрагмент).

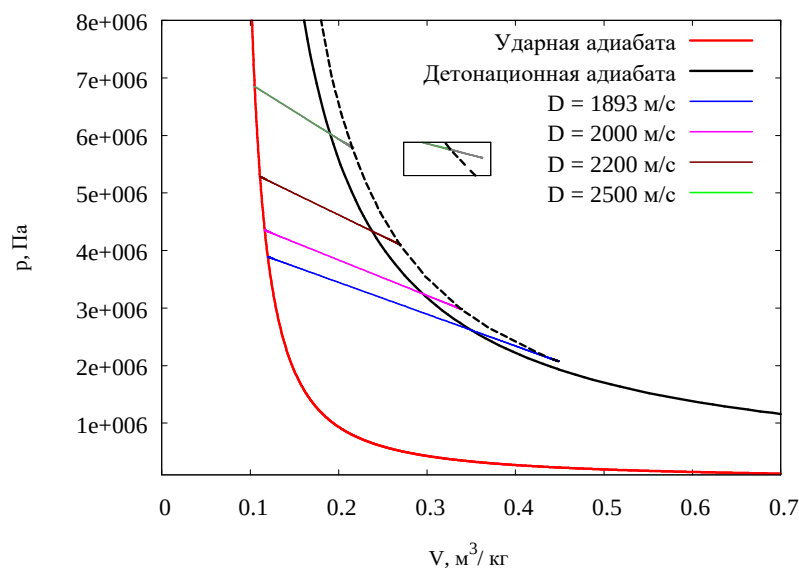


Рис. 6. P-V диаграмма процесса

Скорость Ч-Ж по данному механизму – 1893 м/с, по теории – 1826 м/с. На рис. 7 представлены распределения температуры за ударной волной. На график нанесены прямые линии – уровни равновесной температуры на равновесной адиабате для соответствующей скорости распространения детонационной волны.

Для устранения отмеченных недостатков мы в соответствии с работой [13], будем считать все реакции обратимыми, при этом первую реакцию запишем в виде: $C_3H_8 + O_2 \Leftrightarrow \frac{6}{7}CO + \frac{8}{7}H_2O + \frac{5}{7}C_3H_8$, при этом величину A_1 умножим на $2/7$.

Параметры атмосферы на рассматриваемой высоте составляют: $p = 5529$ Па, $T = 216.7$ К, $\rho = 0.0889$ кг/м³. Расчет начинается с продувки камеры сгорания воздухом, который поступил через воздухозаборник, и на входе в камеру имеет следующие характеристики дозвукового потока с

числом Маха $M = 0.407$: $p = 203070$ Па, $T = 1007$ К, $\rho = 0.7026$ кг/м³, $u = 257$ м/с (данные ИХФ РАН). Стадия продувки длится до формирования установившегося течения воздуха. Ниже представлена рассчитываемая временная развертка течения (рис. 7), а также распределения параметров установившегося потока.

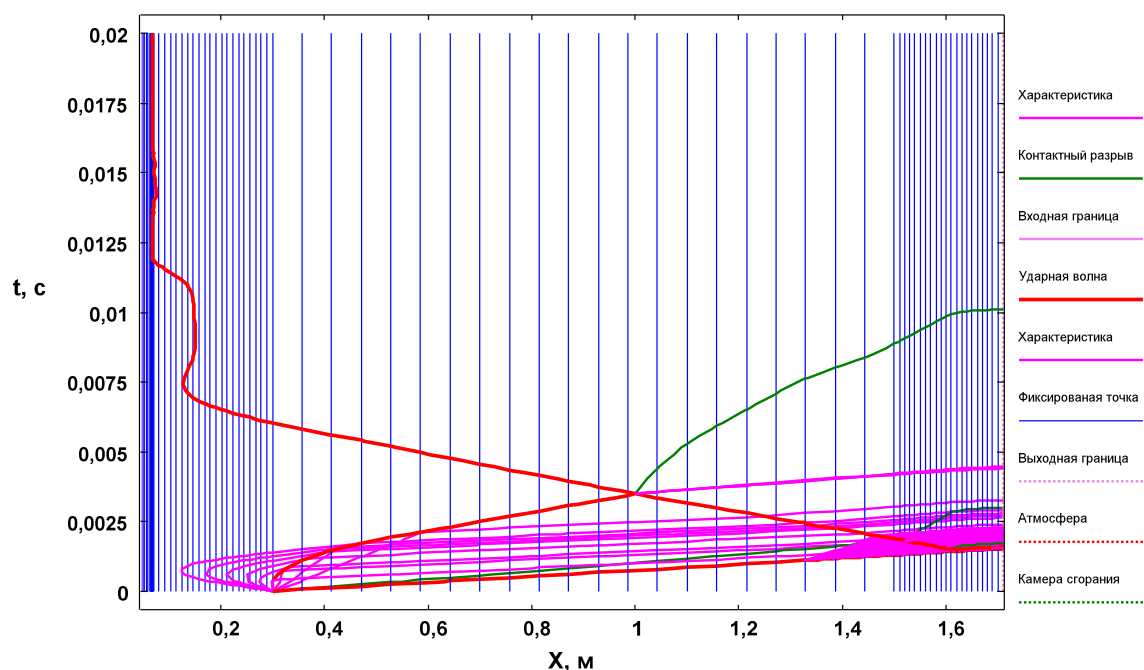


Рис. 7. Временная развертка течения

Заключение

В работе описана замкнутая физико-математическая модель течения в однотрубном импульсном детонационном двигателе, представлены вычислительные модели и алгоритмы, описывающие различные стадии процесса. Описана оригинальная модификация упрощенного кинетического механизма сгорания пропана. Представлена временная развертка цикла работы двигателя.

Работа выполнена при выполнении государственного задания № 9.7555.2017/БЧ.

Список литературы

1. Импульсные детонационные двигатели // под ред. д.ф.-м.н. Фролова С. М. –М.: ТОРУС ПРЕСС, 2006.
2. Басевич В.Я., Фролов С.М. Глобальные кинетические механизмы используемые при моделировании многостадийного воспламенения углеводородов в реагирующих течениях // Химическая физика, 2006. Т. 25. № 6. С. 54.

3. Иванов В.С., Фролов С.М. Математическое моделирование рабочего процесса и тяговых характеристик воздушно-реактивного импульсного детонационного двигателя в условиях сверхзвукового полета // Хим. физика, 2011. Т. 30. № 7. С. 48-61.
4. Гидаспов В.Ю., Пирумов У.Г., Северина Н.С. Математическое моделирование квазиодномерных нестационарных течений реагирующего газа с произвольным числом взаимодействующих разрывов // Вестник Московского авиационного института, 2008. № 5. С. 83-94.
5. Гидаспов В.Ю. Распад разрыва в детонирующем газе // Вестник Московского авиационного института, 2010. Т. 17. № 6. С. 72-79.
6. Гидаспов В.Ю., Северина Н.С. Численное исследование газовой детонации в ударной трубе // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского, 2011. №4. Ч. 3. С. 714-716.
7. Гидаспов В.Ю., Пирумов У.Г., Северина Н.С. Тестирование методики моделирования нестационарных течений газа с ударными и детонационными волнами. Вестник Московского авиационного института, 2011. Т. 18. № 6. С. 119-124.
8. Гидаспов В.Ю., Северина Н.С. Численное моделирование экспериментов по определению времени задержки воспламенения за падающими ударными волнами // Физика горения и взрыва, 2013. Т. 49. № 4. С. 31-40.
9. Гидаспов В.Ю., Северина Н.С. Численное моделирование тонкой структуры цилиндрической детонационной волны в водородно-воздушной горючей смеси // Теплофизика высоких температур, 2015. Т. 53. № 4. С. 556-560.
10. Гидаспов В.Ю., Северина Н.С. Элементарные модели и вычислительные алгоритмы физической газовой динамики. Ударные и детонационные волны: учебное пособие. М.: Факториал, 2016. 84 с.
11. Gidasпов V.Yu., Golubev V.K, Severina N.S. A software package for simulation of unsteady flows of the reacting gas in the channel // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: математическое моделирование и программирование, 2016. Т. 9. № 3. С. 94-104.
12. Гидаспов В.Ю., Северина Н.С. Некоторые задачи физической газовой динамики. М.: Изд-во МАИ, 2016. 196 с.
13. Гидаспов В.Ю., Северина Н.С. Численное моделирование детонации пропано-воздушной горючей смеси с учетом необратимых химических реакций. Теплофизика высоких температур, 2017. Т. 55. № 5. С. 795-799.
14. Пирумов У.Г., Росляков Г.С. Газовая динамика сопел. М.:Наука, Физматлит, 1990. 368 с.
15. Термодинамические свойства индивидуальных веществ: Справочное издание в 4-х т.// Л.В. Гурвич, И.В. Вейц, В.А. Медведев и др. М.: Наука, 1982.

Гидаспов Владимир Юрьевич, канд. физ.-мат. наук, доц., ведущий научный сотрудник, gidaspov@mai.ru, Россия, Москва, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),

Северина Наталья Сергеевна, канд. физ.-мат. наук, доц., severina@mai.ru, Россия, Москва, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)

NUMERICAL SIMULATION OF THE WORKING CYCLE OF A SINGLE PIPE PULSE DETONATION ENGINE

V.Yu. Gidaspov, N.S. Severina

The paper formulates a system of boundary conditions simulating the operation of purging stages, filling the channel with a combustible mixture, initiating and propagating detonation. The results of numerical modeling of the working process in the PDE operating on a propane-air combustible mixture in a supersonic flight with Mach number $M = 5$ are presented.

Key words: pulse detonation engine, numerical simulation, grid-characteristic method with explicit discontinuity, propane-air combustible mixture.

Gidaspov Vladimir Yurjevich, candidate of physical and mathematical sciences, do-cent, gidaspov@mai.ru, Russia, Moscow, Moscow Aviation Institute (National Research Uni-versity),

Severina Natalia Sergeevna, candidate of physical and mathematical sciences, do-cent, severina@mai.ru, Russia, Moscow, Moscow Aviation Institute (National Research Uni-versity)

К ВОПРОСУ ОЦЕНКИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ В АВТОМАТИЗИРОВАННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ В УСЛОВИЯХ АПРИОРНОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

К.Н. Осипов, М.В. Заморенов, А.Н. Круговой

Рассматриваются вопросы практического внедрения и рассчитывается точность оценок состояния динамических систем с использованием алгоритма фильтра Калмана. Результаты решения классической прикладной задачи оценки параметров двигателя постоянного тока в условиях априорной неопределенности, используя вычислительный эксперимент, сравниваются с результатами, полученными в ходе натурного эксперимента. Показана медленная сходимость оценок, полученных фильтром Калмана, к истинным значениям в условиях априорной неопределенности.

Ключевые слова: динамическая система, фильтр Калмана, стохастическое оценивание.

Совершенствование математического обеспечения современных автоматизированных систем управления, в том числе алгоритмов идентификации и оценки состояний динамических объектов и систем остается актуальным для многих инженерных приложений, например, таких как анализ измерительной информации в задачах управления движением беспилотных транспортных средств или технологических объектов [1-3]. Объясняется это постоянным ужесточением требований к конкурентоспособности изделий при условии необходимости снижения производственных затрат, что особенно актуально в условиях мирового промышленно-экономического кризиса. Кроме этого актуальность исследований подтверждается современными направлениями развития РФ, отраженными Российским фондом фундаментальных исследований (РФФИ) и Российским фондом научных исследований (РНФ) в перечне современных критических технологий.

В ходе оценки состояний сложных технических объектов и систем под вектором состояния понимают вектор физических величин, однозначно характеризующих поведение системы [4], процесс наблюдения за которой в общем виде описывается системой двух уравнений:

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= f(x(t), u(t), \omega(t)), \\ y(t) &= \varphi(x(t), \varepsilon(t)).\end{aligned}\tag{1}$$

В системе (1) $(n \times 1)$ -вектор x – вектор состояния системы, $(m \times 1)$ -вектор $y(t)$ – вектор наблюдения (вектор, содержащий измеренные значения вектора состояния), $\omega(t)$, $\varepsilon(t)$ – внутренние и внешние возмущения, соответственно, $u(t)$ – вектор управления. Модель (1) соответствует случаю, когда непосредственное измерение вектора состояния невозможно.

Под оценкой вектора состояния или оценкой состояния системы понимают процедуру определения истинных значений вектора $x(t)$ по известным значениям вектора наблюдений $y(t)$. Под идентификацией – определение значений параметров модели (1) по результатам наблюдений за системой [4, 5].

Наиболее распространенным алгоритмом оценки состояния и идентификации технических систем является фильтр Калмана [2]. Он применим для широкого класса систем и объектов различной физической природы, реализован в большом количестве встроенных систем управления и позволяет получить оценки с минимальной дисперсией ошибок [4]. Однако в многих современных научных трудах и технической литературе, например, [6, 7] показано, что с помощью фильтра Калмана получение оценок, оптимальных с точки зрения среднеквадратического критерия, возможно только при известных вероятностных характеристиках внешних и внутренних возмущений. Существующие субоптимальные и адаптивные алгоритмы оценивания в условиях неизвестных вероятностных характеристик шумов имеют ряд недостатков, связанных с нелинейностью, невысокой скоростью сходимости и недостаточной точностью получаемых оценок. В результате возникает задача определения возможностей технической применимости алгоритма фильтра Калмана в задачах оценки параметров технологического оборудования, используемого в современном производстве, в условиях априорной неопределенности, а также поиска путей дальнейшего совершенствования существующих алгоритмов фильтрации.

Целью данной работы является разъяснение вопросов определения возможностей технической применимости, практического внедрения и дальнейшего совершенствования алгоритма фильтра Калмана в задачах оценки параметров технологического оборудования современных производств в условиях априорной неопределенности

Рассмотрим классический пример, связанный с исследованием параметров двигателя постоянного тока. Под вектором состояния будем понимать совокупность двух переменных, характеризующих в каждый момент времени t угловую скорость ротора $\omega(t)$ и ток в его обмотках $i(t)$, под управлением – значения питающего напряжения $u(t)$.

Математическая модель двигателя постоянного тока известна и представляет два дифференциальных уравнения.

Первое уравнение описывает электрическую цепь двигателя

$$u(t) = E(t) + i(t) \cdot r + L \frac{di(t)}{dt}, \quad (2)$$

где $E(t) = C_e \cdot \Phi \cdot \omega(t)$ – противо-ЭДС; C_e – конструктивный коэффициент, Φ – магнитный поток; r – сопротивление обмоток якоря; L – индуктивность якоря.

Второе уравнение описывает связь крутящего момента, развиваемого двигателем, с нагрузкой и ускорением ротора:

$$J \cdot \frac{d\omega(t)}{dt} = M - f\omega(t), \quad (3)$$

где $M = C_M \cdot \Phi \cdot i(t)$ – крутящий момент, развиваемый двигателем; C_M – конструктивный коэффициент; J – момент инерции, приведенный к валу двигателя; f – коэффициент сопротивления вращению вала двигателя.

Если допустить постоянство магнитного потока, то можно принять

$$C_M \cdot \Phi = C_e \cdot \Phi = k.$$

Объединение уравнений (2) и (3) в систему уравнений позволяет представить модель двигателя постоянного тока в пространстве состояний:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + \varepsilon_t; \quad (4)$$

$$y(t) = C \cdot x(t) + v_t,$$

где $x_t = [\omega(t) \quad i(t)]'$ – вектор состояния системы; $A = \begin{bmatrix} \frac{k}{J} & -\frac{f}{J} \\ -\frac{k}{L} & -\frac{r}{L} \end{bmatrix}$ – матри-

ца перехода состояний; C – единичная матрица наблюдений; $B = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{L} \end{bmatrix}'$ – матрица управления; $y(t)$ – вектор измеренных значений вектора состояния.

Примем систему инвариантной, когда матрицы A , B и C не зависят от времени. Представление (4) необходимо для оценки и прогноза вектора состояния в реальном времени поступления нового измерения (наблюдения), используя алгоритм фильтра Калмана.

Модель (4), построенная на базе дифференциальных уравнений, описывает непрерывно изменяющееся состояние системы. Однако в реальных цифровых системах управления измерительная информация, поступающая на вход фильтра, представляет набор равноотстоящих во времени дискретных отсчетов. Поэтому для реализации дискретного алгоритма фильтра Калмана модель (4) должна быть переписана в дискретной форме, используя известный подход, детально рассмотренный в [8, 9]:

$$\begin{aligned} x_j &= Fx_{j-1} + Gu_j + \varepsilon_j; \\ y_j &= C \cdot x_j + v_j, \end{aligned} \quad (5)$$

где 2×1 – вектор $x_j = (\omega_j \quad i_j)'$ – вектор состояния, содержащий значения угловой скорости ротора $\omega(t)$ и тока в его обмотках $i(t)$ в дискретный момент времени $j=1,2,3,\dots$; $F = e^{AT}$ – квадратная матрица перехода состоя-

ний, соответствующая дискретному случаю; $G = [A^{-1}(e^{AT} - I)B]$ – матрица управления, соответствующая дискретному случаю; e – матричная экспонента; T – шаг дискретизации; $'$ – символ транспонирования; I – единичная матрица.

Процедура оценки вектора состояния фильтром Калмана, используя модель (5), заключается в следующем [2, 4].

На первом этапе рассчитывается априорная (прогнозная) оценка вектора состояния x_t по наблюдениям $y_{j-1}, \dots, y_0$

$$\hat{x}_{j/j-1} = F\hat{x}_{j-1} + Gu_j. \quad (6)$$

Затем определяются значения априорной ковариационной матрицы ошибок оценивания

$$P_{t/t-1} \equiv E\{[x_{j/j-1} - \hat{x}_{j/j-1}] \cdot [x_{j/j-1} - \hat{x}_{j/j-1}]^T\} = FP_{j-1}F' + R_j, \quad (7)$$

где R – ковариационная матрица шумов в канале вектора измерения.

При поступлении нового наблюдения априорная оценка вектора состояния корректируется по формуле

$$\hat{x}_j = \hat{x}_{j/j-1} + K_j z_j \quad (8)$$

в зависимости от разницы между наблюдением и априорной оценкой

$$z_j = y_j - G\hat{x}_{j/j-1}. \quad (9)$$

Эту разницу называют невязкой (инновацией, остаточным членом). Матрица K_t весовых коэффициентов (коэффициентов усиления) рассчитывается по формуле

$$K_j = P_{j/j-1}C_0^{-1} \quad (10)$$

где $C_0 = E[z_j z_j'] = [CP_{j/j-1}C' + R_j]$; R – ковариационная матрица шумов в канале вектора состояния системы.

Из анализа уравнений (6)-(10) следует, что их практическая реализация связана с необходимостью хранения априорных значений оценки вектора состояния и ковариационной матрицы ошибок оценивания. Это означает, что алгоритм не требует больших вычислительных мощностей в случаях, когда размерность вектора состояния не велика. Увеличение размерности вектора состояния вызывает увеличение массива, необходимого для хранения указанных величин, а также увеличивает вычислительную сложность. Для современных ЭВМ это несущественно. Однако при реализации алгоритма на базе портативных (бортовых) микропроцессорных систем, в которых имеются ограничения на объем памяти оперативных и постоянно запоминающих устройств, размерность вектора состояния оказывает влияние на скорость вычислений.

Оценка точности алгоритма (6)-(10) проведена в несколько этапов. На первом этапе проведен вычислительный эксперимент в среде *MathLab*. Параметры системы (5) были определены для двигателя постоянного тока

СЛ-661 и имели следующие значения: $F = \begin{bmatrix} 0,97 & 0,0069 \\ -0,504 & -0,0026 \end{bmatrix}$,

$G = \begin{bmatrix} 0,0239 \\ 0,567 \end{bmatrix}$, время дискретизации составляло 0,01 с. Истинные значения ковариационных матриц шумов предполагались следующими: $Q = \begin{bmatrix} 0,01 & 0 \\ 0 & 0,05 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \text{рад/с} \\ A \end{bmatrix}$ и $R = \begin{bmatrix} 0,9 & 0 \\ 0 & 0,1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \text{рад/с} \\ A \end{bmatrix}$. Распределение шума задавалось нормальное с нулевым математическим ожиданием и единичной дисперсией.

Численно точность алгоритма определялась значениями относительной ошибки оценивания, используя следующее уравнение

$$Error = \frac{x_t - \hat{x}_t}{x_t} \cdot 100\%, \quad (11)$$

где x_t – истинные значения вектора состояния; $\hat{x}_t$ – оценка вектора состояния.

Результаты вычислений при известных значениях ковариационных матриц шумов Q и R представлены на рис. 1.

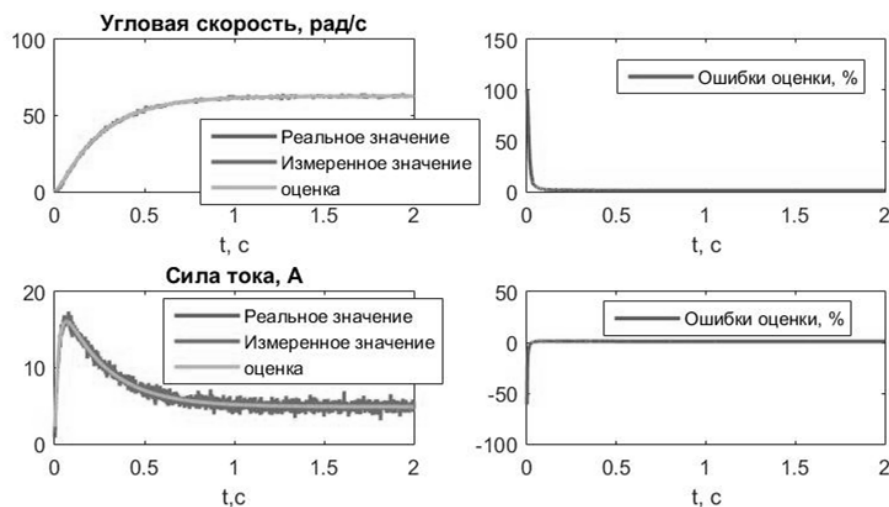


Рис. 1. Оценка вектора состояния фильтром Калмана при известных характеристиках внешних возмущений

Анализ результатов вычислений показал высокую точность определения значений вектора состояния при известных значениях параметров шума. Ошибки оценивания в течение первых шагов сходятся к нулю. Однако дальнейшее исследование взаимосвязи между точностью оценивания вектора состояния и точностью определения значений ковариационных матриц шумов Q и R показало противоположный результат. Например, задание значений ковариационных матриц шумов Q и R с погрешностью в 10...15 % вызывает значительное увеличение ошибок оценивания и време-

ни адаптации фильтра (таблица, рис. 2). Под временем адаптации понимается количество шагов, необходимых для завершения переходного времени вычисления значений ошибки оценивания.

Кроме этого, установлено, что на результат оценивания большое влияние оказывают начальные приближения ковариационной матрицы ошибок оценивания P_0 , оценки вектора состояния $\hat{x}_0$, а также точность нахождения численных значений элементов переходной матрицы F .

Исследование точности процесса оценивания

Показатель	Отклонение значений ковариационных матриц шумов от истинных значений, %				
	5	10	15	20	25
Среднее значение ошибок оценивания, %	7	12	23	25	37
Время адаптации, кол. шагов	15	28	150	370	680

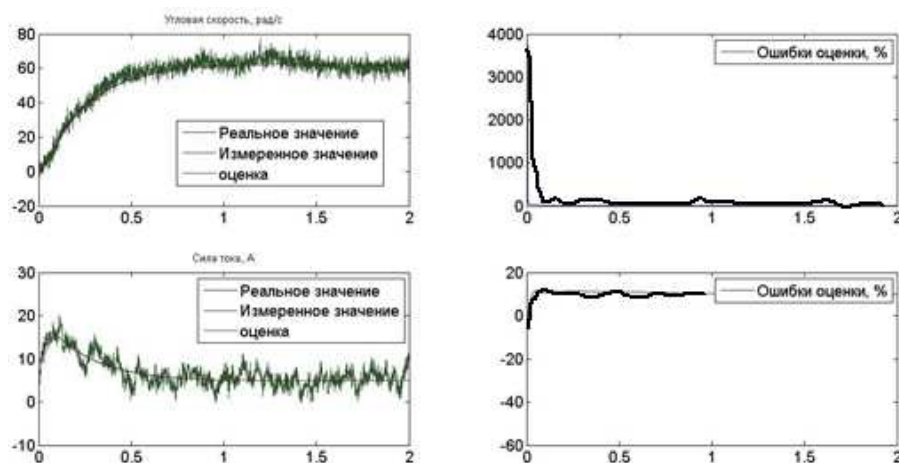
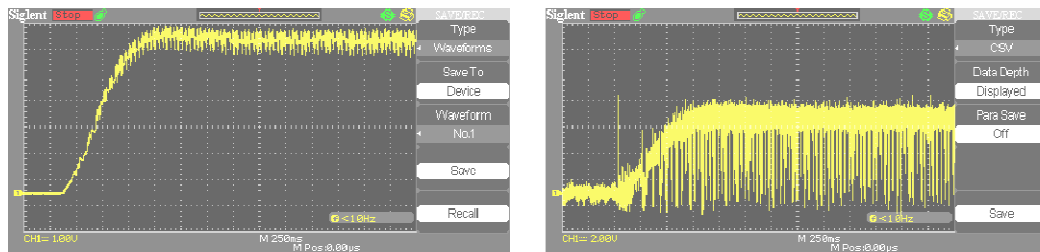


Рис. 2. Оценка вектора состояния фильтром Калмана в условиях отсутствия достоверных сведений о значениях ковариационных матриц шумов

Натурный эксперимент, в рамках которого были выполнены попытки оценить значения угловой скорости и силы тока в обмотке якоря двигателя СК 661 при различных значениях уровня помех (погрешностей измерений) и неизвестных значениях параметров шумов, к сожалению, подтвердил невысокую скорость сходимости ошибок оценивания к нулю (рис. 3-5). На всех рисунках по оси абсцисс отложен номер измерения. Измерения проводились в лаборатории исследования электрических приводов Севастопольского государственного университета с использованием цифро-аналогового осциллографа OWON SDS5032E. При этом в условиях, когда мощность помех значительно меньше мощности полезного сигнала, алгоритм фильтра Калмана даже при задании ошибочных значений параметров шума со временем настраивается и позволяет решить задачу оценивания (см. рис. 4). Однако если мощность помех возрастает и стремиться к мощ-

ности полезного сигнала, то задача определения истинных значений вектора состояния при неизвестных параметрах шумов становится невыполнимой (см. рис. 5).



а

б

Рис. 3. Результаты измерения угловой скорости ДПТ СЛ 661:
а – измерения выполнены с использованием емкостного фильтра помех; б – измерения без дополнительной фильтрации

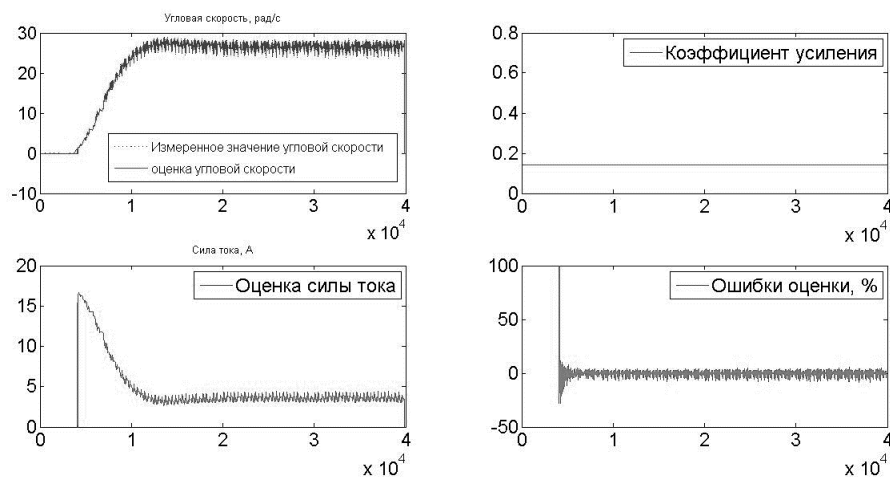


Рис. 4. Оценка вектора состояния ДПТ СЛ-661 при низком уровне помех в канале измерений

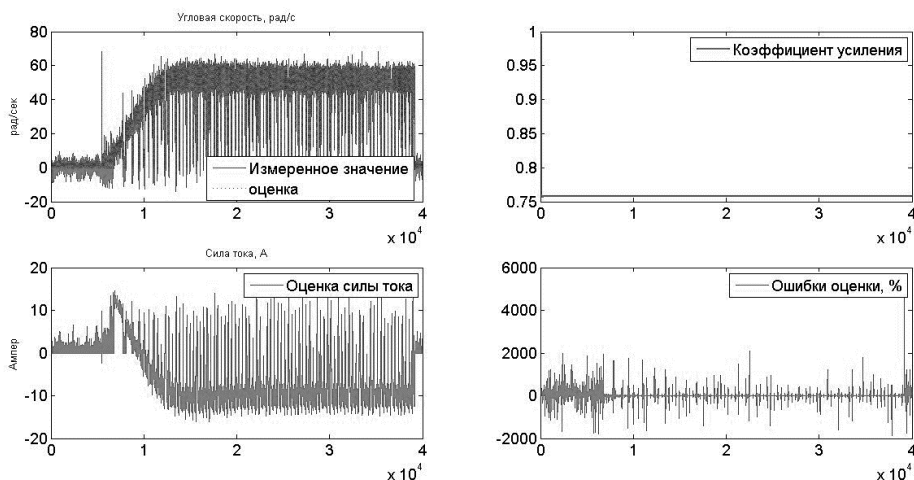


Рис. 5. Оценка вектора состояния ДПТ СЛ-661 при высоком уровне помех в канале измерений

Анализируя результаты натурного и вычислительного экспериментов, можно сделать вывод о том, что использование алгоритма фильтра Калмана для решения задач оценки состояния технически сложных машиностроительных объектов и технологического оборудования в реальном времени измерений, например, в ходе автоматизированных испытаний, возможно только в условиях наличия достоверной априорной информации о параметрах возмущений, а также в условиях, когда мощность шума значительно меньше мощности полезного сигнала. В условиях отсутствия априорной информации о вероятностных параметрах шума, а также в условиях, когда мощность шума (помех, погрешностей измерений и т.д.) стремится к мощности полезного сигнала, решение задачи оценивания невозможно. Это подтверждает предположение о том, что эффективное решение задачи оценивания параметров вектора состояния в условиях отсутствия информации о ковариационных матрицах шума $Q(t)$ и $R(t)$, особенно для нелинейных объектов, до сих пор не найдено. По мнению авторов, решение этой задачи может быть достигнуто путем построения адаптивного алгоритма оценивания на основе информационной меры Кульбака, являющейся естественной мерой близости двух вероятностных распределений.

Список литературы

1. Поддивилова Е.О., Ширяев В.И. Сравнение оценок минимаксного фильтра и фильтра Калмана // Вестник ЮУрГУ, 2012. № 40 (299). С. 182-186.
2. Simon D. Kalman Filtering // Bedded systems programming, 2001. P. 72 – 79.
3. Distributed Kalman Filtering over Massive Data Sets: Analysis Through Large Deviations of Random Riccati Equations / Di Li, Soummya Kar, Jose' M. F. Moura, H. Vincent Poor, Shuguang Cui. //arXiv:1402.0246 [cs.IT] 12 June 2015 URL: <http://arxiv.org/pdf/1402.0246v3.pdf> (22.12.15).
4. Mohinder S., Angus P. Kalman Filtering: theory and practice using Matlab. A Wiley Interscience Publication John Wiley & Sons. Inc, 2001. 401 p.
5. Pervukhina E. Identification of Technical System on Trials for Adaptation to Specific Functioning Modes // ZAMM-Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik, 1996. Vol.76. Suppl. 3. P. 533-534.
6. Pervukhina E., Emmenegger J.-F. Adaptive Time Series Filters Obtained by Minimization of the Kullback-Leibler Divergence Criterion // International Journal of Applied Mathematics. Vol. 17. N1. P. 69-89.
7. Pervukhina E., Osipov K., Golikova V. Stochastic Models in Acceptance Testing for Complex Machines // Second International Symposium on Stochastic Models in Reliability Engineering, Life Science and Operations Management (SMRLO), 2016. P. 87 – 94.

8. Y. Bar-Shalom and X. R. Li. Estimation with Applications to Tracking and Navigation. 2001. John Wiley & Sons, Inc., New York, NY, USA.

9. Brown R.G., P.Y.C. Hwang. Introduction to Random Signals and Applied Kalman Filtering. 3rd ed. New York: Wiley, 1997.

Осипов Константин Николаевич, канд. тех. наук, доц., assistenttmm@mail.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет,

Заморёнов Михаил Вадимович, канд. тех. наук, доц., assistenttmm@mail.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет,

Круговой Александр Николаевич, канд. тех. наук, доц., assistenttmm@mail.ru, Россия, Севастополь, Севастопольский государственный университет

THE PROBLEMS OF ESTIMATION OF MEASUREMENT INFORMATION
IN THE AUTOMATED PRODUCTION IN THE CONDITIONS
OF THE PRIORITY UNCERTAINTY

K.N. Osipov, M.V. Zamoryonov, A.N. Krugovoy

The questions of practical realization of the method of estimations of the state of the dynamic system with the use of the Kalman filter is shown. The results of solving the classical applied problem of estimating the parameters of a DC motor under conditions of a priori uncertainty, using a computational experiment, are compared with the results obtained in the course of a full-scale experiment. The slow convergence of the estimates obtained by the Kalman filter to the true values in the conditions of a priori uncertainty is shown.

Key words: Kalman's filter, estimations, dynamic systems.

Osipov Konstantin Nikolaevich, candidate of technical sciences, docent, assistenttmm@mail.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol state university,

Zamoryonov Mikhail Vladimirovich, candidate of technical sciences, docent, assistenttmm@mail.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol state university,

Krugovoy Alekandr Nikolaevich, candidate of technical sciences, docent, assistenttmm@mail.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol state university

ИССЛЕДОВАНИЕ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ РАСТЯНУТОГО КОМПОЗИТНОГО СТЕРЖНЯ

С.Л. Заярный, А.А. Логвинов, Г.Ю. Грачев

Рассмотрена имитационная модель растянутого композитного стержня при условии хрупкого разрушения армирующих элементов. Составлен алгоритм и код программы расчета методом статистического моделирования. Рассмотрен случай изменения нагрузки и значений приведенных модулей упругости армирующих элементов согласно нормального закона распределения. Представлены результаты имитационного эксперимента для различных уровней нагрузки изменяющейся по случайному закону.

Ключевые слова: композитный материал, растяжение композитного стержня, статистическое моделирование.

Определение распределения нагрузки между армирующими элементами (АЭ) композитного стержня в общем случае представляет собой сложную, статически неопределимую задачу [1]. Дополнительные уравнения отражают особенности геометрических связей, наложенных на деформируемую систему (уравнения перемещений), и составляются исходя из условия «плоских сечений», согласно которому концы АЭ, находящиеся в одной плоскости до приложения нагрузки, остаются в ней и в процессе нагружения. Справедливость этого условия определяется конструкцией композитного стержня, по концам которого установлены жесткие заделки.

Условия равновесия отсеченной части стержня определяются как:

$$N_z = \sum_{i=1}^n N_i; M_x = 0; M_y = 0, \quad (1)$$

где $M_x = \sum_{i=1}^n N_i y_i$; $M_y = \sum_{i=1}^n N_i x_i$; – усилие в i -м АЭ; x_i, y_i – координаты i -го АЭ.

Усилие в i -м АЭ композитного стержня определяется соотношением $N_i = E_i^* A_i \varepsilon_i$, где $E_i^*, A_i, \varepsilon_i$ – приведенный модуль упругости при растяжении, площадь поперечного сечения АЭ и относительная деформация нити. Параметры АЭ, приведенные выше, а также предел текучести материала являются варьируемыми факторами.

Относительные деформации АЭ в общем случае деформирования композитного стержня из геометрических соображений определяются как:

$$\varepsilon_i = (\Delta_0 + \gamma_x y_i + \gamma_y x_i) / l_0,$$

где $\Delta_0, \gamma_x, \gamma_y$ – осевые и угловые деформации композитного стержня; l_0 – длина композитного стержня.

Таким образом, система уравнений (1) имеет три неизвестных параметра $\Delta_0, \gamma_x, \gamma_y$, определение которых и является решением статически неопределимой задачи для композитного стержня на каждом шаге расчета.

В общем случае параметры E_i^* , A_i , а также механические характеристики материала, являются случайными варьируемыми факторами, изменяющимися в установленных пределах и подчиняющимися определенному закону распределения, а их моделирование обеспечивается с использованием генератора случайных чисел, степень нормальности которого контролируется с использованием критерия Пирсона [2 – 4].

Исследование напряженно-деформированного состояния композитного стержня. Принимаем, что растягивающее усилие является детерминированной величиной и изменяется дискретно по j уровням

$$N_j = k_j \sum_{i=1}^n \sigma_{ek} A_i,$$

где σ_{ek} , A_i – предел текучести материала и площадь поперечного сечения i -го АЭ; k_j – коэффициент запаса по нагрузке j -го уровня.

Диаграмма упруго-пластического деформирования АЭ в координатах σ, ε , представлена на рис. 1. На каждом расчетном цикле, соответствующем различной нагрузке, для i -го АЭ проверяется условие $\sigma_i \geq \sigma_{ek}$, где σ_i – напряжения в i -м АЭ. Справедливость этого соотношения определяет приближенную картину напряженно-деформированного состояния АЭ при их деформировании за пределами упругости. При этом нелинейный участок 1 диаграммы σ, ε , аппроксимируется линейным участком 2. Такая аппроксимация, с некоторым допущением, характеризует упруго-пластическое деформирование (без упрочнения) АЭ. По результатам статистического моделирования строятся гистограммы и определяется изменение напряжений за пределом текучести при упруго-пластическом деформировании АЭ для различных уровней детерминированной нагрузки.

Расчетная модель, составленная по рассмотренному алгоритму, в виде блок-схемы и код программы на языке Fortran представлены в работе [2]. На рис. 2, а) и 2, б), представлены результаты расчетов.

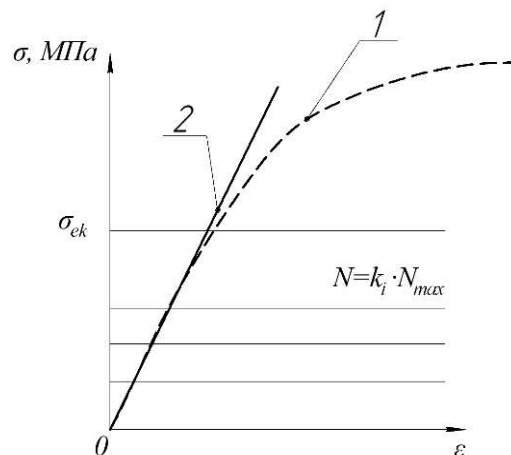


Рис. 1. Диаграмма зависимости напряжения от относительного удлинения при упруго-пластических деформациях АЭ:
1 – нелинейный участок; 2 – линейный участок

Проведя анализ полученных данных можно установить, что коэффициент запаса по нагрузке k_j , с некоторым допущением учитывает степень упрочнение АЭ, $k_y = \frac{\sigma}{\sigma_{ek}}$. Получим: $k_y = \frac{\sigma}{\sigma_{ek}} = \frac{264}{240} = 1,1$.

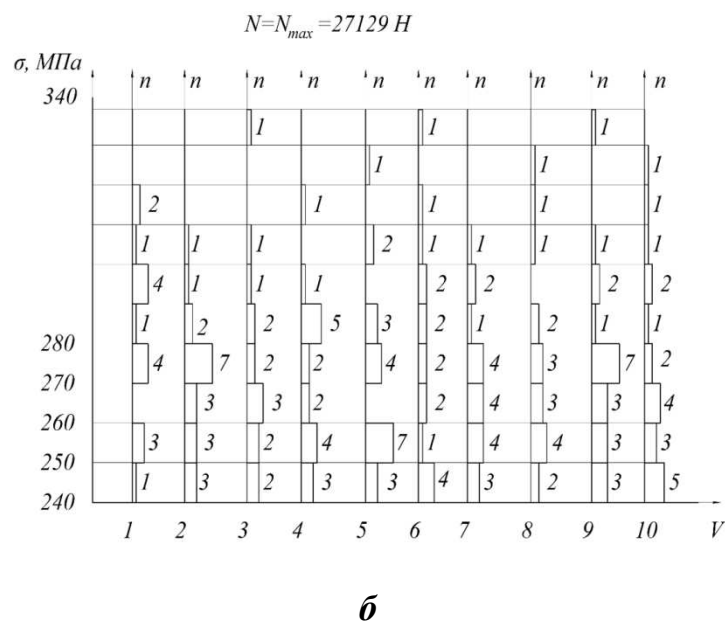
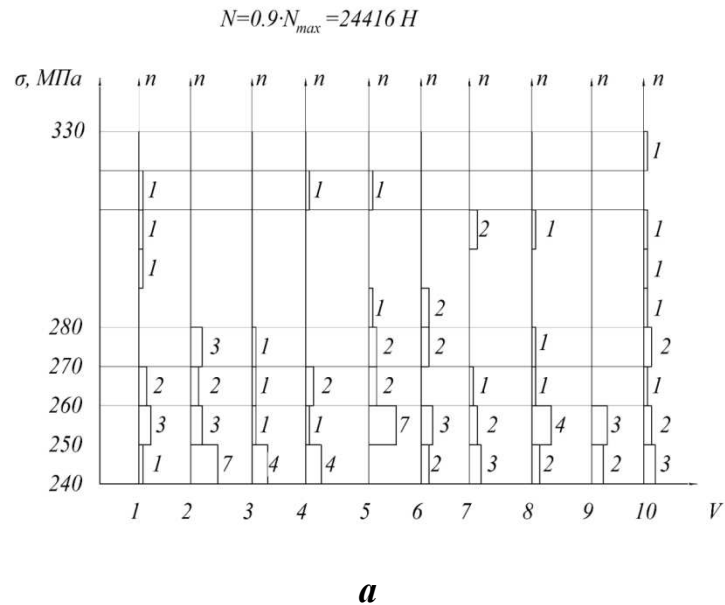


Рис. 2. Распределение количества отказов композитного стержня в зависимости от выборки модулей упругости его АЭ:
а – при нагрузке $N = 24416 \text{ Н}$; б – при нагрузке $N = 27129 \text{ Н}$;
 σ – уровень напряжений превышающих предел текучести;
 V – номер выборки модулей упругости; n – число армирующих элементов, в которых напряжения превысили допустимый предел текучести на соответствующем уровне

Определение живучести растянутого композитного стержня. Принимаем, что растягивающее усилие N_z является случайной нормально-распределенной величиной с математическим ожиданием β -го уровня

$$N_{z\beta}. \text{ Здесь } \beta = \frac{N_{z\beta}}{\sigma_{ek} \sum_{i=1}^n A_i}, \text{ где } n - \text{ количество АЭ в композитном стержне.}$$

На каждом расчетном цикле i , выбирается случайное среднее значение $\bar{N}_{z\beta i}$ и для каждого j -го АЭ проверяется условие $\sigma_j \geq k_y \cdot \sigma_{ek}$.

Условие прочности, для АЭ в рассматриваемой модели, определяется из условия его хрупкого разрушения [5].

Справедливость (несправедливость) соотношения $\sigma_j \geq k_y \cdot \sigma_{ek}$ устанавливает факт разрушения (не разрушения) j -го АЭ. В случае если на расчетном цикле i установлено, что $\sigma_{j=k} \geq k_y \sigma_{ek}$, то на цикле $i+1$ расчет композитного стержня повторяется без изменения параметра β для $\bar{N}_{z\beta}$ при условии $E_j = 0$.

Отказ по условию прочности композитного стержня определяется условием разрушения всех АЭ, а количество циклов расчета определяет его живучесть.

Характерный вид теоретической зависимости разрушения растянутого композитного стержня приведен на рис. 3.

По результатам статистического моделирования определено распределение количества циклов до полного разрушения композитного стержня в зависимости от коэффициента упрочнения материала его АЭ (см. таблицу). При этом реализуется модель классического пучка, согласно которой при разрушении одного элемента нагрузка передается на элементы, которые находятся в одном пучке с отказавшим и так до момента полного разрушения пучка.

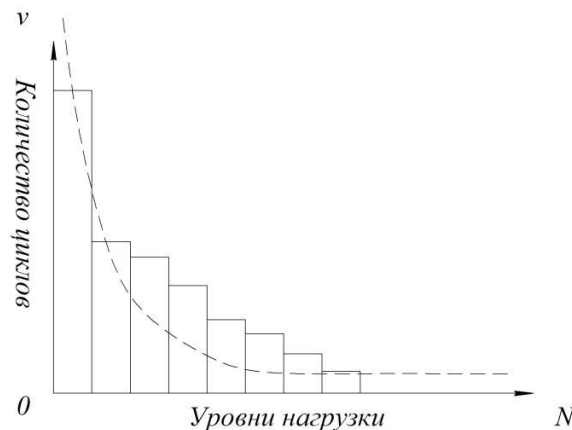


Рис. 3. График зависимости полного разрушения от уровня нагрузки (теоретический)

**Изменения живучести G растянутого композитного стержня
от величины коэффициента упрочнения, k_y**

k_y	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6
G , циклы	12	20	23	150	328	570

Исследование влияния эффекта упрочнения армирующих элементов композитного стержня. Учет влияния эффекта упрочнения материала предполагает использование теории пластичности. Решение задач теории пластичности связано с решением системы нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных, что представляет собой чрезвычайно сложную задачу, которая в аналитическом виде решается, как правило, в исключительных случаях. Поэтому решение задачи теории пластичности чаще всего строится с помощью приближенных методов.

Использование коэффициента допускаемой перегрузки. Упрочнение АЭ определяется диаграммой его напряженно-деформированного состояния при растяжении. В случае композитного стержня, для учета эффекта упрочнения в первом приближении, нами вводится коэффициент допускаемой перегрузки, определяемый как отношение максимальных напряжений к пределу текучести материала АЭ $k = \sigma_{\max} / \sigma_T$. На рис. 4 представлены результаты исследований. На оси абсцисс указаны интервалы количества циклов (V), полученных при разрушении стержней, на оси ординат – количество стержней (n), отказавших при уровне нагрузки в соответствующих интервалах.

Растягивающая нагрузка на стержне N подчиняется случайному закону и варьируется от $N = 0,1 \cdot N_{\max}$, до $N = N_{\max}$, где $N_{\max}$ – максимальная величина, которая определяется как $N_{\max} = n \cdot \sigma_{ek} \cdot A_e$, где n – количество АЭ в стержне, A_e – площадь АЭ. Модуль упругости стержней изменяется по случайному закону, что и определяет случайный характер изменения их прочности.

Из рассмотрения графиков, приведенных на рис. 4, видно, что с увеличением растягивающей нагрузки количество циклов, требуемых для полного разрушения стержня, уменьшается, а с повышением коэффициента допускаемой перегрузки, количество безотказных циклов растет.

Полученные зависимости частоты отказов стержней имеют распределение близкое к нормальному закону, что характерно для наработки на отказ элементов в металлоконструкциях. Поэтому можно предположить, что предлагаемая математическая модель является справедливой для расчета статистических характеристик прочности композитных стержней и определения их надежности.

Остаточные напряжения в армирующих элементах композитного стержня. Согласно теоремы о разгрузке, для определения напряжений и деформаций, остающихся в упруго-пластической системе после снятия нагрузки, нужно вычесть из действительных напряжений и деформа-

ций, соответствующих данной нагрузке, величины напряжений и деформаций, вычисленные для той же нагрузки в предположении об упругом деформировании всех ее элементов. Геометрическая интерпретация этой теоремы представлена на рис. 5.

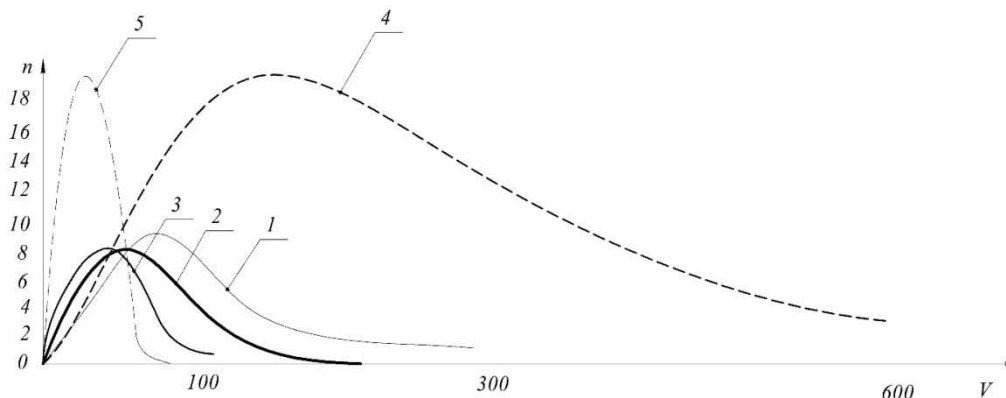


Рис. 4. Распределение отказов стержней в зависимости от уровня нагрузки: 1, 2, 3 – коэффициент допускаемой перегрузки $k=1,1$, значения растягивающей нагрузки соответственно $\bar{N}=0,5 \cdot N_{\max}$, $\bar{N}=0,6 \cdot N_{\max}$, $\bar{N}=0,7 \cdot N_{\max}$; 4, 5 – коэффициент допускаемой перегрузки $k=1,3$, значения растягивающей нагрузки соответственно $\bar{N}=0,6 \cdot N_{\max}$, $\bar{N}=0,7 \cdot N_{\max}$

Такое поведение упруго-пластической системы, состоящей из АЭ, подобно поведению образца из упрочняющегося упругопластического материала. Отличие заключается в том, что для стержневой системы, содержащей конечное число АЭ, эта диаграмма будет ломаной. При этом, моделирование упрочняющегося композитного стержня может быть выполнено набором упруго-пластических АЭ, вынужденных деформироваться совместно.

Применение установленного правила позволяет определить распределение остаточных напряжений между АЭ композитного стержня после разгрузки.

Статистическая прочность армирующих элементов композитного стержня. Ее влияние обусловлено учетом силового взаимодействия матрицы композитного стержня с его АЭ. При этом предполагается, что АЭ содержат различные дефекты (поверхностные, внутренние), случайным образом распределенные по их длине. Если бы АЭ не были связаны матрицей, в композите реализовалась бы модель «слабейшего звена» и обрыв АЭ приводил бы к его утрате в качестве несущего элемента композитного стержня. Однако в случае взаимодействия АЭ с матрицей, на некотором расстоянии вдоль АЭ от места обрыва, называемом эффективной длиной L_e , напряжение в «разорванном» АЭ выравнивается практически до

среднего значения неразорванных АЭ. Таким образом, АЭ вне этого участка ведет себя как неразорванный. При этом, около места разрыва АЭ нагрузка перераспределяется на соседние АЭ, так как маловероятно попадание в одно поперечное композитного стержня нескольких дефектов одновременно.

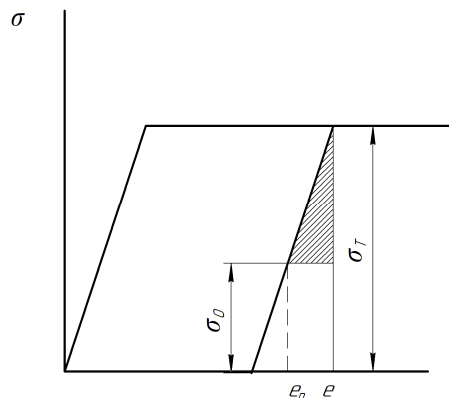


Рис. 5. Диаграмма упруго-пластических деформаций при разгрузке стержня

Продольную прочность однонаправленного композита определяют по линейному правилу смесей: где $\sigma_c = z\sigma_f\psi_f + \sigma_m(1 - \psi_f)$, где σ_f, σ_m – прочности АЭ и матрицы, определенные в экспериментах на достаточно длинных образцах; ψ_f – объемная доля АЭ; z – коэффициент реализации прочности АЭ.

Рассмотренный механизм разрушения АЭ, учитывающий их взаимодействия с матрицей композитного стержня, указывает на возможность оценивания прочности композитного стержня по прочности пучка АЭ эффективной длины. При этом, предлагаемая имитационная модель позволяет установить степень влияния среднего значения и дисперсии статистической прочности АЭ на показатели несущей способности композитного стержня. Так, согласно результатов экспериментальных исследования, однородная прочность АЭ по длине не всегда является предпочтительной [6].

Представленные исследования имитационной модели растянутого композитного стержня позволяют сделать вывод о возможности ее использования в качестве математической модели для различных механизмов разрушения композитного стержня при значительном количестве варьируемых параметров.

Список литературы

1. Фудзии Т., Дзако М. Механика разрушения композиционных материалов: Пер. с японск. М.: Мир, 1982. 232 с.
2. Заярный С.Л., Мокин Д.Г., Раевский В.А., Витчук П.В. Имитационная модель для определения живучести растянутого композитного стержня // Известия Тульского государственного университета. Технические науки, 2017. Вып. 7. С. 49-57.

3. Анцев В.Ю., Толоконников А.С., Горынин А.Д. Статистическая модель эксплуатационных воздействий на пролетное строение мостового крана // *Механизация строительства*, 2016. Т. 77. № 8. С. 13-16.

4. Горынин А.Д., Анцев В.Ю., Толоконников А.С. Методика анализа риска отказа мостового крана на базе статистического моделирования нестационарного нагружения // *Материалы Международной научно-технической конференции «Интерстроймех-2015»* / отв. редактор Р.Л. Сахапов. Казань, Изд-во казанск. гос. архитект.-строит. ун-та, 2015. С. 62-67.

5. Селиванов В.В. Механика разрушения деформируемого тела; прикладная механика сплошных сред: учебник для втузов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. 420 с.

6. Полилов А.Н. Экспериментальная механика композитов: учеб. пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2015. 375 с.

Заярный Сергей Леонидович, канд. техн. наук, texnakon@yandex.ru, Россия, Калуга, Калужский филиал Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет),

Логвинов Александр Андреевич, студент, Paradoksme@yandex.ru, Россия, Калуга, Калужский филиал Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет),

Грачев Георгий Юрьевич, студент, goshangrachev@gmail.com, Россия, Калуга, Калужский филиал Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)

INVESTIGATION OF THE IMITATION MODEL OF THE STROKED COMPOSITE ROD

S.L. Zajarnyj, A.A. Logvinov, G.J. Grachev

The simulation model of a stretched composite rod under the condition of brittle fracture of reinforcing elements is considered. The algorithm and the code of calculation program by the method of statistical modeling are made. The case of variation of load and values of reduced elastic modules of reinforcing elements according to the normal distribution law is considered. The results of a simulation expert Advisor for different levels of load varying according to a random law are presented.

Key words: composite material, tension rod, statistical process-mechanical modeling.

Zajarnyj Sergej Leonidovich, candidate of technical sciences, texnakon@yandex.ru, Russia, Kaluga, Bauman Moscow State Technical University Kaluga Branch,

Logvinov Aleksandr Andreevich, student, Paradoksme@yandex.ru, Russia, Kaluga, Bauman Moscow State Technical University Kaluga Branch,

Grachev Georgij Jur'evich, student, goshangrachev@gmail.com, Russia, Kaluga, Bauman Moscow State Technical University Kaluga Branch

ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ МОДЕРНИЗИРОВАННОГО ВЫРЕЗАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА ЩЕБНЕОЧИСТИТЕЛЬНЫХ МАШИН

Н.Г. Гринчар, П.А. Сорокин, М.Ю. Чалова, Д.С. Федасов

В статье представлены теоретические обоснования эффективности модернизации скребково-цепного рабочего органа щебнеочистительных машин. Приведен вариант исполнения предлагаемой модернизации, а также оценка вариативности конструктивных параметров роликовой опоры лопатки вырезающего устройства.

Ключевые слова: щебнеочистительные машины, баровая цепь, мощность вырезающего устройства, скребок, роликовая опора.

Существующие высокопроизводительные щебнеочистительные машины и комплексы оснащены баровым вырезающим устройством [1]. При работе щебнеочистительных машин основные нагрузки возникают в зоне вырезки балласта и в рабочем желобе вырезающего устройства.

Традиционное баровое вырезающее устройство представляет собой цепь, имеющую звенья со скребками, соединенные посредством шарниров. Силы трения скольжения, возникающие в зоне вырезки и перемещению балласта по желобу, отрицательно влияют на мощностной баланс машины, ведут к большим энергетическим потерям [1].

С целью избежания этого явления было предложено следующее техническое решение: в подошвах скребков вырезающего устройства установить опорные ролики (рис.1). Таким образом, перемещение лопатки по щебню осуществляется не волочением, а перекатыванием опорного ролика [2].

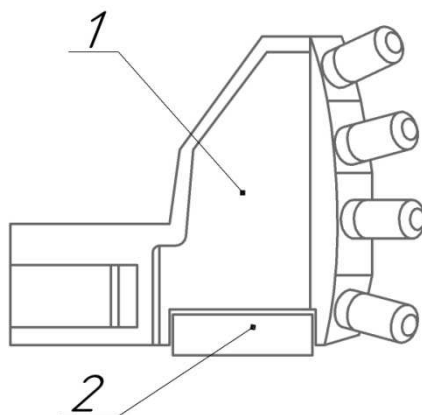


**Рис. 1. Лопатка модернизированного вырезающего устройства:
1 – скребок; 2 – опорный ролик**

Мощность на звездочке привода барового рабочего органа щебнеочистительной машины до модернизации; кВт:

$$N_{зв} = \frac{B}{\eta_{скр}} \left(k_1 k_\beta k_2 h V_M + 0,5 \rho g f_2 B h V_M k_p + \frac{f_1 G_{ц} V_{ц}}{L_{ц}} + \rho g L_{ж} (\sin \alpha_{ж} + f_1 \cos \alpha_{ж}) h V_M k_p + \frac{2 f_1^2 G_{ц} L_{ж} \cos \alpha_{ж} V_{ц}}{L_{ц} B} \right) + \frac{\rho f_1^2 G_{ц} L_{ж} \cos \alpha_{ж} V_{ц}}{\eta_{скр}} (H_{ж} g + V_{ц}^2) \quad (1)$$

Мощность на звездочке привода барового рабочего органа щебнеочистительной машины после модернизации, кВт:

$$N_{зв} = \frac{B}{\eta_{скр}} \left(k_1 k_\beta k_2 h V_M + 0,5 \rho g f_2 B h V_M k_p + \frac{k_k G_{ц} V_{ц}}{R L_{ц}} + \rho g L_{ж} \sin \alpha_{ж} h V_M k_p \right) + \frac{\rho B h V_M k_p}{\eta_{скр}} (H_{ж} g + V_{ц}^2) \quad (2)$$

где: k_1 – расчетное удельное сопротивление балласта резанию; k_β – коэффициент, учитывающий угол резания; k_2 – коэффициент разрыхления щебня в шпальных ящиках; k_p – коэффициент разрыхления загрязненного щебня; k_k – коэффициент трения качения для пары «асфальт-сталь»; R – радиус опорного ролика; f_1 – коэффициент трения стали по балласту; f_2 – коэффициент трения балласта по балласту; ρ – плотность разрыхленного балласта; g – ускорение свободного падения; $\eta_{скр}$ – КПД скребкового рабочего органа; $H_{ж}$ – высота подъема вырезанного щебня по желобу; $L_{ж}$ – длина рабочего желоба; $G_{ц}$ – сила тяжести цепи; $L_{ц}$ – общая длина цепи; $S_{скр}$ – площадь скребка; $\alpha_{ж}$ – угол наклона желоба в рабочем режиме; B – ширина вырезки щебня; h – толщина вырезаемого щебня.

Как видим, во втором случае коэффициент трения скольжения заменяется коэффициентом трения качения (см. формулы 1-2).

Сравним результаты скорости движения машины и скорости цепи на мощность на звездочке вырезающего устройства на примере щебнеочистительного комплекса ЩОМ-1200.

Рабочий диапазон скоростей движения щебнеочистительных машин типа ЩОМ-1200 лежит в диапазоне 0,06 м/с до 6 м/с.

Рабочий диапазон скоростей движения вырезающей цепи машин типа ЩОМ-1200 лежит в диапазоне 1,8 м/с до 3,8 м/с.

Зависимость мощности от скорости машины и скорости вырезающей цепи носит линейный характер. Как видно из графика (рис.1,2) увеличение скорости цепи отрицательно влияет на энергоемкость процесса по сравнению с возрастанием скорости машины при постоянной скорости цепи.

Как следует из рис. 2б максимальная мощность 339,5 кВт достигается при значениях скорости движения машины 0,177 м/с и скорости модернизированного вырезающего устройства 4 м/с, значения мощности при аналогичных скоростях машины и цепи мощность традиционного вырезающего устройства составляет 436,7 кВт (рис. 2, а).

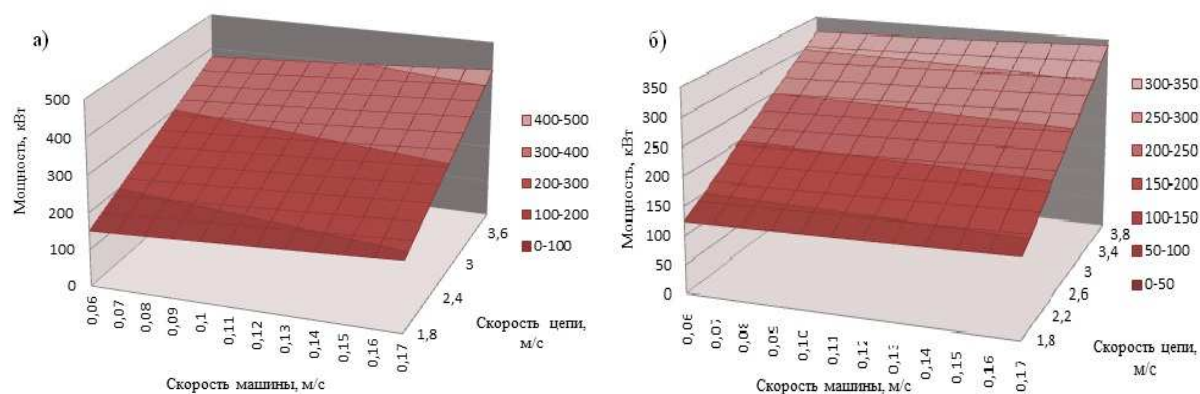


Рис. 2. Зависимость затрат мощности ($V=3,9$ м $h=0,4$ м) при вырезке балласта: а – традиционным вырезающим устройством; б – модернизированным вырезающим устройством

На мощность привода вырезающей цепи помимо скорости машины и скорости цепи также влияют радиус опорного ролика и коэффициент трения качения. При $\vartheta_m = \vartheta_c$ диаметр опорного ролика изменяется в пределах от 12 до 56 мм, коэффициент трения качения $k_p = 2,5 - 8$ мм. График зависимости представлен на рис.3 и носит нелинейный характер.

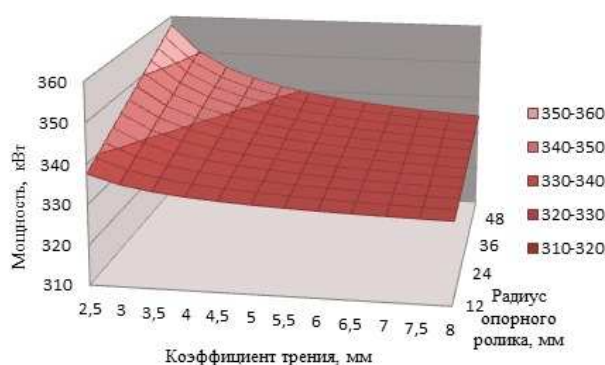


Рис. 3. График влияния вариативности

Исходя из графика влияния вариативности (рис.4) оценим изменение мощности при максимальных и минимальных значениях радиуса роликовой опоры скребка (рис. 4).



Рис. 4. Изменение разницы максимума и минимума потребляемой мощности в зависимости от конструктивных параметров роликовой опоры

Максимальная разница 20 кВт (рис. 4) получаются при минимальном радиусе роликовой опоры.

Несмотря на то, что при расчетах диапазон изменения радиуса опорного ролика более чем в 3,5 раза, процентные изменения мощности в самых негативных вариантах составили 6,5 %. Такой результат можно считать удовлетворительным[3].

Список литературы

1. Путевые машины: учебник / М.В. Попович, В.М. Бугаенко, Б.Г. Волковойнов и др.; под общ.ред. М.В. Попович, В.М. Бугаенко. М.: ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2009. 820 с.
2. Патент №178588 РФ Вырезающее устройство щебнеочистительной машины / Н.Г. Гринчар, М.Ю. Чалова, Д.С. Федасов. Оpubл. 11.04.2018. Бюл. №11.
3. Ковальский В.Ф., Федасов Д.С., Чалова М.Ю. Модернизация скребково-цепного устройства щебнеочистительных машин // Мир транспорта, 2016. № 4. С. 70-77.
4. Ковальский В.Ф. Системный анализ и синтез статических и динамических параметров гидрообъемного привода скребковой цепи щебнеочистительных машин: дис. д-ра техн. наук. М., 2005. 240 с.
5. Чалова М.Ю. Совершенствование метода расчета параметров скребково-цепного исполнительного устройства щебнеочистительных машин нового поколения: дис. канд. техн. наук. М., 2015. 144 с.

Гринчар Николай Григорьевич, д-р техн. наук, доц., проф., nggrin@yandex.ru, Россия, Москва, Российский университет транспорта (МИИТ),

Сорокин Павел Алексеевич, д-р техн. наук, проф., pavalsor@rambler.ru, Россия, Москва, Российский университет транспорта (МИИТ),

Чалова Маргарита Юрьевна, канд. техн. наук, доц., margarita_chalova@mail.ru, Россия, Москва, Российский университет транспорта (МИИТ),

Федасов Дмитрий Сергеевич, асп., fedasovds@gmail.com, Россия, Москва, Российский университет транспорта (МИИТ)

INFLUENCE OF DESIGN DATA ON POWER INDICATORS THE UPGRADED CUTTING-OUT DEVICE SHCHEBNEOCHISTITELNY CARS

N.G. Grinchar, P.A. Sorokin, M.Yu. Chalova, D.S. Fedasov

The article presents theoretical grounds for the effective modernization of the scraper-chain working organ of crushed-stone machines. The variant of execution of the proposed modernization is given, as well as an assessment of the variability of the design parameters of the roller support of the scraper blade.

Key words: crushing machine, bar chain, cutting device power, scraper, roller support.

Grinchar Nikolay Grigorievich, doctor of technical sciences, professor, nggrin@yandex.ru, Russia, Moscow, Russian university of transport (MIIT),

Sorokin Pavel Alekseevich, doctor of technical sciences, professor, paval-sor@rambler.ru, Russia, Moscow, Russian university of transport (MIIT),

Chalova Margarita Yurievna, candidate of technical sciences, docent, margari-ta_chalova@mail.ru, Russia, Moscow, Russian university of transport (MIIT),

Fedasov Dmitriy Sergeevich, postgraduate fedasovds@gmail.com, Russia, Moscow, Russian university of transport (MIIT)

УДК 621.941.01

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКИ СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ КОРПУСА БЛОКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Е.Н. Родионова, И.А. Матвеев

В статье приведены данные статистического анализа точности механической обработки корпуса блока системы управления. Показана методика контроля погрешностей размеров обрабатываемых поверхностей деталей. Установлено, что все параметры с запасом точности укладывается в допуски, заданные конструкторской документацией. Сделан вывод о высокой стабильности технологического процесса токарной обработки заготовки, полученной отрезкой из горячекатаной толстостенной трубы.

Ключевые слова: токарная обработка, погрешности точения, статистический анализ, точностная надежность.

Важнейшей задачей, стоящей перед оборонной промышленностью, является освоение и выпуск новых видов вооружения, обладающих высокими качествами, усовершенствованными боевыми характеристиками, а также конкурентоспособностью на внешнем рынке. К таким изделиям относится РСЗО «Торнадо-С», выпускающиеся на предприятии АО «НПО «СПЛАВ». Одной из ответственных корпусных деталей изделия является «Корпус блока системы управления».

В современном машиностроении для повышения эксплуатационных характеристик подобных изделий и снижения их материалоемкости используют тонкостенные корпуса из высокопрочной сложнелегированной стали, изготавливаемые с применением комплексной технологии при комбинировании обработки резанием и давлением [1-4]. В этих случаях

наследственные погрешности заготовок в некоторой степени переносятся на готовые детали [5, 6]. При этом на точность собранного изделия решающее влияние оказывают погрешности формы и относительного положения исполнительных и базовых поверхностей корпусных деталей [7, 8].

В крупногабаритных изделиях стальные детали, по возможности, заменяют на детали из легких сплавов, обладающих повышенной прочностью [9]. Так для изготовления корпуса блока систем управления РСЗО «Торнадо-С» исходной заготовкой является горячекатаная толстостенная труба с размерами 310×55 мм из материала АМг6 по ОСТ 1 92048-90.

Технологический процесс изготовления данной детали разработан для условий серийного производства, включает в себя прогрессивное оборудование с программным управлением (ПУ).

Так токарные операции с ПУ: 025, 035, 055, 065 выполняются на токарном обрабатывающем центре Hardinge GS250MSY. Заготовка устанавливается в патроне в разжим и базируется по торцу *A* и резьбе М290×4-8g. На рис. 1 представлен операционный эскиз с указанием контролируемых размеров.

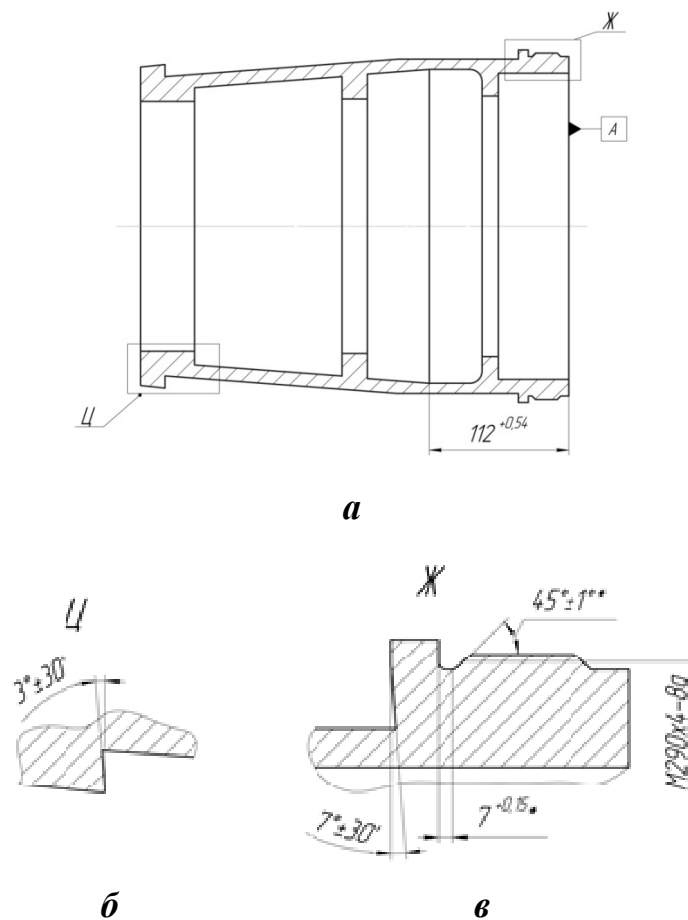


Рис. 1. Операционные эскизы на токарную операцию с ПУ № 055:
а – требования к внутреннему профилю; б – требования к наружной поверхности; в – требования к резьбовой канавке

В эксперименте, проведенном в реальных производственных условиях, была обработана партия деталей, для которой были проведены статистические исследования точности параметров, представленные в таблице. Ниже приведены данные, контролируемых параметров на первых деталях при настройке токарной операции с ПУ № 055.

Измерение размера $112^{+0,54}$ производилось на мобильной координатно-измерительной машине Faro Prime 6, размеры $7^{\circ} \pm 30'$ и $3^{\circ} \pm 30'$ контролировались с помощью угломера с нониусом типа 3, размеры $45^{\circ} \pm 1^{\circ}$ и $7^{+0,15}$ контролировались на проекторе БП.

Применение универсальной измерительной оснастки, универсальных средства измерения и координатно-измерительной машины позволяет проводить замеры фактических значений проверяемых величин [10, 11, 12].

Фактические значения исследуемых параметров партии деталей после операции 055

№ п/п	P-p $112^{+0,54}$	P-p $45^{\circ} \pm 1^{\circ}$	P-p $7^{\circ} \pm 30'$	P-p $7^{+0,15}$	P-p $3^{\circ} \pm 30'$
1	112,00	45°	7°	7,10	$3^{\circ} 05'$
2	112,00	45°	7°	7,10	$2^{\circ} 50'$
3	112,30	45°	$6^{\circ} 50'$	7,00	$2^{\circ} 50'$
4	112,30	45°	$6^{\circ} 55'$	7,00	$2^{\circ} 50'$
5	112,48	45°	$6^{\circ} 40'$	7,00	$3^{\circ} 10'$
6	112,00	45°	7°	7,10	3°
7	112,20	45°	7°	7,00	3°
8	112,10	45°	7°	7,00	3°
9	112,40	45°	$6^{\circ} 55'$	7,00	$3^{\circ} 10'$

На основании данных таблицы построена кривая распределения для размера $112^{+0,54}$, показывающая, что замеренный показатель подчиняется закону распределения значений Релея (рис. 2).

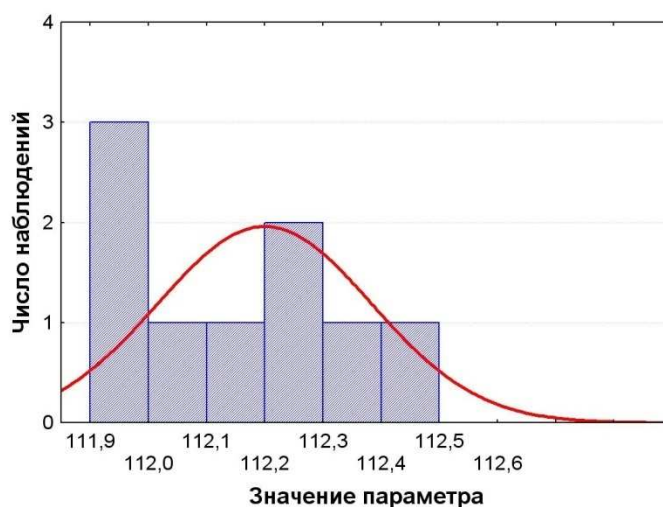


Рис. 2. Кривая распределения значений размера $112^{+0,54}$

При этом точность размеров обрабатываемой детали или отдельных ее участков зависит от точности размеров и формы применяемого режущего инструмента. Ширина канавки, обрабатываемой резцом, получится равной требуемой лишь при условии, что длина режущей кромки резца соответствует ширине канавки. Очевидна также и зависимость точности размера детали от точности установки резца в рабочее положение. Существенное значение имеет износ режущего инструмента в процессе его работы.

Результатом проведенной работы является анализ исходного технологического процесса изготовления корпуса блока системы управления РСЗО «Торнадо-С», показывающий, что данная деталь является одной из важных составляющих изделия.

Проведенный статистический анализ точности токарной обработки детали корпус показывает, что технологический процесс налажен и имеет высокую точностную надежность. Параметры, заложенные в технологическом процессе, выполнены в пределах допусков, однако возникают трудности при сборке с ответной деталью, что дает возможность для проведения дальнейших исследований.

Список литературы

1. Трегубов В.И., Ямников А.С., Матвеев И.А. Технологическое обеспечение заданных конструктивных параметров деталей двигателя РСЗО «ТОРНАДО-Г» // Известия РАН, 2017. № 4 (99). С. 94-98.
2. Матвеев И.А., Ямников А.С. Исследование параметров точности тонкостенных протяженных осесимметричных деталей при комбинировании обработки резанием и давлением // СТИН, 2018. № 3-2018. С. 20-21.
3. Матвеев И.А., Ямников А.С., Ямникова О.А. Влияние технологии изготовления секций полых осесимметричных корпусов на биение базовых торцов // Технология машиностроения, 2017. № 12-2017. С. 37-41.
4. Чуприков А.О., Ямников А.С. Повышение точности токарной обработки путем минимизации деформационных погрешностей // Проблемы и достижения в науке и технике: сб. научных трудов по итогам международной научно-практической конференции. Инновационный центр развития образования и науки. Омск, 2014. С. 15-17.
5. Матвеев И.А., Ямников А.С., Ямникова О.А. Корреляционная связь размеров базового отверстия протяженных деталей до и после ротационной вытяжки // Справочник. Инженерный журнал, 2017. №7. С. 3-7.
6. Матвеев И.А., Ямников А.С., Ямникова О.А. Статистический анализ точности предварительной токарной обработки трубной заготовки // Известия Тульского государственного университета. Технические науки, 2015. Вып. 11. Ч. 1. С. 111-120.
7. Ямников А.С., Борискин О.И., Ямникова О.А., Матвеев И.А. Технологическое наследование свойств исходной заготовки в параметрах точности протяженных осесимметричных деталей // Черные металлы, 2017. №12-2017. С. 50-56.

8. Матвеев И.А., Ямников А.С., Ямникова О.А. Влияние погрешностей базовой детали на погрешности сборки протяженных осесимметричных корпусов // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2018. Том 19. № 2. С. 59-63.

9. Ямников А.С., Ямникова О.А., Матвеев И.А., Родионова Е.Н. Влияние погрешностей положения стыковых поверхностей сборного осесимметричного корпуса на погрешность положения исполнительных поверхностей // Вестник Брянского государственного технического университета № 7 (60) 2017. С. 13-17.

10. Марочник сталей и сплавов / А.С. Зубченко. М.: Машиностроение, 2001. 672 с.

11. РД 50-98-86 Методические указания. Выбор универсальных средств измерений линейных размеров. М.: Изд-во стандартов, 1987. 83 с.

12. V.V. Semin, A.I. Geilikman, A.S. Yamnikov and V.M. Fomenkov. Measurement of the Internal Buttress-Thread Mean Diameter with a Horizontal Optimeter // Measurement Techniques. 1980. P. 301-303.

Родионова Елена Николаевна, асп., masik-ele@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Матвеев Иван Александрович, асп., ivan_matveev@list.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

STUDY PRECISION TURNING MACHINING GEOMETRICALLY-COMPLEX SURFACES OF THE HOUSING OF THE CONTROL UNIT

E.N. Rodionova, I.A. Matveev

The article presents the data of statistical analysis of the accuracy of mechanical processing of the control unit. The technique of control of errors of the sizes of the processed surfaces of details is shown. It is established that all parameters with a reserve of accuracy keep within the tolerances set by design documentation. The conclusion about the high stability of the technological process of turning the workpiece obtained from a sharp hot-rolled thick-walled pipe is made.

Key words: turning, turning errors, statistical analysis, precision reliability.

Rodionova Elena Nikolaevna, postgraduate, masik-ele@yandex.ru, Russia, Tula, Tula state University,

Matveev Ivan Aleksandrovich, postgraduate, ivan_matveev@list.ru, Russia, Tula, Tula state University

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СПЕЧЕННЫЕ ПСЕВДО- α -ТИТАНОВЫЕ СПЛАВЫ

А.В. Ляхов, В.Н. Гадалов, И.А. Макарова, Е.А. Ельников, Р.Ю. Ерохин,
А.Е. Гвоздев, С.Н. Кутепов, О.В. Пантюхин

На основании анализа работы специзделия и его конструктивных особенностей, а также исследования двойных и более сложных композиций разработан порошковый конструкционный материал на основе титана. Спеченный сплав обладает повышенным комплексом физико-механических свойств за счет введения легирующих компонентов и удовлетворительными служебными характеристиками, обусловленными выбором соответствующей термической обработки (ТЦО). Показано, что в результате ТЦО, а именно многократных $\alpha \leftrightarrow \beta$ -переходов в спеченном титановом сплаве Ti_2Al_2Mo образуется стабильная полигонизованная структура, при этом имеет место повышение усталостной прочности псевдо- α спеченных титановых сплавов.

Ключевые слова: титановый сплав, порошковый материал, термоциклическая обработка.

Высокий уровень рационального синтеза материалов с заданными свойствами достигнут в практике создания материалов специальной техники. Важнейшей предпосылкой к осуществлению синтеза материалов с наперед заданными свойствами является наличие достаточно гибкой и универсальной по возможности технологической схемы их производства. Этим требованиям в наибольшей мере удовлетворяет порошковая металлургия. Только с материалами и средствами порошковой металлургии существует возможность объединить в одном изделии требуемого строения любые вещества и материалы независимо от их природы и природы их взаимодействия с таким расчетом, чтобы их оптимальным сочетанием в готовом изделии реализовать требуемый комплекс свойств.

Как известно, основную роль в улучшении эксплуатационных свойств при высоких температурах играет не столько концентрация дислокаций, сколько устойчивость их конфигураций, то есть, образование упорядоченных полигонизованных дислокационных структур. Традиционные методы получения полигонизованных структур, включающие комбинации малых пластических деформаций и нагрева мало применимы для порошковых изделий. Поэтому особый интерес представляет возможность получения стабильной полигонизованной субструктуры, образующейся в результате лишь термической обработки за счет относительно небольших внутренних напряжений, возникающих, в кратных фазовых превращениях. Титан и его сплавы по своей природе обладают особенно благоприятными возможностями реализации процесса полигонизации при полиморфном превращении. В этой связи одним из наиболее перспективных путей по-

вышения механических свойств компактных титановых сплавов является термическая обработка, включающая многократные фазовые переходы – термоциклическая обработка (ТЦО) [1]. Принципиальная возможность применения этого вида термической обработки для получения полигонизованной структуры в α титане показана в работах [2-4].

Цель настоящей работы – подтвердить возможность получения полигонизованной структуры в спеченных титановых сплавах, оценить целесообразность использования ТЦО, частично или полностью включающий интервал $\alpha \leftrightarrow \beta$ превращения.

Для уменьшения пористости порошкового титанового сплава Ti_2Al_2Mo была проведена дополнительная ТЦО в вакууме в окрестности температуры полиморфного превращения. Установлено увеличение относительной плотности спеченного сплава с (90...92) до (96...97) %, обусловленное сглаживанием и залечиванием пор за счет активизации диффузионных процессов. При этом термоциклическая обработка не только повышает на 15...20 % прочностные и пластические свойства спеченных титановых сплавов, но существенно увеличивает предел выносливости до 30...35 %. Термоциклическая обработка оказывает значительное влияние на распределение легирующих компонентов и примесей в окрестностях пор, что влияет на ряд других свойств, в частности технологических. Для раскрытия природы превращений, протекающих в спеченных титановых сплавах при ТЦО, были проведены исследования дислокационной структуры.

Однако для определения оптимальных режимов получения устойчивых полигонизованных структур в спеченных α – псевдо сплавах на основе титана необходимо провести комплексное исследование с привлечением тонких методов (электронная микроскопия, внутреннее трение и др.) для изучения механизма образования стабильной субзеренной структуры в условиях ТЦО.

В лабораторных условиях ТЦО осуществлялась на установке ИМАШ-20-75 «АЛАТОО» прямым пропусканием тока через ненагруженный образец в вакууме 1×10^{-4} мм рт. столба остаточного давления. Скорость нагрева изменялась от 3...5 °C/с, охлаждения от 1...3 °C/с, соответственно, безизотермических выдержек при минимальной (800 °C) и максимальной (1000 °C) температурах. Длительность одного цикла изменялась в интервале 100...250 сек.

При ТЦО в интервале полного полиморфного превращения, пластины α – фазы разбиваются разветвленной сетью субграниц на субзерна шириной 1...1,5 мкм и длиной 20...25 мкм. Это доказывает, что в процессе полигонизации при ТЦО определяющую роль играет фазовый наклеп, повышение подвижности дефектов и другие факторы, возникающие в спеченном титане именно при полиморфном превращении.

Для изучения влияния числа циклов на степень совершенства образующейся субструктуры, были проведены исследования изменения тонкой структуры спеченного сплава Ti_2Al_2Mo после разного числа циклов: 1, 2, 4, 6, 8, 10, 20, 40.

Анализ тонкой структуры (рис. 1, а) после двух-четырех циклов $\alpha \leftrightarrow \beta$ показывает, что процесс полигонизации только начинается. Электронно-микроскопическими исследованиями выявлено (рис. 1, а), что только отдельные пластины α – фазы разбиты на субзерна единичными относительно короткими субграницами. После 6 циклов образующиеся субзерна еще не полностью замкнуты и лишь после (8...10) циклов субграницы образуют густую, весьма совершенную сеть. Субструктура после 20 и 40 циклов качественно однотипна со структурой возникающей после 10 циклов (рис. 1, б-г).

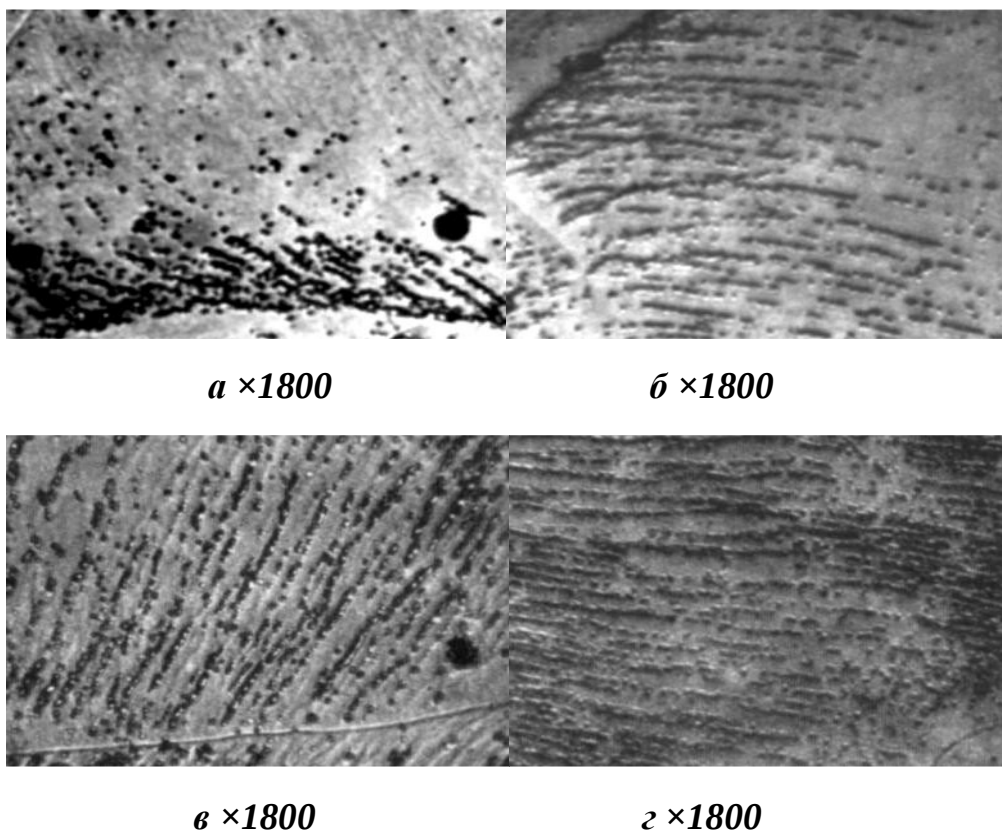


Рис. 1. Влияние числа циклов ТЦО на степень совершенства субструктуры спеченного титанового сплава Ti_2Al_2Mo : а – 4; б – 6; в – 8; г – 10

Исследования разориентации субзерен – одного из факторов, определяющих стабильность полигонизованной структуры показало, что углы разориентации субзерен имеют величину от 50 минут до (2,5...3) градусов. Это хорошо согласуется с результатами, полученными на компактных образцах микрорентгеновским методом (2...4) градуса, и позволяет сделать вывод, что после ТЦО практически все границы в пачках α – пластин являются малоугловыми, которые, как известно, достаточно стабильны.

Металлографическими исследованиями установлено, что после 6 циклов ТЦО образуется пластинчатая структура типа корзиночного плетения с низкой пористостью, не превышающей 2 %. После 10 циклов ТЦО (рис. 1, г) остаточная пористость минимальна (не более 1 %), а изменения микроструктуры незначительны.

Исследования, проведенные с помощью электронной микроскопии, показали, что дополнительная стабилизация полигонизованной структуры спеченного титанового псевдо-а-сплава происходит непосредственно в процессе ее образования при ТЦО в результате взаимодействия дислокаций с примесями (рис. 2-4).

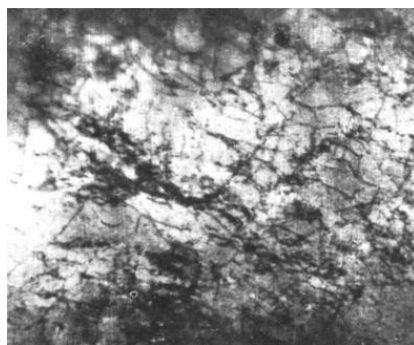


Рис. 2. Скопления примесей на дислокациях в процессе ТЦО спеченного титанового сплава Ti_2Al_2Mo ($\times 40000$)

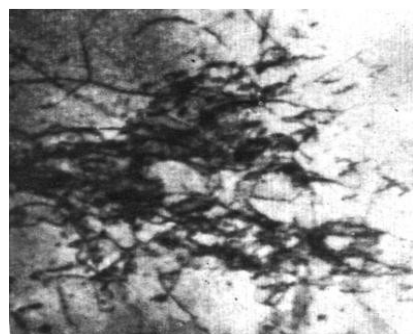


Рис. 3. Взаимодействие дислокаций с примесями в условиях ТЦО спеченного титанового сплава Ti_2Al_2Mo (клубковая структура $\times 60000$)

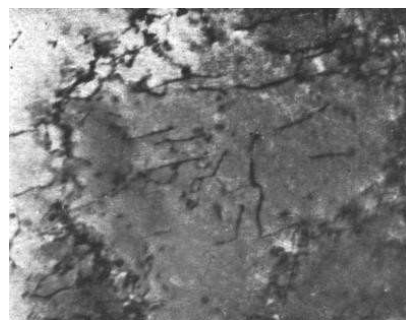


Рис. 4. Образование сегрегаций атомов в области сплетения дислокаций в условиях ТЦО спеченного титанового сплава Ti_2Al_2Mo (ячеистая структура $\times 40000$)

Взаимодействие примесей с дислокациями, образование их скоплений на них приводит к более равномерному их распределению в объеме, что повышает однородность спеченного материала.

Исследованиями амплитудно-зависимого внутреннего трения спеченного сплава Ti_2Al_2Mo установлено уменьшение $tg\alpha = DQ^{-1}/De$, в 1,5...1,7 раза после ТЦО, что говорит о закреплении дислокационной структуры.

Таким образом, для обеспечения высокого сопротивления росту усталостной трещины необходимо создание дислокационных структур ячеистого или полигонального типа на пути движения трещины. При этом реализуется бороздчатый рельеф на поверхности трещины в стадии стабильного роста.

На основании результатов проведенных исследований и их анализа сделаны следующие выводы:

1. Установлено, что пористость заготовок порошкового сплава в пределах исследуемых факторов понижается с увеличением степени деформации, а понижение температуры заготовки (брикета), температуры штампа и времени нагрева повышает пористость порошкового изделия.

2. В результате термоциклической обработки, а именно многократных $\alpha \leftrightarrow \beta$ переходов в спеченном титановом сплаве Ti_2Al_2Mo образуется стабильная полигонизованная структура, при этом имеет место повышение усталостной прочности псевдо – α спеченных титановых сплавов.

3. Для получения порошковых деталей из титановых сплавов, работающих при небольших удельных нагрузках, целесообразно применять холодное прессование с последующим спеканием. Для высоко нагруженных деталей, которые должны иметь близкую к теоретической плотность ($4,54 \text{ г/см}^3$) при наименьшем содержании кислорода и азота следует использовать различные виды горячего прессования заготовок в защитной среде аргона или вакууме.

Полученные результаты могут быть использованы при создании ресурсосберегающих технологий процессов обработки материалов с новыми нанокпозиционными смазками и покрытиями [5-18].

Работа выполнена по проекту 11.6682.2017/8.9.

Список литературы

1. Болдырев Ю.В., Гадалов В.Н., Павлов Е.В. Исследование режимов термоциклического деформирования и термообработки псевдо- α -сплавов на основе титана // Медико-экологические информационные технологии – 2004: Сб. матер. VII Междунар. науч.-техн. конф. Курск. Гос. техн. ун-т. Курск, 2004. С. 203-218.

2. А.С. № 571525. Способ термической обработки титановых сплавов / Л.М. Мирский [и др.] // Заявл. 20.06.75. Опубл. 05.09.77. Бюл. № 33.

3. Получение субзеренной структуры в титановом ($\alpha+\beta$)-сплаве в процессе многократного $\alpha+\beta \leftrightarrow \beta$ превращения / С.З. Бокштейн, Л.М. Мирский, Н.П. Зюлина, О.В. Маркович // Известия АН СССР. Металлы, 1976. № 3. С. 118-123.

4. Термоциклическая обработка титановых сплавов / С.З. Бокштейн, Н.П. Зюлина, Л.М. Мирский // Известия АН СССР. Металлы, 1978. № 6. С. 200-203.

5. Вариант определения максимального пластического упрочнения в инструментальных сталях / Г.М. Журавлев, А.Е. Гвоздев, А.Е. Чеглов, Н.Н. Сергеев, О.М. Губанов // Сталь, 2017. № 6. С. 26-39.

6. On friction of metallic materials with consideration for superplasticity phenomenon / A.D. Breki, A.E. Gvozdev, A.G. Kolmakov, N.E. Starikov, D.A. Provotorov, N.N. Sergeyev, D.M. Khonelidze // Inorganic Materials: Applied Research, 2017. T. 8. № 1. С. 126-129.

7. Противоизносные свойства пластичных смазочных композиционных материалов «ЛИТОЛ 24 – частицы гидросиликатов магния» / А.Д. Бреки, В.В. Медведева, Н.А. Крылов, А.Г. Колмаков, Ю.А. Фадин, А.Е. Гвоздев, Н.Н. Сергеев, С.Е. Александров, Д.А. Провоторов // Материаловедение, 2017. № 3. С. 38-42.

8. Многоуровневый подход к проблеме замедленного разрушения высокопрочных конструкционных сталей под действием водорода / В.П. Баранов, А.Е. Гвоздев, А.Г. Колмаков, Н.Н. Сергеев, А.Н. Чуканов // Материаловедение, 2017. № 7. С. 11-22.

9. Применение теории пластичности дилатирующих сред к процессам уплотнения порошков металлических систем / Э.С. Макаров, А.Е. Гвоздев, Г.М. Журавлев, А.Н. Сергеев, И.В. Минаев, А.Д. Бреки, Д.В. Малий // Чебышевский сборник, 2017. Т. 18. Вып. 4. С. 1-17.

10. Гвоздев А.Е., Журавлев Г.М., Сапожников С.В. К теоретическому анализу процесса компактирования порошковых материалов прессованием // Известия Тульского государственного университета. Науки о земле, 2017. Вып. 4. С. 273-283.

11. Механические свойства конструкционных и инструментальных сталей в состоянии предпревращения при термомеханическом воздействии / А.Е. Гвоздев, А.Г. Колмаков, О.В. Кузовлева, Н.Н. Сергеев, И.В. Тихонова // Деформация и разрушение материалов. 2013. № 11. С. 39-42.

12. Особенности протекания процессов разупрочнения при горячей деформации алюминия, меди и их сплавов / А.Е. Гвоздев, А.Г. Колмаков, Д.Н. Боголюбова, Н.Н. Сергеев, И.В. Тихонова, Д.А. Провоторов // Материаловедение, 2014. № 6. С. 48-55.

13. Role of nucleation in the of first-order phase transformations / A.E. Gvozdev, N.N. Sergeyev, I.V. Minayev, A.G. Kolmakov, I.V. Tikhonova // Inorganic Materials: Applied Research, 2015. T. 6. № 4. P. 283-288.

14. Зависимость показателей сверхпластичности труднодеформируемых сталей Р6М5 и 10Р6М5-МП от схемы напряженного состояния / А.Е. Гвоздев, А.Г. Колмаков, Д.А. Провоторов, Н.Н. Сергеев, Д.Н. Боголюбова // Деформация и разрушение материалов, 2015. № 11. С. 42-46.

15. Многопараметрическая оптимизация параметров лазерной резки стальных листов / А.Е. Гвоздев, И.В. Голышев, И.В. Минаев, А.Н. Сергеев, Н.Н. Сергеев, И.В. Тихонова, Д.М. Хонелидзе, А.Г. Колмаков // Материаловедение, 2015. № 2. С. 31-36.

16. Расчет кластерной структуры расплава, ее влияние на образование наноаморфных твердых фаз и их структурную релаксацию при последующем нагреве / М.Х. Шоршоров, А.Е. Гвоздев, А.В. Афанаскин, Е.А. Гвоздев // Металловедение и термическая обработка металлов, 2002. № 6. С. 12-16.

17. Расчет деформационной повреждаемости в процессах обратного выдавливания металлических изделий / А.Е. Гвоздев, Г.М. Журавлев, А.Г. Колмаков, Д.А. Провоторов, Н.Н. Сергеев // Технология металлов, 2016. № 1. С. 23-32.

18. Бреки А.Д., Гвоздев А.Е., Колмаков А.Г. Использование обобщенного треугольника Паскаля для описания колебаний силы трения материалов // Материаловедение, 2016. № 11. С. 3-8.

19. Гетерогенное зарождение графита в углеродистых сталях при распаде цементита в процессе ТЦО вблизи точки A_0 / А.Е. Гвоздев, А.Г. Колмаков, А.В. Маляров, Н.Н. Сергеев, И.В. Тихонова // Материаловедение, 2013. № 10. С. 48 – 52.

20. Условия проявления неустойчивости цементита при термоциклировании углеродистых сталей / А.Е. Гвоздев, А.Г. Колмаков, А.В. Маляров, Н.Н. Сергеев, И.В. Тихонова, М.Е. Пруцков // Материаловедение, 2014. № 10. С. 31 – 36.

21. Гвоздев А.Е., Журавлев Г.М., Колмаков А.Г. Формирование механических свойств углеродистых сталей в процессах вытяжки с утонением // Технология металлов, 2015. № 11. С. 17 – 29.

22. Влияние деформационной повреждаемости на формирование механических свойств малоуглеродистых сталей / Г.М. Журавлев, А.Е. Гвоздев, Н.Н. Сергеев, Д.А. Провоторов // Производство проката, 2015. № 12. С. 9 – 13.

23. Постановка задачи расчета деформационной повреждаемости металлов и сплавов / Г.М. Журавлев, А.Е. Гвоздев, Н.Н. Сергеев, В.И. Золотухин, Д.А. Провоторов // Производство проката, 2015. № 10. С. 18 – 26.

24. Роль процесса зародышеобразования в развитии некоторых фазовых переходов второго рода / А.Е. Гвоздев, Н.Н. Сергеев, И.В. Минаев, И.В. Тихонова, А.Г. Колмаков // Материаловедение, 2015. № 1. С. 15 – 21.

25. Распределение температур и структура в зоне термического влияния для стальных листов после лазерной резки / А.Е. Гвоздев, Н.Н. Сергеев, И.В. Минаев, А.Г. Колмаков, И.В. Тихонова, А.Н. Сергеев, Д.А. Провоторов, Д.М. Хонелидзе, Д.В. Малий, И.В. Голышев // Материаловедение, 2016. № 9. С. 3 – 7.

Ляхов Андрей Владимирович, канд. техн. наук, заместитель директора, lyakhov.andrei@yandex.ru, Россия, Курск, ОБПОУ «Курский электромеханический техникум»,

Гадалов Владимир Николаевич, д-р техн. наук, проф., gadalov-vn@yandex.ru, Россия, Курск, Юго-Западный государственный университет,

Макарова Ирина Александровна, асп., makarova.mia@yandex.ru, Россия, Курск, Юго-Западный государственный университет,

Ельников Евгений Александрович, асп., jamyar@yandex.ru, Россия, Курск, Юго-Западный государственный университет,

Ерохин Роман Юрьевич, асп., Don_filius@mail.ru, Россия, Курск, Юго-Западный государственный университет,

Гвоздев Александр Евгеньевич д-р техн. наук, проф., gwozdew.alexandr2013@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого,

Кутепов Сергей Николаевич, канд. пед. наук, kutepov.sergei@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого,

Пантюхин Олег Викторович, канд. техн. наук, доц., gwozdew.alexandr2013@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

STUDY OF THE INFLUENCE OF THERMOCYCLIC TREATMENT ON THE SINTERED PSEUDO- α -TITANIUM ALLOYS

A.V. Lyakhov, V.N. Gadalov, I.A. Makarova, E.A. Elnikov, R.Yu. Erokhin, A.E. Gvozdev, S.N. Kutepov, O.V. Pantyukhin

Based on the analysis of the work of special products and its design features, as well as the study of double and more complex compositions developed powder-based structural material based on titanium. Sintered alloy has an increased complex of physical and mechanical properties due to the introduction of alloying components and satisfactory performance due to the choice of appropriate heat treatment (TCO). It is shown that as a result of TP, namely multiple $\alpha \leftrightarrow \beta$ – transitions in sintered titanium alloy Ti_2Al_2Mo , a stable polygonized structure is formed, while the fatigue strength of pseudo-sintered titanium alloys is increased.

Key words: titanium alloy, powder material, thermocyclic treatment.

Lyakhov Andrey Vladimirovich, candidate of technical science, deputy director, lyakhov.andrei@yandex.ru, Russia, Kursk, Kursk Electromechanical College,

Gadalov Vladimir Nikolaevich, doctor of technical science, professor, gadalov-vn@yandex.ru, Russia, Kursk, Southwest State University,

Makarova Irina Aleksandrovna, postgraduate, makarova.mia@yandex.ru, Russia, Kursk, Southwestern State University,

Yelnikov Yevgeny Aleksandrovich, postgraduate, jamyar@yandex.ru, Russia, Kursk, Southwestern State University,

Erokhin Roman Yur'yevich, postgraduate, Don_filius@mail.ru, Russia, Kursk, Southwestern State University,

Gvozdev Aleksandr Evgen'yevich, doctor of technical science, professor, gvozdev.alexandr2013@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University,

Kutepov Sergey Nikolaevich, candidate of pedagogical science, kutepov.sergei@mail.ru, Russia, Tula, Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University,

Pantjuhin Oleg Viktorovich, candidate of technical science, docent, gvozdev.alexandr2013@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 536.21

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА ПРИ ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЯХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

В.Ф. Формалев, С.А. Колесник, Е.Л. Кузнецова

В работе моделируется тепломассоперенос в композиционных материалах (КМ) при высоких температурах (>600 К) в условиях фазовых превращений связующих КМ с образованием пористого коксового остатка и пиролизных газов, фильтрующихся через пористый остаток. Разработана математическая модель и метод аналитического решения по определению температурного поля в обеих фазах, разделяемых подвижной границей фазовых превращений. Для определения координат и скорости подвижной границы выведено трансцендентное уравнение на основе аналитических решений задач теплопроводности в обеих фазах. Получены и проанализированы результаты аналитического решения.

Ключевые слова: температурное поле, фазовые превращения, зона пиролиза, фильтрация, пористый остаток, пиролизные газы.

Композиционные материалы (КМ) активно используются в качестве теплозащитных и конструкционных. Теплозащитные КМ поглощают большое количество тепловой энергии от аэродинамического нагрева в результате следующих физико-химических процессов, происходящих в КМ

при высоких температурах: эндотермических реакций разложения (пиролиза) связующих с образованием пористого остатка и пиролизных газов, фильтрующихся через пористый остаток; конвективного охлаждения пористого остатка при фильтрации пиролизных газов; вдува пиролизных газов в высокотемпературный пограничный слой и тем самым уменьшения тепловых потоков к наружной границе; возможного уноса массы с наружной границы под действием сил трения в вязком газодинамическом течении.

Решение подобных задач должно сопровождаться определением скорости и координат подвижных границ фазовых превращений из баланса тепловых потоков на этих границах, которые определяются из предварительно определенных температурных полей в обеих фазах (т.е. решить задачу типа Стефана).

Аналогичные задачи решались в [1–12], однако в большинстве из них скорость движения границ фазовых превращений задавалась, а не определялась из теплового состояния КМ.

В данной работе поставлена и аналитически решена задача тепло-массопереноса в теплозащитных КМ при высоких температурах, когда на наружной границе задан изменяющийся во времени тепловой поток с учетом нестационарно подвижной зоны разложения связующих КМ, с определением стационарной фильтрации пиролизных газов и вдува их в высокотемпературный газодинамический пограничный слой. При этом моделирование осуществлено в условиях, когда координаты и скорость движения зоны пиролиза заранее не известны, а определяются из баланса тепловых потоков в зоне пиролиза по определенным ранее температурным полям в обеих фазах.

Постановка задачи

При формировании математической модели тепло-массопереноса в композиционных материалах (КМ) в условиях высокотемпературного нагружения делаются следующие допущения:

- зона фазовых превращений (пиролиза), ограниченная температурами начала T_n и окончания T_k фазовых превращений, возникает сразу после приложения теплового потока $q_w(t)$ к наружной границе. При этом температуру T^* фазовых превращений можно принять как среднее арифметическое температур T_i и T_k ;

- массовая скорость образования газа в подвижной зоне фазовых превращений определяет массовую скорость стационарной фильтрации в пористом остатке;

- скорость движения зоны разложения связующего КМ равна скорости движения границы, разделяющей фазы 1 и 2, которая определяется по балансу тепловых потоков на подвижной границе.

С учетом этих допущений комплексная физико-математическая модель представляется следующими соотношениями:

- баланс тепловых потоков на наружной границе $x=0$ фазы 2 с учетом вдува пиролизных газов

$$-\lambda_2 \frac{\partial T_2(x, 0)}{\partial x} = q_w \cdot \exp\left[-(\rho v c_p)_\Gamma^2 t / 4a_2\right] - (\rho v c_p)_\Gamma T_2(0, t), \quad x = 0, \quad t > 0; \quad (1)$$

- уравнение теплопроводности в пористой фазе 2 с учетом фильтрации

$$\frac{\partial T_2}{\partial t} = a_2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} - \frac{(\rho v c_p)_\Gamma}{c_2 \rho_2} \frac{\partial T_2}{\partial x}, \quad 0 < x < x^*(t), \quad t > 0; \quad (2)$$

- температура подвижной границы $x^*(t)$ фазовых превращений, разделяющей фазы 2 и 1

$$T_2(x^*(t) - 0, t) = T_1(x^*(t) + 0, t) = T^* = \text{const}, \quad x = x^*(t), \quad t > 0; \quad (3)$$

- уравнение теплопроводности в незатронутой фазовыми превращениями в фазе 1

$$\frac{\partial T_1}{\partial t} = a_1 \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2}, \quad x^*(t) < x < \infty, \quad t > 0; \quad (4)$$

$$T_1(\infty, t) = T_0, \quad x \rightarrow \infty, \quad t > 0; \quad (5)$$

$$T_1(x, 0) = T_0, \quad 0 \leq x \leq \infty, \quad t = 0; \quad (6)$$

- на подвижной границе $x = x^*(t)$ фазовых превращений задается баланс тепловых потоков с учетом массовой скорости $\dot{m}$ движения этой границы с эндотермическим эффектом Q^*

$$-\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} \Big|_{x=x^*(t)-0} + \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} \Big|_{x=x^*(t)+0} = \dot{m}(t) Q^*, \quad x = x^*(t), \quad t > 0. \quad (7)$$

Здесь введены следующие обозначения: T, T_0 – температура; начальная температура; $\rho_\Gamma, v_\Gamma, c_{p\Gamma}$ – соответственно плотность, линейная скорость фильтрации и теплоемкость при постоянном давлении пиролизных газов; $c_s, \rho_s, \lambda_s, a_s = \lambda_s / c_s \rho_s, s = 1, 2$ – соответственно теплоемкости, плотности, теплопроводности и температуропроводности фаз; q_w – тепловой поток, подводимый к границе $x = 0$ без учета фильтрации.

Индексы: w – граница $x = 0$; $*$ – граница или зона пиролиза; 1, 2 – первоначальная фаза и пористый коксовый остаток; Γ – пиролизный газ; n, k – соответственно начало и окончание физико-химических превращений в зоне пиролиза.

Необходимо аналитически определить следующие характеристики: температурные поля $T_2(x, t), T_1(x, t)$ в фазах 2 и 1 и с их использованием – массовую скорость $\dot{m}(t) = dm/dt$ и линейную скорость $\dot{x}^*$ движения границы $x = x^*(t)$ и ее координату $x^*(t)$, массовую скорость $(\rho v)_\Gamma$ образования пиролизных газов.

Метод решения

Разделив граничное условие (1) на $c_2\rho_2$, введя обозначение $b = (\rho v c_p)_\Gamma / c_2\rho_2$ и сделав замену переменной $T(x, t)$ [4]

$$T(x, t) = u(x, t) \cdot \exp\left(\frac{bx}{2a_2} - \frac{b^2 t}{4a_2}\right), \quad (8)$$

получим следующую задачу (величина $(\rho v c_p)_\Gamma / c_2\rho_2$ на границе $x^*(t)$ и в фазе 1 равна нулю):

$$a_2 \frac{\partial u_2(0, t)}{\partial x} - \frac{b}{2} u_2(0, t) + \frac{q_w}{c_2\rho_2} = 0, \quad x = 0, \quad t > 0; \quad (9)$$

$$\frac{\partial u_2}{\partial t} = a_2 \frac{\partial^2 u_2}{\partial x^2}, \quad 0 < x < x^*(t), \quad t > 0; \quad (10)$$

$$u_2(x^*(t) - 0, t) = T^*, \quad x = x^*(t) - 0, \quad t > 0; \quad (11)$$

$$u_1(x^*(t) + 0, t) = T^*, \quad x = x^*(t) + 0, \quad t > 0; \quad (12)$$

$$\frac{\partial u_1}{\partial t} = a_1 \frac{\partial^2 u_1}{\partial x^2}, \quad x^*(t) < x < \infty, \quad t > 0; \quad (13)$$

$$u_1(\infty, t) = T_0, \quad x \rightarrow \infty, \quad t > 0; \quad (14)$$

$$u_1(x, 0) = T_0, \quad 0 \leq x \leq \infty, \quad t = 0. \quad (15)$$

Условие (7) на границе фазовых превращений $x = x^*(t)$ сохраняется без изменения.

Решением задачи теплопроводности (12)–(15) в исходной фазе 1 является функция [3]

$$u_1(x, t) = A_1 + B_1 \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{a_1 t}}\right), \quad \text{где } \operatorname{erfc}(z) = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-\xi^2} d\xi. \quad (16)$$

Постоянные интегрирования определяются подстановкой выражения (16) в краевые условия (12), (14), получаем ($b = 0$ в области 1):

$$u_1(x, t) = T_1(x, t) = T_0 + (T^* - T_0) \frac{\operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{a_1 t}}\right)}{\operatorname{erfc}\left(\frac{x^*(t)}{2\sqrt{a_1 t}}\right)}, \quad x \in (x^*(t), \infty), \quad t > 0. \quad (17)$$

Аналогично можно показать, что функция

$$u_2(x, t) = A_2 + B_2 \operatorname{erf}\left(\frac{x}{\sqrt{a_2 t}}\right) \quad (18)$$

удовлетворяет уравнению (10) в фазе 2, где $\operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \int_0^z e^{-\xi^2} d\xi$.

Удовлетворяя выражение (18) крайевым условиям (9), (11), получим распределение функции $u_2(x, t)$ в области 2

$$u_2(x, t) = -\frac{q_w}{\vartheta \cdot c_2 \rho_2} \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{a_2 t}}\right) + \left[T^* + \frac{q_w}{\vartheta c_2 \rho_2} \operatorname{erf}\left(\frac{x^*(t)}{2\sqrt{a_2 t}}\right)\right] \frac{1 + \frac{b}{2\vartheta} \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{a_2 t}}\right)}{1 + \frac{b}{2\vartheta} \operatorname{erf}\left(\frac{x^*(t)}{2\sqrt{a_2 t}}\right)},$$

$$x \in (0, x^*(t)), \quad t > 0, \quad \text{где } \vartheta = \frac{a_2}{\sqrt{a_2 \pi t}}. \quad (19)$$

Подставляя (19) в (8), находим распределение температур в фазе 2

$$T_2(x, t) = \left\{ \left[T^* + \frac{q_w}{\vartheta c_2 \rho_2} \operatorname{erf}\left(\frac{x^*(t)}{2\sqrt{a_2 t}}\right) \right] \frac{1 + \frac{b}{2\vartheta} \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{a_2 t}}\right)}{1 + \frac{b}{2\vartheta} \operatorname{erf}\left(\frac{x^*(t)}{2\sqrt{a_2 t}}\right)} - \frac{q_w}{\vartheta c_2 \rho_2} \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{a_2 t}}\right) \right\} \times$$

$$\times \exp\left(\frac{bx}{2a_2} - \frac{b^2 t}{4a_2}\right), \quad x \in (0, x^*(t)), \quad t > 0. \quad (20)$$

Поскольку аргументы функций ошибок $\operatorname{erfc}\left(\frac{x^*(t)}{2\sqrt{a_1 t}}\right)$, $\operatorname{erf}\left(\frac{x^*(t)}{2\sqrt{a_2 t}}\right)$ в решениях (17), (20) должны быть безразмерными, то уместно предположить, что $x^*(t)$ пропорциональна $\sqrt{a_1 t}$ [4]

$$x^*(t) = 2\chi\sqrt{a_1 t}, \quad (21)$$

где коэффициент пропорциональности χ определяется из условия (7) подстановкой в него вместо $T(x, t)$ функций (17), (19), в которых положено $x = x^*(t)$.

Подставляя (17) и (20) в (7), а в полученное выражение – функцию (21) вместо $x^*(t)$, приходим к следующему трансцендентному соотношению относительно χ

$$\chi = \frac{1}{\rho_1 Q^*} \left[\frac{\left(q_w - T^* (c_p \rho v)_{\Gamma} / 2 \right) \sqrt{\frac{a_2}{\pi a_1}} \cdot \exp\left(-\frac{a_1}{a_2} \chi^2\right)}{\frac{v_{\Gamma} \cdot \bar{V}}{\sqrt{\pi}} + \frac{v_{\Gamma}}{2\bar{c}} \operatorname{erf}\left(\chi \sqrt{\frac{a_1}{a_2}}\right)} - \frac{\lambda_1 (T^* - T_0) \exp(-\chi^2)}{\sqrt{\pi} (1 - \operatorname{erf}(\chi))} \right], \quad (22)$$

$$\text{где } \bar{V} = \frac{1}{v_{\Gamma}} \sqrt{\frac{a_2}{t}} = \frac{v_{\Gamma}}{v_{\Gamma}}; \quad \bar{c} = \frac{c_2 \rho_2}{(c_p \rho)_{\Gamma}}.$$

В (22) величина $v_{\Gamma} = \sqrt{\frac{a_2}{t}}$ – скорость температурного фронта [3] в пористой области (ее можно принять как скорость движения фронта с температурой T^*), а отношение $\bar{V} = \frac{v_{\Gamma}}{v_{\Gamma}}$, характеризующее отношение скоро-

сти температурного фронта к скорости фильтрации пиролизных газов, является критерием уменьшения скорости прогрева от скорости фильтрации газов.

Уравнение (22) относительно коэффициента χ решается численно. Остается полученное значение χ подставить в распределения температур (17) и (20), а также в соотношение (21). Находим

$$T_2(x, t) = \left\{ \frac{T^* + \frac{q_w}{\vartheta c_2 \rho_2} \operatorname{erf} \left(\chi \sqrt{\frac{a_1}{a_2}} \right)}{1 + \frac{b}{2\vartheta} \operatorname{erf} \left(\chi \sqrt{\frac{a_1}{a_2}} \right)} \left[1 + \frac{b}{2\vartheta} \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{a_2 t}} \right) \right] - \frac{q_w}{\vartheta c_2 \rho_2} \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{a_2 t}} \right) \right\} \times \\ \times \exp \left(\frac{bx}{2a_2} - \frac{b^2 t}{4a_2} \right), \quad x \in [0; x^*(t)], \quad t > 0, \quad b = (\rho v c_p)_\Gamma / c_2 \rho_2; \quad (23)$$

$$T_1(x, t) = T_0 + (T^* - T_0) \frac{\operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{a_2 t}} \right)}{\operatorname{erfc}(\chi)}, \quad x \in [x^*(t); \infty], \quad t > 0. \quad (24)$$

Массовую скорость фильтрации пиролизных газов $(\rho v)_\Gamma$ определим через массовую скорость фазовых превращений фазы 1, процентное содержание связующего K_q и коксовое число k_c :

$$(\rho v)_\Gamma = m \cdot k_q \cdot (1 - k_c) \cdot \Gamma, \quad (25)$$

где Γ – коэффициент газации КМ. С учетом (25) соотношения (17), (20), (22) и (21) уточняются.

Анализ результатов

Ниже представлены некоторые результаты решения задачи тепло-массопереноса в слоистых композиционных материалах (КМ).

Для расчетов принимались следующие входные характеристики: $\lambda_2 = 1 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$, $\lambda_1 = 0.3; 1 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$, $c_1 = 1500 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$; $c_2 = 1000 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$; $\rho_1 = 2500 \text{ кг/м}^3$; $q_w = 150 \text{ кВт/м}^2$; $Q^* = 1000 \text{ кДж/кг}$; $T_0 = 300 \text{ К}$, $T^* = 800 \text{ К}$; $T_i^* = 700 \text{ К}$; $T_k^* = 900 \text{ К}$.

На рис. 1, 2 представлены распределения температур в обеих фазах в зависимости от времени и значений теплопроводности λ_1 в первоначальном КМ (область 1). На рисунках четко выделяются границы $x = x^*(t)$ при температуре фазовых превращений T^* , на которой наблюдается разрыв тепловых потоков на величину теплоты $\dot{m}Q^*$ фазовых превращений.

Из рисунков видна существенная зависимость от теплопроводности λ_1 не только температурного распределения в обеих фазах, но и скорости движения границы фазовых превращений. С ростом величины λ_1 при одних и тех же тепловых потоках q_w наблюдается уменьшение температур на наружной границе и в обеих фазах, а также замедление скорости движения границы фазовых превращений, что объясняется значительным оттоком теплоты внутрь КМ.

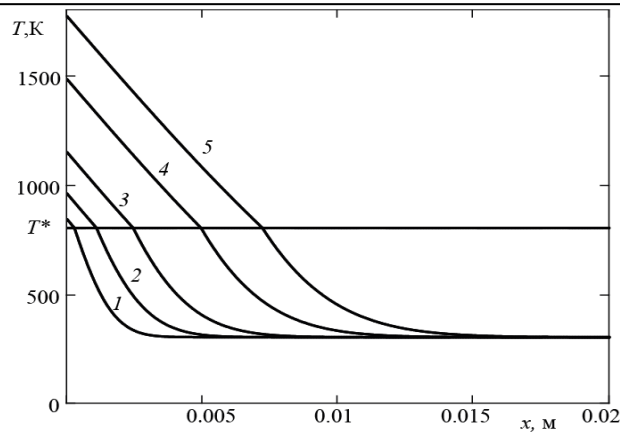


Рис. 1. Изменение температуры $T(x,t)$ в обеих фазах при температуре фазовых превращений $T^* = 800\text{K}$ и $\lambda_1 = 0.3 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$: 1 – $t = 10\text{с}$; 2 – 25с ; 3 – 50с ; 4 – 100с ; 5 – 150с .

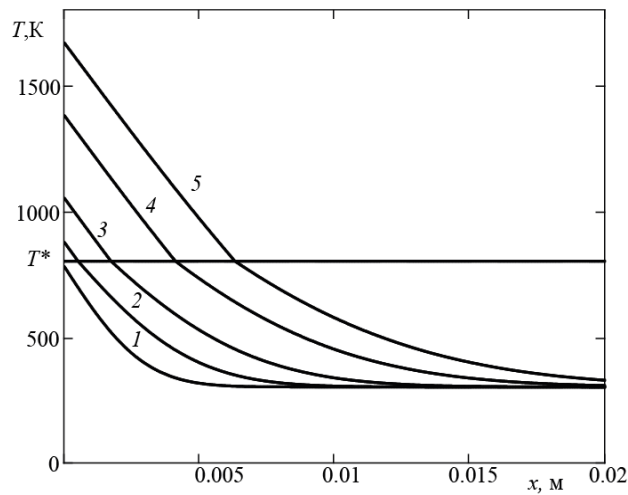


Рис. 2. Изменение температуры $T(x,t)$ в обеих фазах при температуре фазовых превращений $T^* = 800\text{K}$ и $\lambda_1 = 1 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ 1 – $t = 10\text{с}$; 2 – 25с ; 3 – 50с ; 4 – 100с ; 5 – 150с .

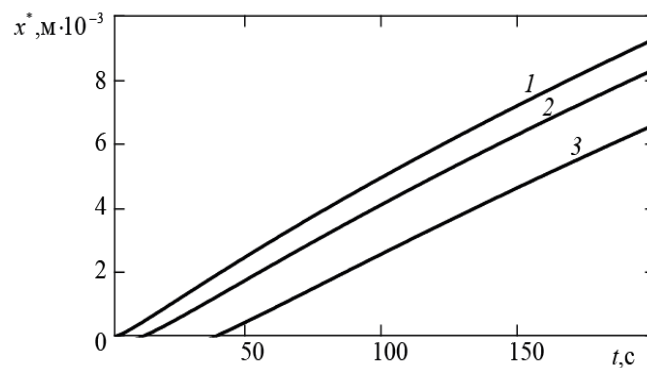


Рис. 3. Зависимость координат границы фазовых превращений $x^*(t)$ с изменением теплопроводности исходной фазы λ_1 : 1 – $\lambda_1 = 0.3 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$; 2 – $1 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$; 3 – $3 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$.

На рис.3 приведены зависимости от времени координат границы фазовых превращений при параметрическом изменении теплопроводности исходной фазы $\lambda_1 = 0.3$ Вт/(м·К) – кривая 1, $\lambda_1 = 1.0$ Вт/(м·К) – кривая 2, $\lambda_1 = 3$ Вт/(м·К) – кривая 3. Рисунок демонстрирует примерно линейную зависимость координаты подвижной границы фазовых превращений, причем она очень чувствительна к балансу тепловых потоков на подвижной границе вследствие сильного изменения теплопроводности в фазе 1, то есть уменьшение теплопроводности λ_1 в десять раз может повлечь увеличение координаты подвижной границы от 1.5 раз при больших временах ($t = 200c$) до примерно в 10 раз при малых временах ($t = 50c$).

Заключение

Разработан метод аналитического решения задачи о тепловом состоянии композиционных материалов (КМ) в условиях высокотемпературного нагружения с учетом фазовых превращений и нестационарного движения зоны разложения связующих КМ. Выведено трансцендентное соотношение для определения скорости и координат нестационарного движения границы фазовых превращений с образованием двух фаз – фазы пористого остатка и фазы, незатронутой разложением связующего КМ. Полученные результаты показывают существенную зависимость теплового состояния теплозащитных КМ от изменения теплопроводности материала исходной фазы.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ (18-01-00444 А, 18-01-00446 А, 17-01-00587 А), грантов Президента РФ (МД-398.2017.8 и МД-1250.2018.8).

Список литературы

1. Карташов Э.М. Аналитические методы решения краевых задач нестационарной теплопроводности в областях с движущимися границами // Изв. РАН. Энергетика, 1999. № 5. С. 3–34.
2. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. М.: Наука, 1964. 488с.
3. Лыков А.В. Тепломассообмен: справочник. М.: Энергия, 1978. 480 с.
4. Формалев В.Ф., Колесник С.А., Кузнецова Е.Л. Нестационарный теплоперенос в анизотропном полупространстве в условиях теплообмена с окружающей средой, имеющей заданную температуру // Теплофизика высоких температур, 2016. Т. 54. № 6. С. 876-882 .
5. Формалев В.Ф., Колесник С.А. Аналитическое исследование теплопереноса в анизотропной полосе при задании тепловых потоков на границах // Инженерно-физический журнал, 2016. Т. 89. № 4. С. 973–982.

6. Колесник С.А., Формалев В.Ф., Селин И.А. Математическая модель и программный комплекс сопряженного теплообмена между вязкими газодинамическими течениями и охлаждаемыми лопатками газовых турбин // Труды МАИ, 2015. № 80.

7. Формалев В.Ф., Колесник С.А. Об обратных граничных задачах теплопроводности по восстановлению тепловых потоков к анизотропным телам с нелинейными характеристиками теплопереноса // Теплофизика высоких температур, 2017. Т. 55. № 4. С. 564-569.

8. Колесник С.А. Идентификация компонентов тензора теплопроводности анизотропных композиционных материалов // Механика композиционных материалов и конструкций, 2012. Т. 18. № 1. С. 111-120.

9. Колесник С.А. Метод идентификации нелинейных компонентов тензора теплопроводности анизотропных материалов // Математическое моделирование, 2014. Т. 26. № 2. С. 119-132.

10. Формалев В.Ф., Колесник С.А., Селин И.А. О сопряженном теплообмене при аэродинамическом нагреве анизотропных тел с высокой степенью анизотропии // Тепловые процессы в технике, 2016. Т. 8. № 9. С. 388-394.

11. Формалев В.Ф., Колесник С.А. Аналитическое исследование теплового состояния анизотропной пластины при наличии теплообмена на свободных границах // Математическое моделирование, 2003. Т. 15. № 6. С. 107-110.

12. Формалев В.Ф., Колесник С.А., Чипашвили А.А. Аналитическое исследование теплопереноса при плёночном охлаждении тел // Теплофизика высоких температур, 2006. Т. 44. № 1. С. 107-112.

Формалев Владимир Федорович, д-р физ.-мат. наук, проф., formalev38@mail.ru, Россия, Москва, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет).

Колесник Сергей Александрович, д-р физ.-мат. наук, доц., sergey@oviont.com, Россия, Москва, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет).

Кузнецова Екатерина Львовна, д-р физ.-мат. наук, доц., lareyna@mail.ru, Россия, Москва, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет).

MATHEMATICAL MODELING OF THERMAL-ASSISTANCE IN PHASE
TRANSFORMATIONS OF COMPOSITE MATERIALS AT HIGH TEMPERATURES

V.F. Formalev, S.A. Kolesnik, E.L.Kuznetsova

Heat and mass transfer in composite materials (CM) at high temperatures (> 600 K) is simulated in the conditions of phase transformations of KM binders with the formation of a porous coke residue and pyrolysis gases filtered through a porous residue. A mathematical

model and a method of analytical solution for determining the temperature field in both phases, separated by a mobile boundary of phase transformations, are developed. To determine the coordinates and velocity of the moving boundary, a transcendental equation is derived on the basis of analytical solutions of the heat conduction problems in both phases. The results of the analytical solution are obtained and analyzed.

Key words: temperature field, phase transformations, pyrolysis zone, filtration, porous residue, pyrolysis gases.

Formalev Vladimir Fedorovich, doctor of physical and mathematical sciences, professor, formalev38@mail.ru, Russia, Moscow, Moscow Aviation Institute (National Research University),

Kolesnik Sergey Aleksandrovich, doctor of physical and mathematical sciences, docent, segey@oviont.com, Russia, Moscow, Moscow Aviation Institute (National Research University),

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

УДК 669.017

СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ ПРИ ОТПУСКЕ НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ БЕЙНИТНОЙ СТАЛИ

Н.В. Мельниченко, Н.И. Парфёнов, Д.И. Кошелев

Рассматривается структурообразование при отпуске бейнитной стали.

Ключевые слова: структура зернистой морфологии, остаточный аустенит, механические свойства.

Низкоуглеродистые низколегированные стали (ННС) широко применяются в машиностроении. После термической обработки [1, 2] и проведения сварочных работ [3, 4] изделия из ННС подвергаются отпуску при температуре до 400 °С или выше 600 °С.

При средней скорости охлаждения 1-7 °С/с при распаде аустенита по диффузионному механизму образуется структура зернистой морфологии (СЗМ) - локальные микрообъёмы легированного аустенита с повышенным содержанием углерода [5, 6]. Очевидно, что она формируется вокруг карбидов тугоплавких легирующих элементов и блокируется, по видимому, дислокационными петлями высокой плотности.

Изделия со СЗМ в процессе производства и эксплуатации могут подвергаться повторному нагреванию. При этом, СЗМ может распадаться, что приведёт к изменению механических свойств.

Цель работы – исследовать влияние температуры нагрева на СЗМ и свойства стали 05Г2МФБ.

Методы исследования: термический, дюраметрический и металлографический.

Материалы. Образцы 15 x 15 x 15 вырезались из плиты стали 05Г2МФБ. В образцах для термического анализа сверлились отверстия до центра для зачеканивания термопары.

Химический состав стали: 0,057 % C; 1,77 Mn; 0,30 % Cu; 0,22 % Si; 0,22 % Ni; 0,10 % Mo; 0,07 % Cr; 0,056 % Nb; 0,030 % V; 0,027 % Ti; 0,0044 % S; 0,014 P %.

Оборудование и приборы. Термическую обработку проводили в модернизированных электрических печах СНОЛ и СШОЛ (фирмы МИУС). Твёрдость измеряли на твердомере ТК-2М, микроструктура оценивалась на металлографических микроскопах Neofot, температурные изменения образцов при термической обработке измеряли приборами фирмы ОВЕН, с использованием компьютерных программ, АЦП и термопар ПП и ХА.

Результаты исследования.

Образцы подвергали нормализации, закалке на СЗМ при ускоренном непрерывном охлаждении и последующему отпуску с кратным повышением температуры до 800 °С. Твёрдость после закалки составляла HRB 92...94.

При нагревании образцов изменения в структуре стали происходят при температуре выше 250 °С (рис. 1). Существенные изменения протекают в температурном диапазоне от 350 до 500 °С.

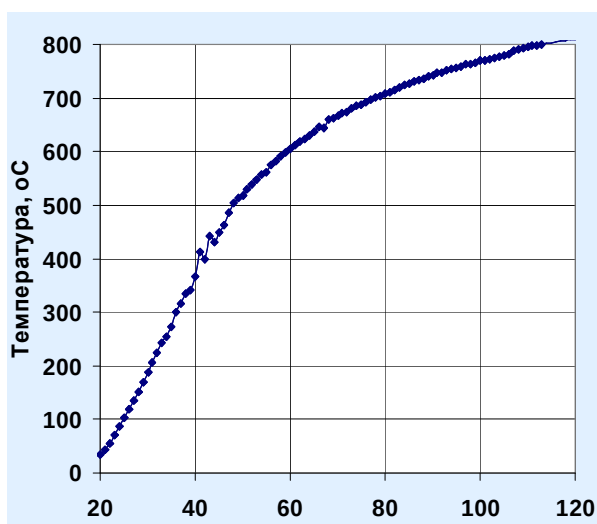


Рис. 1. Кривая нагрева стали 05Г2МФБ

Изменение твёрдости после различных температур повторного нагрева образцов (отпуска) со СЗМ отражено на графике (рис. 2).

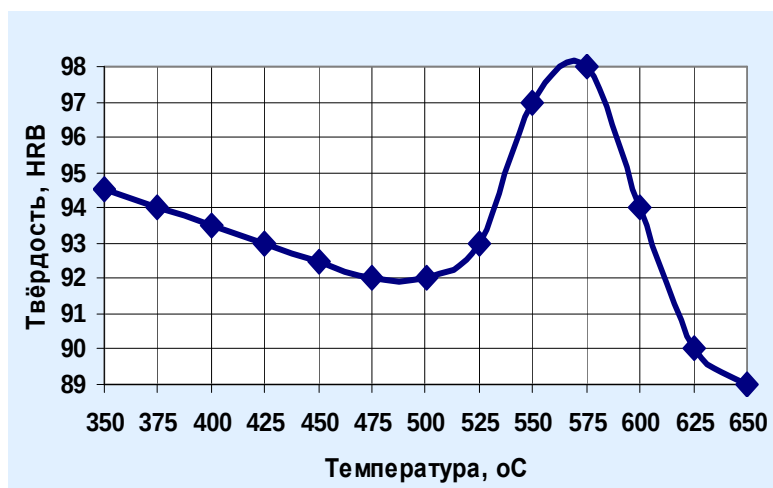
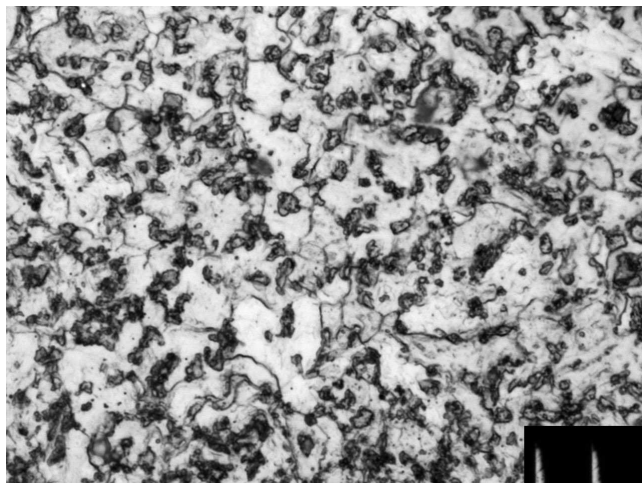


Рис. 2. Изменение твёрдости стали с повышением температуры нагрева

При нагревании выше 350 °C твёрдость начинает незначительно снижаться. Когда температура превышает 500 °C, твёрдость повышается и достигает максимума при температуре 550...575 °C, затем снижается до HRB 80 после 650 °C.

Металлографическими исследованиями установлено, что после закали в условиях ускоренного охлаждения формируется СЗМ (рис. 3).



х 1250

Рис. 3. Структура зернистой морфологии

При повторном нагреве образцов выше ~ 350 °C СЗМ начинает распадаться. Сначала вокруг глобулы образуется тонкая пограничная зона повышенной травимости (рис. 4). Затем структура глобулы распадается окончательно и выглядит как чёрная точка.

Распад глобул по объёму зерна протекает не одновременно. Сначала распадаются глобулы располагающиеся в средней части зерна, а затем на его границах.

При температуре нагрева образца выше 650 °С СЗМ не обнаруживается.

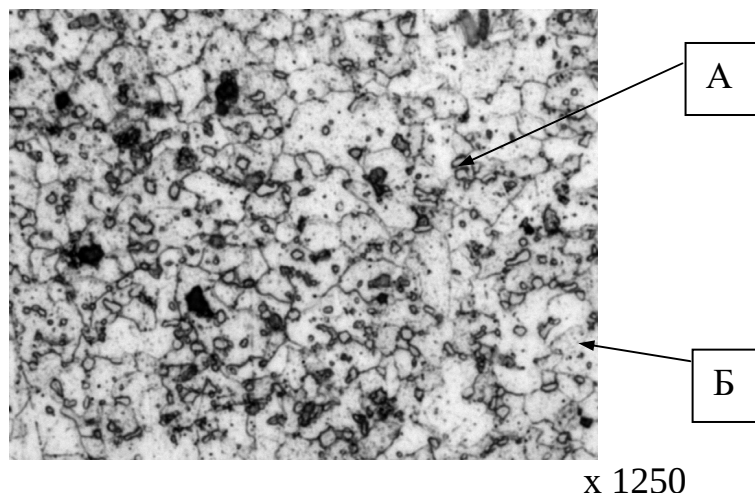


Рис. 4. СЗМ при нагревании ~ 400 °С. А - пограничная зона вокруг глобулей СЗМ. Б – следы распада СЗМ

Обсуждение полученных результатов.

При повторном нагреве при температуре около 300 °С распад СЗМ начинается, по видимому, с аннигиляции дислокаций, аналогично процессам возврата деформированной структуры, и образованию в этих локальных зонах легированного мартенсита. При повышении температуры до ~ 400 °С происходит распад мартенсита, что может способствовать охрупчиванию стали.

Неодновременный распад глобулей СЗМ с центре зерна и по его границам можно объяснить тем, что в центральной части располагаются менее тугоплавкие легирующие элементы, а по границам - более тугоплавкие, затрудняющие распад СЗМ. По этой причине СЗМ на границах зёрен распадается при более высокой температуре повторного нагрева.

При отпуске в температурном диапазоне 500...600 °С имеет место вторичное твердение, в связи с выделением спецкарбидов.

Вывод

Отпуск стали 05Г2МФБ со СЗМ желательно производить при температуре до 300 °С или выше 550 °С, когда заканчивается распад остаточного аустенита.

Список литературы

1. Свищенко В.В., Чепрасов Д.П., Иванайский А.А. Формирование в промежуточной области структур зернистой морфологии и некоторые вопросы терминологии. Барнаул. Изд-во АлтГТУ. Ползуновский альманах, 2003. № 4. 111 с.

2. Мельниченко Н.В., Захаров А.Н., Демкин К.В. Ляльков О.И. Свойства низкоуглеродистой бейнитной стали // Известия Тульского государственного университета, 2012. Вып. 12. Ч. 2. С. 21-25.

3. Чепрасов Д.П. Исследование структуры низколегированных высокопрочных сталей / Д.П. Чепрасов, Е.А. Иванайский, А.А. Иванайский, К.С. Кровяков. // Тезисы докладов 6-ой международной научно-практической конференции «Проблемы и перспективы развития литейного, сварочного и кузнечно-штамповочного производств». Барнаул. Изд-во АлтГТУ, 2004. С. 31.

4. Пумпянский Д.А., Смирнов М.А., Журавлёв Л.Г., Пышминцев И.Ю. Влияние скорости охлаждения на структуру низкоуглеродистой трубной стали // Вестник ЮУрГУ, 2006. № 7. С. 137-140.

5. Борякова, Смирнов М.А. Труды IV-ой Евразийской научно-практической конференции «Прочность неоднородных структур – ПРОСТ 2008». М.: МИСиС, 2008. С. 203.

6. Калетин А.Ю., Рыжков А.Г., Калетина Ю.В. Повышение ударной вязкости конструкционных сталей при образовании бескарбидного бейнита // ФММ, 2015. Т. 116. № 1. С. 114-120.

Мельниченко Николай Васильевич, канд. техн. наук, доц., fmm@tsu.tula.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Парфёнов Никита Игоревич, бакалавр, fmm@tsu.tula.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Кошелев Даниил Игоревич, студент, fmm@tsu.tula.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

THE STRUCTURE FORMATION DURING THE VACATION LOW CARBON BAINITE STEEL

N.V. Melnichenko, N.I. Parhenov, D.I. Koshelev,

The features of structure formation during cooling of bainitic steels are shown.

Key words: structure, of granular morphology, residual austenite, mechanical properties.

Melnichenko Nikolay Vasilievich, candidate of technical sciences, fmm@tsu.tula.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Parphenov Nikita Igorevich, master, fmm@tsu.tula.ru Russia, Tula, Tula State University,

Koshelev Daniil Igorevich, student, fmm@tsu.tula.ru Russia, Tula, Tula State University

АНАЛИЗ ОТКАЗОВ И ПРИЧИН ИХ ВОЗНИКНОВЕНИЯ В АВТОМАТЕ ДЛЯ УПАКОВКИ ОТПРЕССОВАННЫХ БУЛЬОННЫХ КУБИКОВ В ФОЛЬГУ

И.Б. Давыдов

Рассматриваются основные виды отказов, причины их возникновения и возможные пути устранения отказов при упаковке отпрессованных бульонных кубиков в фольгу в упаковочном автомате.

Ключевые слова: оборудование для упаковки, бульонные кубики, завертывание, упаковывание.

В настоящее время широким спросом пользуются разнообразные пищевые концентраты, приправы, специи. К их числу относятся и бульонные кубики (*Knorr[®]*, *Maggy[®]*, *Galina Blanka[®]*), изготавливаемые на многих пищевых предприятиях, как нашей страны, так и зарубежных продовольственных компаниях [1].

Технология производства бульонных кубиков включает следующие операции. Сырье (соль, сахар, и другие компоненты) взвешиваются и фасуются согласно рецептуре готового изделия. Затем, с целью получения однородной смеси, сырье смешивается в миксере, измельчается, очищается от мелких частиц металла или фольги и отправляется на «дозревание». После этого в прессовочной машине роторного типа происходит дозирование массы смеси, необходимой для того или иного продукта, и образование прессованного, но еще не обернутого, бульонного кубика. Далее кубики поступают в упаковочный автомат, в котором осуществляется завертывание кубиков в фольгу. Следующим этапом является поступление завернутого кубика в накопительный бункер, где происходит накопление массы кубиков для бесперебойной работы всей линии производства данного продукта. С помощью транспортера, упакованные бульонные кубики поступают в центробежное бункерное загрузочное устройство, с помощью которого осуществляется выдача кубиков порциями в зависимости от требуемого количества в одной единице упаковки на элеваторное транспортное устройство. Бульонные кубики порциями подаются в требуемом количестве на вертикальную упаковочную машину, в которой происходит выброс порции кубиков в пакет с последующей его запайкой и выдачей в тару [2, 3].

Упаковка бульонных кубиков в фольгу представляет собой сложный процесс, сопровождающийся периодическими отказами в процессе работы автомата. При упаковке осуществляется подача отпрессованного бульонного кубика к зоне упаковки, отрезание слоя фольги, обертывание

кубика в фольгу и склеивание шва фольги. Упаковочная фольга представляет собой пятислойный материал: пищевая основа – алюминиевая фольга – дизайн-слой – клеевая основа – парафин. Использование других типов упаковочных материалов на рассматриваемой машине не допускается.

На рис. 1 показана схема автомата, предназначенного для упаковки бульонных кубиков в фольгу.

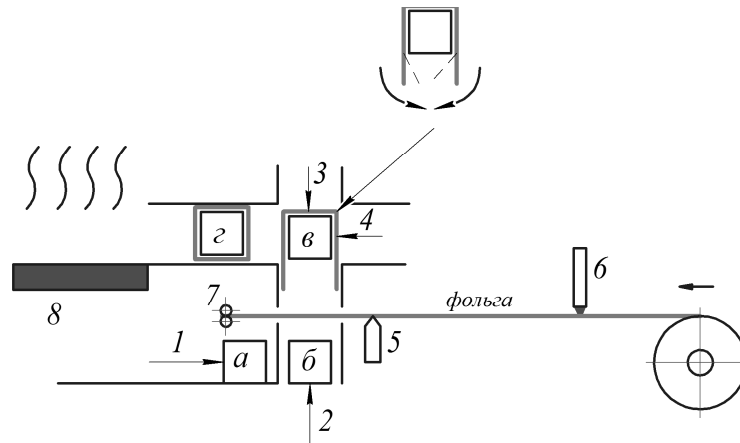


**Рис. 1. Автомат для упаковки бульонных кубиков в фольгу:
1, 2, 4 – толкатель; 3 – прижим; 5 – нож; 6 – датчик метки;
7 – захват; 8 – термоэлектрический нагреватель (ТЭН)**

Автомат работает следующим образом. Отпрессованные бульонные кубики по ленте с направляющей передаются толкателем 1 в зону завёртывания в фольгу (а). Толкатель 2 обеспечивает подачу кубика к фольге, движение которой обеспечивает захват 7. Датчик 6 фиксирует метку фольги и подает сигнал ножу 5, который по сигналу отрезает ее (б). Дальнейшее направление движение кубика с фольгой – зона завертывания кубика в фольгу, фиксацию которого обеспечивает прижим 3 (в). Толкателем 4 бульонный кубик, завернутый в фольгу, направляется к нагревательному элементу 8, который обеспечивает нагрев клейкого материала для получения прочного шва в процессе заклеивания фольги. Привод машины осуществляется с помощью коленчатого вала – основы любой современной технологической машины, для которой характерны высокая надежность и долговечность. Являясь передающим звеном машины, он служит для передачи движения всем узлам и механизмам.

В процессе работы на данном оборудовании были выявлены следующие отказы, которые в соответствии с известной классификацией отказов могут быть представлены следующим образом.

По характеру изменения параметра до момента возникновения отказа были обнаружены внезапные и постепенные отказы.

В качестве внезапного отказа был выявлен сбой программного обеспечения. Многие современные машины-автоматы работают на базе Windows CE, сбой в работе, которой происходит довольно часто; многие производители устанавливают собственное программное обеспечение, перепрошивку которого периодически осуществляют.

Постепенным отказом автомата является затупление ножа для обрезания фольги. Износ материала, из которого изготавливают рабочие органы современных машин пищевых производств, вследствие коррозии, невозможен. Рабочие узлы и механизмы, в том числе и те, которые соприкасающиеся с продуктом, изготовлены из пищевой стали, не дающей реакций с солью, сахаром и другими компонентами смеси.

По связи с отказами других элементов отказы делят на независимые и зависимые. Независимым отказом может быть обрыв фольги, в которую завертываются кубики. Зависимым отказом автомата является, например, сход коленчатого вала со своей оси в результате износа подшипников (если подшипник исчерпал свой ресурс или под воздействием внешних факторов, например, попадание мусора).

По возможности использования элемента после отказа бывают полные и частичные отказы. Полным отказом является, например, поломка муфты, передающей движение от двигателя на коленчатый вал. Частичным отказом является сгорание ТЭНа. При этом одна поверхность фольги хоть и приклеивается к другой, но прочность склеивания невысока. Это приводит к тому, что на последующих операциях технологического процесса начинает происходить разворачивание фольги, что приводит к снижению эффективности машины (падает производительность, потеря качества, появляется необходимость дополнительного задействования операторов к процессу извлечения бракованных изделий из общей массы и др.).

По характеру проявления отказа бывают отказы типа сбоя, перемежающиеся и устойчивые. К отказам типа сбоя можно отнести потерю дизайна фольги, в которую упакованы кубики, из-за засорения захвата. Кубик имеет 6 граней. Машина, завертывающая кубики, работает так, чтобы каждая грань кубика имела строго определенный рисунок. Для этого захваты, имеющие строго установленный шаг, протягивают фольгу таким образом, чтобы произошло соответствие требуемому дизайну. Если захват по каким либо причинам не сработал (например, засорился), то дизайн каждой грани кубика нарушается. Упакованный не правильным образом кубик движется дальше к датчикам. Датчик по соответствующим меткам фиксирует сбой и, поэтому, направляет сигнал на захваты. В свою очередь захваты фольги самовосстанавливают требуемые параметры работы и продолжают протягивать фольгу по строго установленному шагу. Дизайн фольги, обертывающей каждую грань кубика, восстанавливается.

Перемежающимся отказом является периодическое неулавливание датчиком метки фольги, что обусловлено, прежде всего, некачественными материалами упаковки. Устойчивым отказом может быть любая внутренняя поломка, например, выход из строя подшипника.

По причине возникновения отказа бывают конструкционные, производственные и эксплуатационные отказы.

Рассмотрим причину возникновения конструкционного отказа (рис. 2, а, б). Крошки пыли, образующиеся после прессования кубиков, заполняют все пустоты между лентой 2 подачи кубиков 1 в машину и на-

правляющей 3 ее движения. Это приводит к неточной подаче на завертывание и смещению на высоту h потока кубиков за счет налипания порошковой пыли под лентой. В результате этого происходит неточная подача кубиков к заверточному устройству упаковочного автомата, в результате чего они крошатся.

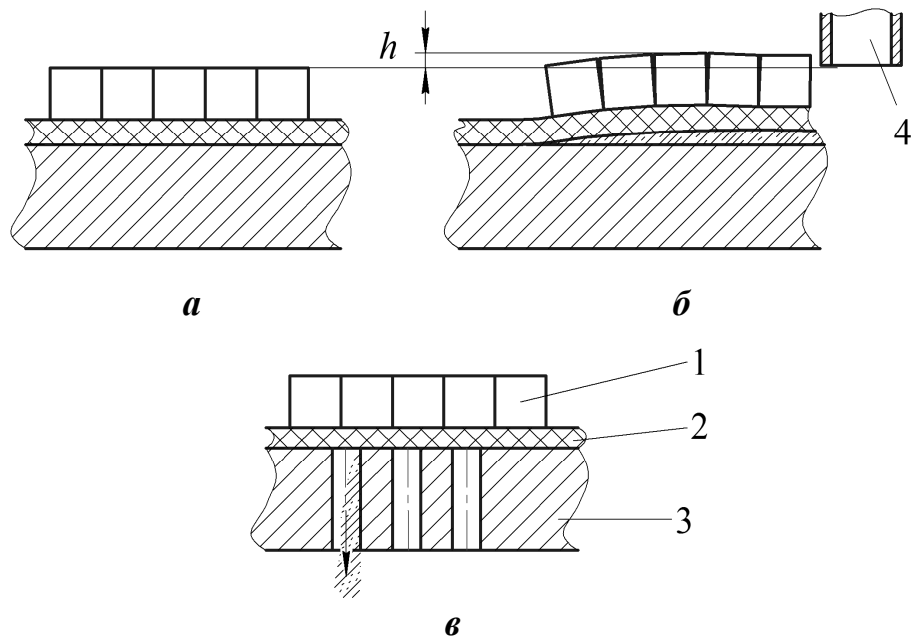


Рис. 2. Возникновение конструкционного отказа в процессе движения кубика к зоне упаковки и пути его устранения:
а – требуемое направление потока кубиков по ленте; б – возникновение отказа при подаче бульонных кубиков к зоне завертывания в фольгу; в – модернизированная направляющая с отверстиями:
1 – бульонный кубик, 2 – лента; 3 – направляющая ленты; 4 – зона завертывания в фольгу

Возникновение данного отказа обусловлено тем, что на этапе конструирования деталей, узлов и механизмов машин не всегда можно в полном объеме учесть многие факторы, которые влияют на надежность технологической системы. Так, при проектировании и конструировании машины для завертывания кубиков в фольгу не было учтено то, что после прессования бульонных кубиков образуется некоторое количество пыли, которая начинает забиваться во все поры, зазоры и др. аналогичные пустоты, сопряженных с продуктом рабочих плоскостей. Одним из таких участков является зона между лентой подачи кубиков в машину и направляющей ее движения (см. рис. 2, б). Это приводит к неточной подаче кубиков на завертывание, и кубики крошатся при подаче.

При конструировании новых аналогичных по назначению машин, указанный недостаток был устранен следующим образом. Направляющая ленты была выполнена с отверстиями для вывода крошки в случае заплот-

нения ею пространства между лентой и направляющей (рис. 2, в). Для того, чтобы с такой направляющей крошки пыли не падали на нижнюю ленту был выполнен наклоненный под углом отсекатель (на рис. не показан), благодаря которому крошки удаляются в область, удаленную от движущихся рабочих органов машины.

Производственный отказ возникает из-за нарушения или несовершенства технологического процесса изготовления или ремонта автомата. Примером производственного отказа является использование не предназначенного упаковочного материала (например, вместо пятислойной фольги использование пластмассовой упаковочной фольги). Это обусловлено тем, что при расчете параметров узлов и механизмов машин проводятся высокоточные расчеты для конкретных изделий, материалов и т.п., обладающих определенными физико-механическими свойствами. При использовании же изделий, материалов и т.п. с параметрами, значения которых выходят за установленные пределы, может произойти поломка узлов и механизмов машин.

К эксплуатационному отказу можно отнести поломку машины, обусловленную, например, установлением скорости рабочих органов машины, значение которой превышает ее значение, установленное в правилах и режимах эксплуатации.

Таким образом, понятие надежности является основным понятием, охватывающим все стороны технической эксплуатации элементов, узлов, блоков и систем. Для современных машин-автоматов пищевых и перерабатывающих производств, в том числе и для рассматриваемой машины, характерно наличие большого количества датчиков, которые предупреждают возникновение отказов и способствуют надежному и долговечному функционированию системы [4]. Причинами отказа автомата для упаковки бульонных кубиков в фольгу являются просчеты, допущенные при конструировании, дефекты производства, нарушения правил и норм эксплуатации, повреждения. Все это приводит к снижению качества производимой продукции и уменьшению производительности упаковочной линии. Поэтому при создании, конструировании и эксплуатации упаковочных машин особое внимание необходимо уделить вопросам надежности и прогнозирования отказов элементов их конструкции.

Список литературы

1. Давыдов И.Б., Давыдова Е.В. Вопросы автоматизации изготовления и упаковки бульонных кубиков // Вестник ТулГУ. Автоматизация: проблемы, идеи, решения. Тула: Изд-во ТулГУ, 2009. Ч. 1. С. 12-17.
2. Давыдова Е.В., Прейс В.В. Механические бункерные загрузочные устройства в пищевой промышленности: под науч. ред. В.В. Прейса. Тула: Изд-во ТулГУ, 2012. 168 с.

3. Давыдова Е.В., Давыдов И.Б., Прейс В.В. Бункерные загрузочные устройства центробежного типа для автоматической загрузки прессованных штучных пищевых продуктов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки, 2012. Вып. 1. С. 103-111.

4. Проников А.С. Надежность машин. М.: Машиностроение, 1978. 592 с.

Давыдов Иван Борисович, инженер, svoryi@gmail.com, Россия, Тула, Тульский государственный университет

**ANALYSIS OF FAILURES AND THEIR CAUSES IN THE MACHINE
FOR THE PACKAGING OF PRESSED STOCK CUBES IN FOIL**

I.B. Davydov

The main types of failures, causes of their occurrence and possible ways of eliminating failures when packing pressed bouillon cubes in foil in the packaging machine are considered.

Key words: equipment for packaging, bouillon cubes, wrapping, packaging.

Davydov Ivan Borisovich, engineer, svoryi@gmail.com, Russia, Tula, Tula State University

УДК 621

**ВЫВОД КРИТЕРИАЛЬНОГО УРАВНЕНИЯ ТЕРМОДИНАМИКИ
ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РАЗВИТИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ**

А.Р. Крицкая, Н.А. Силаева, А.Л. Лысенко, А.К. Горбунов

Если рассматривать историческое развитие термодинамики, то уравнения процессов и физические понятия в соответствии с теорией размерностей следуют из комбинаций семи основных физических величин. С другой стороны, значительное количество физических закономерностей объединяются безразмерным критериальным уравнением энерготехнологических процессов. Такой совместный методический подход позволил дать новую физическую интерпретацию основному уравнению термодинамики и спрогнозировать наукоемкие направления в ядерной энергетике.

Ключевые слова: критерии, энерготехнологические процессы, кинетика, термодинамика, поток, транспортировка.

Введение

Три формы субстанции вещества, энергии и момента импульса дают физическое многообразие материального мира. Модель материального мира при этом включает различные сочетания потоков вещества, энергии и момента импульса [1-4]. Такой теоретический подход обеспечивает комплексное понимание энерготехнологических процессов, дает развитие

новым машиностроительным технологиям [5-19] и позволяет прогнозировать развитие новых наукоемких направлений в ядерной энергетике [20]. В основе обобщения физических потоков лежит критериальное уравнение Лысенко Л.В.

$$L_k = -\frac{A\Phi T}{A\Phi^2 + T}, \quad (1)$$

где L_k - безразмерный комплекс, отношение действительного потока субстанции к теоретическому (минимальному); T - безразмерный комплекс, определяющий соотношение транспортных потоков (полного и диффузионного); Φ - безразмерный комплекс, определяющий соотношение между кинетическим и диффузионным потоками; A - безразмерная величина, определяющая соотношение между кинетической зоной (объемом кинетического слоя) и транспортной областью.

Из критериального уравнения следует энерготехнологический смысл законов термодинамики. Термодинамические системы автомодельны в соответствии с критериями времени, энергии и структуры пространства.

Если рассматривать историческое развитие безразмерных комплексов (критериев), то уравнения термодинамических процессов и физические понятия следуют из комбинаций семи основных физических величин (системы СИ). Так, например, механика содержит параметры, основанные на физических величинах: килограмм, секунда, метр. Чтобы перейти к термодинамике и молекулярной физике надо добавить величину количества вещества моль и температуру, которая измеряется в Кельвинах. Электричество и магнетизм включает, кроме перечисленных величин, силу тока Ампер. Завершающая величина силы света - кандела определяет совместно с другими основными физическими параметрами раздел физики - оптику.

В нашей стране Международная система единиц (СИ) применяется с 1 января 1963 года. В настоящее время применение единиц физических величин в России узаконено Конституцией РФ (ст. 71) (стандарты, эталоны, метрическая система и исчисление времени находятся в ведении Российской Федерации) и Федеральным законом "Об обеспечении единства измерений". Статья 6 Закона определяет применение в Российской Федерации единиц величин Международной системы единиц, принятых Генеральной конференцией по мерам и весам и рекомендованные к применению Международной организацией законодательной метрологии. В практической деятельности следует руководствоваться единицами физических величин, регламентированных ГОСТ 8.417-2002 «Государственная система обеспечения единства измерений. Единицы величин».

Следствия из критериального уравнения

Из представленного феноменологического критериального энерготехнологического уравнения Лысенко Л.В. получены зависимости [3]:

- уравнение для вязких жидкостей Ньютона;

- уравнение теплопроводности Фурье;
 - уравнение Гука;
 - уравнение диффузии Фика;
 - безразмерное число Рейнольдса;
 - закон всемирного тяготения;
 - основной закон динамики Ньютона;
 - уравнения кинетики вещества.
- а также неизвестные взаимозависимости, такие как:
- уравнение кинетики случайных событий;
 - уравнение кинетики электрического заряда;
 - уравнение аналогии энтропии и времени;
 - уравнение кинетики магнитного заряда;
 - уравнение кинетики импульса;
 - уравнение кинетики момента импульса;
 - уравнение транспортировки момента импульса;
 - уравнение потока вероятности;

Транспортные уравнения связаны с перемещениями вещества, энергии и момента импульса в пространстве, а кинетические зависимости определяются преобразовательными процессами этих субстанций во времени.

Методика вывода транспортных уравнений из феноменологического безразмерного комплекса

Покажем методику вывода транспортных уравнений на примере переноса импульса. В феноменологическом критериальном уравнении Лысенко Л.В. необходимо принять следующие критерии

$$L_k = \tau / \Delta(\rho W)(K_k \nu)^{0,5};$$

$$\Phi_k = \Delta X_k (K_k / \nu)^{0,5};$$

$$T_k = (\Delta X_k V_{\max} / \nu) + 1;$$

$$A_k = \frac{\Delta l_k}{\Delta X_k}.$$

Здесь: τ – касательное напряжение; ρ – плотность; W – скорость, определяющая импульс; K_k – константа скорости кинетического процесса; ν – кинематическая вязкость; ΔX – размер транспортного слоя; $V_{\max}$ – скорость переноса; Δl_k – размер кинетического слоя.

В этом случае энерготехнологическое критериальное уравнение (1) примет вид:

$$L_k = -A_k \Phi_k T_k / (A_k \Phi_k^2 + T_k). \quad (2)$$

При условии перехода в транспортную область $A_k \Phi_k \rightarrow \infty$, а также исключения компоненты $V_{\max} = 0$, критериальное уравнение (2) упрощается до

$$L_k = -1/\Phi_k.$$

После подстановки значений и преобразования получим классическое уравнение Ньютона для вязкой жидкости

$$\tau = -\nu \cdot \text{grad}(\rho W) \quad (3)$$

Аналогично можно получить зависимости для транспортных потоков: уравнение диффузии Фика и уравнение теплопроводности Фурье.

Отметим, что момент импульса в кинематической вязкости носит характер параметра среды, а градиент импульса и момента импульса определяется геометрическими и пространственными характеристиками.

Методика вывода кинетических уравнений из феноменологического комплекса

При выводе кинетических уравнений процессов преобразования субстанций [1-7] в критериальном уравнении Лысенко Л.В. (1) необходимо принять

$$T \rightarrow \infty.$$

В этом случае критериальное уравнение имеет вид:

$$L_k = -A_k \Phi_k \quad (4)$$

После подставок и преобразований имеем уравнение кинетики, например, для преобразования импульса

$$\frac{d(\rho W)}{dt} = -K_k \Delta(\rho W). \quad (5)$$

Дадим физический смысл уравнению кинетики. Уравнение кинетики обеспечивает в законе сохранения субстанций процесс исчезновения (преобразования) одной формы субстанции в другую. Формы физических субстанций многообразны.

Кинетические процессы обобщают случайные процессы и связаны с распределением Больцмана через константу скорости процессов.

Из этого следует уравнение кинетики случайных событий

$$\frac{dA}{dt} = -K_s (A - A_p) \quad (6)$$

где K_s – константа скорости случайных событий; A – частота случайного события; A_p – равновесный достоверный предел случайных событий.

Из уравнения случайных событий (6) следует аналогия энтропии и времени. После интегрирования уравнения кинетики случайных событий имеем

$$-K_s \times t = \ln A_s, \quad (7)$$

где

$$A_s = \frac{(A - A_p)}{(A_0 - A_p)}. \quad (8)$$

Аналогично для энтропии

$$S = K \times \ln A, \quad (9)$$

Сравнивая формулы (7) и (9) при условии $A_s = A$, получаем

$$-K_s t = \frac{S}{K}. \quad (10)$$

Таким образом, из уравнений (5-10) следует

- энтропия и время аналогичны;
- безразмерное время K_3t отрицательно по отношению к безразмерной энтропии S/K ;
- время и энтропия разнонаправлены.

Аналогия безразмерного времени и энтропии, а также их разнонаправленность позволяют дать энерготехнологическую интерпретацию основного уравнения термодинамики.

Энерготехнологическая интерпретация основного уравнения термодинамики

Для совместного рассмотрения первого и второго закона в термодинамических системах используют основное уравнение термодинамики

$$S=U/T+PV/T, \quad (11)$$

где S – энтропия; U – энергия; T – температура; P – давление; V – объем.

Так, как безразмерное время энерготехнологической системы K^*t аналогично безразмерной энтропии S/k (k – число Больцмана), то получаем критериальное уравнение, обобщающее первый и второй закон термодинамики.

$$K^*t \text{ (время)} + U/(k^*T) \text{ (энергия)} + N \text{ (число Авогадро)} = 0, \quad (12)$$

Из критериального уравнения (12) следует энерготехнологический смысл законов термодинамики. Термодинамические системы автомодельны в соответствии с критериями времени, энергии и структуры пространства.

Впервые критериальное уравнение (12) было сформулировано (опубликовано) Лысенко Л.В. при прогнозировании эволюционного развития атомной энергетики [20].

Заключение

Три формы субстанции вещества, энергии и момента импульса дают физическое многообразие материального мира. В соответствии с критериальным уравнением Лысенко Л.В. модель материального мира при этом включает различные сочетания потоков вещества, энергии и момента импульса. Из критериального уравнения следует энерготехнологический смысл законов термодинамики. Термодинамические системы автомодельны в соответствии с критериями времени, энергии и структуры пространства. Такой теоретический подход обеспечивает комплексное понимание термодинамических систем и дает развитие не только новым машиностроительным технологиям, но и позволил спрогнозировать прогрессивные наукоемкие направления в ядерной энергетике.

Список литературы

1. Лысенко Л.В. Обобщение определяющих характеристик процесса накипеобразования // Судовые энергетические установки: Сб. трудов.– Владивосток : Изд-во ДВФУ. 1980. С. 56-58.

2. Лысенко Л.В. Теоретические основы конструкторских оценок энерготехнологических процессов. М.: Энергоатомиздат, 1997. 66 с.

3. Горбунов А.К., Коржавый А.П., Лысенко Л.В., Лысенко А.Л., Шаталов В.К. Элементы теоретических основ природоподобных процессов // Научно-технические технологии, 2015. № 6. С. 52-57.

4. Лысенко Л.В., Шаталов В.К., Лысенко А.Л. Параметры и безразмерные комплексы, обобщающие энерготехнологические процессы // В сб.: Энерготехнологические процессы. Проблемы и перспективы. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000. С. 25-30.

5. Буланов А.В., Лысенко А.Л., Шишкин В.А. Оценка кинетики энерготехнологических процессов // Энерготехнологические процессы. Проблемы и перспективы: Сб. тр. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2004. С. 46-49.

6. Шаталов В.К., Лысенко Л.В. Теория диффузионно-кинетической модели при микродуговом оксидировании // Коррозия: материалы, защита, 2006. № 10. С. 40-42.

7. Шаталов В.К., Лысенко Л.В. Формирование оксидных покрытий на крупногабаритных изделиях из титановых сплавов. М.: Судостроение, 2005. № 1. С. 58-60.

8. Шаталов В.К., Горелова Г.П., Лысенко Л.В. Местное микродуговое оксидирование поверхностей деталей из титановых сплавов // Коррозия: материалы, защита, 2005. № 4. С. 45-49.

9. Шаталов В.К., Лысенко Л.В. Способ получения защитных покрытий на поверхности металлов и сплавов // Патент на изобретение RUS 2194804, 23.10.2000.

10. Минаев А.Н., Лысенко Л.В., Шаталов В.К., Ушков С.С. Энерготехнологические процессы при использовании морских вод: учебное пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. 190 с.

11. Lysenko L., Travin V. Designing peculiarities of power equipment details of titanium alloys // Titanium 99. 1999. С. 1102-1107.

12. Gnedenkov S.V., Gordienko P.S., Lysenko L.V., Sinebryukhov S.L., Khrisanova O.A., Skorobogatova T.M., Minaev A.N., Blinnikov O.V. Effect coatings formed on titanium by microarc oxidation on the intensity of the salt deposition process. Физика и химия обработки материалов, 1997. № 2. С. 65-69.

13. Сень Л.И., Пермяков В.В., Ильяшенко Н.Г., Воронов В.И., Лысенко Л.В., Дарменко А.В. Термическая обработка морских и сточных вод для парогенераторных установок // Теплообмен и гидрогазодинамика при кипении и конденсации. М., 1979. С. 123-124.

14. Сень Л.И., Лысенко Л.В., Минаев А.Н., Пермяков В.В., Ильяшенко Н.Г., Воронов В.И. Основы проектирования парогенераторов, работающих на морской воде. Владивосток, 1978.

15. Иванова Л.А., Кудрявцев А.С., Чудаков Е.В., Травин В.В., Лысенко Л.В. Оптимизация комплекса служебных свойств титановых сплавов марок 5и и 37 для узлов и деталей энергетического оборудования. Титан, 2010. № 4 (30). С. 23-30.

16. Анкудинов А.А., Богомолов А.В., Кириллов А.А., Лысенко Л.В., Циммерман С.Д. Компактный турбонасосный агрегат. Патент на изобретение RU 2300021. 13.10.2005.

17. Максимов Ю.А., Лысенко Л.В., Травин В.В. Проблемы и практика использования титановых сплавов в паротурбинных установках // Ti-2007 в СНГ. Международная конференция, 2007. С. 330-335.

18. Лысенко Л.В. Проблема кинетики и транспортировки момента импульса в океанотехнике // Направления развития турбиностроения на ОАО «Калужский турбинный завод». Сборник статей под общей редакцией канд. техн. наук Ю.А. Максимова. Калуга: «Манускрипт», 2007. С. 242-246.

19. Лысенко Л.В., Минаев А.Н., Буланов А.В. Кинетика импульса // Кораблестроение и океанотехника. Проблемы и перспективы: Материалы международной конференции. Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2001. С. 499 - 501.

20. Коржавый А.П., Лысенко Л.В., Логашев О.В., Шаталов В.К. Концепция использования атомных энергетических установок для разработки, добычи и транспортировки ресурсов мирового океана // Научные технологии, 2017. № 7. С. 51-56.

Крицкая Анна Рудольфовна, канд. пед. наук, доц., anna.kritskaya69@list.ru, Россия, Калуга, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), Калужский филиал,

Силаева Наталья Альбертовна, старший преподаватель, silaeva1968@list.ru, Россия, Калуга, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), Калужский филиал,

Лысенко Андрей Леонидович, канд. техн., наук, доц., baldqwest@mail.ru, Россия, Калуга, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), Калужский филиал,

Горбунов Александр Константинович, д-р физ.-мат. наук, проф., kf_mgtu_fiz@mail.ru, Россия, Калуга, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), Калужский филиал

DERIVATION OF THE CRITERION THERMODYNAMICS EQUATION WITH AN AIM
OF FORECASTING THE DEVELOPMENT OF MECHANICAL ENGINEERING

A.R. Kritskaya, N.A. Silayeva, A.L. Lysenko, A.K. Gorbunov

If we consider the historical development of thermodynamics, then the equations of processes and physical concepts in accordance with the theory of dimensions follow from the combinations of seven basic physical quantities. On the other hand, a significant number of physical laws are combined by the dimensionless criterion equation of energy technology processes. Such a joint methodological approach allowed us to give a new physical interpretation to the basic equation of thermodynamics and to forecast knowledge-intensive directions in nuclear power engineering.

Key words: criteria, energy technology processes, kinetics, thermodynamics, flow, transportation.

Kritskaya Anna Rudolfovna, candidate of pedagogical sciences, docent, anna_kritskaya69@list.ru Russia, Kaluga, the Moscow State Technical University named after N.Bauman (The National Research University), Kaluga branch,

Silayeva Natalya Albertovna, senior lecturer, silayeva1968@list.ru, Russia, Kaluga, the Moscow State Technical University named after N.Bauman (The National Research University), Kaluga branch,

Lysenko Andrey Leonidovich, candidate of technical sciences, docent, baldqwest@mail.ru, Russia, Kaluga, the Moscow State Technical University named after N.Bauman (The National Research University), Kaluga branch,

Gorbunov Alexander Konstantinovich, doctor of physics and mathematics, professor, kf_mgtu_fiz@mail.ru, Russia, Kaluga, the Moscow State Technical University named after N.Bauman (The National Research University), Kaluga branch

НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ШЕВИНГОВАНИЯ-ПРИКАТЫВАНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

А.А. Маликов, А.В. Сидоркин, М.Л. Разуваев, Н.С. Смолянинов

Рассмотрен ряд особенностей проектирования средств технологического оснащения, предназначенных для осуществления экспериментальных исследований тепловыделения в процессе комбинированной (режуще-деформирующей) чистовой зубообработки цилиндрических колес шевингованием-прикатыванием. Выработаны рекомендации по выбору оптимальных решений, обеспечивающих достаточно высокое качество данных, получаемых в ходе экспериментов.

Ключевые слова: оснастка, термометр сопротивления, шевингование-прикатывание, температура, станок с ЧПУ.

При решении задач, связанных с измерением температуры режущих зубьев специального комбинированного (режуще-деформирующего) инструмента, в процессе чистовой обработки венцов цилиндрических зубчатых колес шевингованием-прикатыванием [1], необходимо учитывать, что он будет считаться эффективным в условиях производства зубчатых колес с большим объемом выпуска [2]. Естественно, для осуществления рассматриваемого процесса при таком типе производства необходимо применение специализированных станков-автоматов (в крайнем случае, полуавтоматов), обладающих, в частности, большой жесткостью [3, 4]. Для обработки небольших партий заготовок в лабораторных или опытно-промышленных условиях вполне может быть использован универсальный токарно-винторезный станок (например, модели 16К20) [5].

Однако, более эффективным решением, нацеленным на проведение подобных экспериментальных исследований, можно считать применение токарного станка с ЧПУ (например, модели 16К20Ф3), оснащенного многопозиционной револьверной головкой и обладающего, при этом, достаточной жесткостью [6]. Такое решение, при использовании типовых конструкций технологической оснастки, задействованной при обработке мелко- и среднемодульных зубчатых колес, обладающих небольшими ширинами венца и числами зубьев, позволяет револьверной головке играть роль своеобразного магазина-накопителя.

Последовательная обработка партии колес, численность которой соответствует, как правило, числу позиций револьверной головки, осуществляемая в рамках замкнутого цикла по программе, позволяет добиться

соблюдения заранее определенного жесткого временного регламента. Что, в свою очередь, повышает точность и достоверность результатов измерений, проводимых для объектов и процессов, обладающих относительно небольшой тепловой инерционностью.

Процесс обработки цилиндрических зубчатых колес шевингованием-прикатыванием заключается в совместной обкатке инструмента и заготовки, находящихся в беззазорном зацеплении друг с другом [1, 2]. При этом инструментальная оправка с шевером-прикатником устанавливается в трехкулачковый самоцентрирующий клиновой патрон, оснащенный электромеханическим приводом зажима, а приспособление – державка, предназначенная для установки зубчатого колеса во время обработки, закрепляется в revolverной головке станка.

Как следует из вышесказанного – одним из главных элементов технологического оснащения рассматриваемой системы является оправка (рис. 1), на конструкции которой необходимо остановится подробнее.

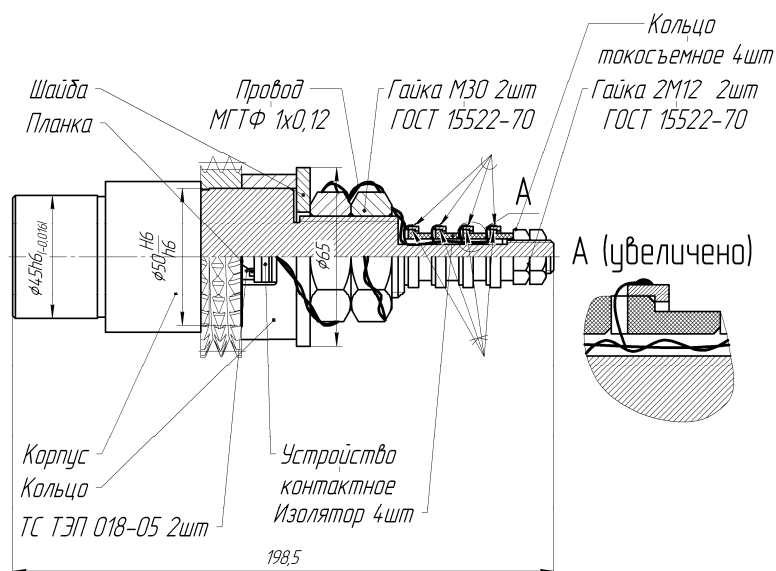


Рис. 1. Эскиз оправки в сборе

Нагрев режущих зубьев инструмента вызывает изменение (увеличение) сопротивления термометра ТЭП 018, подключенного к преобразователю «сопротивление-напряжение» [4]. При этом, передача электрического сигнала от чувствительного элемента термометра к преобразователю, осуществляется посредством установленных на корпусе оправки изолированных токосъемных колец на неподвижные изолированные токосъемники, размещенные, в свою очередь, кронштейне, смонтированном на технологическом оборудовании.

Для рассматриваемого нами случая необходимо проведение измерений температуры в двух диаметрально противоположных точках инструмента. Это требует применения двух плоских термометров сопротивления. Нетрудно догадаться, что наличие гальванической связи между двумя

двухпроводными каналами измерения является недопустимым. Следовательно, корпус оправки (рис. 2) должен быть оснащен посадочной поверхностью, позволяющей производить установку четырех токосъемных колец в сборе с изоляторами.



Рис. 2. Фотография оправки в сборе

Процедура установки термометров сопротивления на оправку рассмотрена подробно в [4, 5], поэтому здесь не приводится. Наиболее ответственная деталь оправки – ее корпус (рис. 3), имеющий ряд ответственных посадочных поверхностей. Хвостовик оправки, предназначенный для зажима ее в патроне, выполнен по 6-му качеству точности. Его радиальное биение, а также биение базового торца, относительно оси центров не должны превышать 0,01 мм. При этом шероховатость указанных рабочих поверхностей должны быть $Ra=0,8$ мкм. Для корпуса предусмотрена закалка до 41,5...46,5 HRCэ, позволяющая добиться высоких эксплуатационных характеристик. Материал корпуса – сталь 40Х ГОСТ 4543-71. Гладкая цилиндрическая посадочная поверхность, предназначенная для установки инструмента – шевера-прикатника, должна быть также выполнена по 6-му качеству точности. К посадочной цилиндрической и базовой торцевой поверхностям предъявляются высокие требования по допускам радиального и торцевого биения, находящимся в пределах 0,01 мм. При этом измерительной базой является мнимая ось вращения оправки, которая материализуется посредством двух центровых отверстий. Шероховатость рассматриваемых поверхностей должна соответствовать $Ra=0,8$ мкм.

Для обеспечения малых величин несоосности и торцевого биения токосъемного кольца, цилиндрическая поверхность, на которую производится посадка его изолятора, выполняется по седьмому качеству точности. Шероховатость данной, а также примыкающей к ней торцевой поверхности должна соответствовать $Ra=1,6$ мкм. Цилиндрическая поверхность, предназначенная для установки токосъемных узлов, выполнена достаточно протяженной. Ее свободный конец имеет резьбу М12. При этом, на ее гладком участке (с заходом на резьбу М30) выполнен паз-канал, шириной 4 и глубиной 2 мм, предназначенный для прокладки четырех сигнальных проводов МГТФ 1х0,12 (см. рис. 3 и рис. 1).

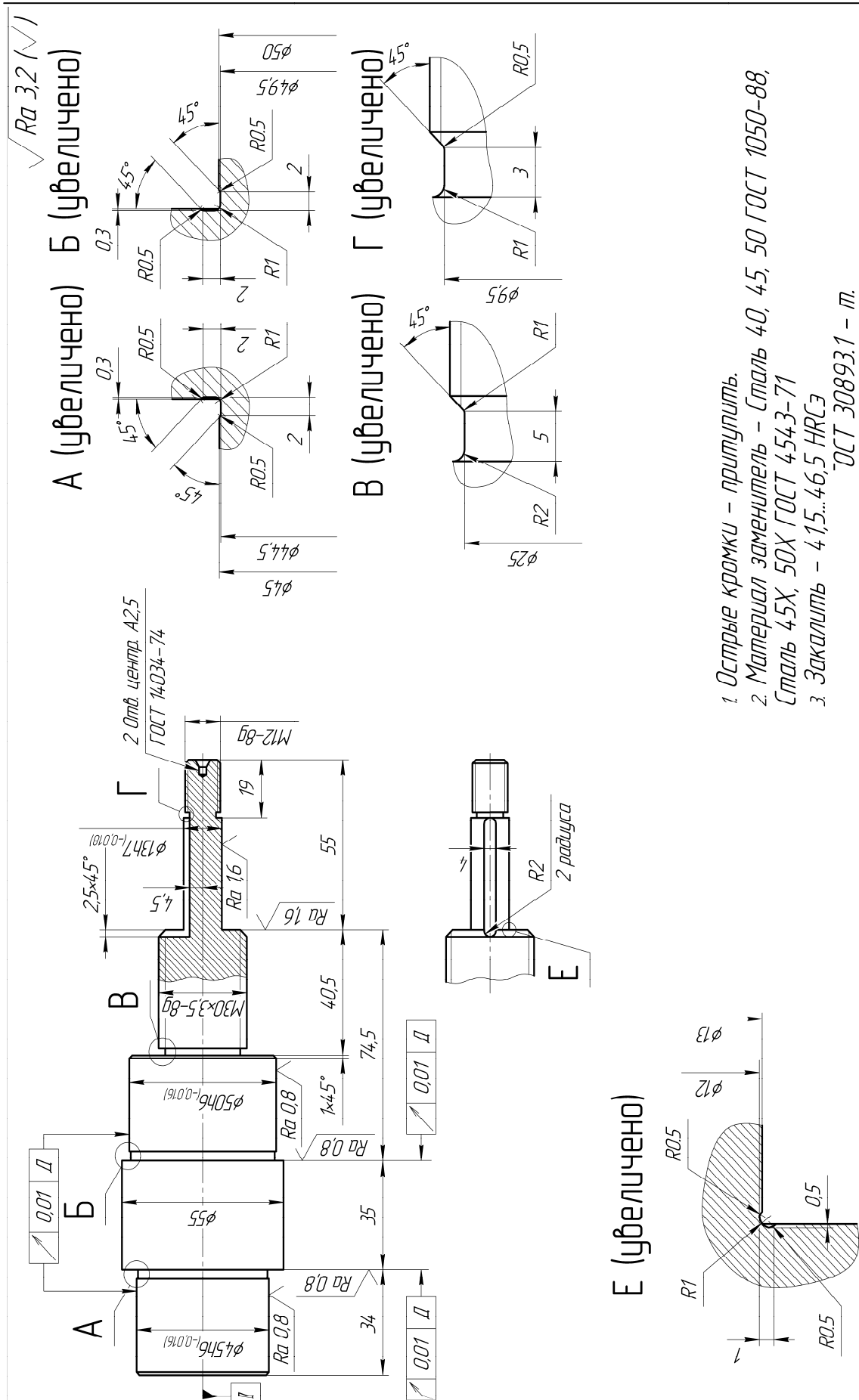


Рис. 3. Эскиз корпуса оправки

Особенность сборки токосъемного узла рассмотрены в [5, 4]. Изоляторы, используемые в составе данной конструкции, могут быть успешно получены при помощи 3D-печати [7, 4].

Для реализации процесса шевингования-прикатывания на токарном станке с ЧПУ 16К20Ф3 разработана специальная конструкция приспособления для установки зубчатых колес – державка, конструкция которой приведена на рис. 4, а фотография – на рис. 5.

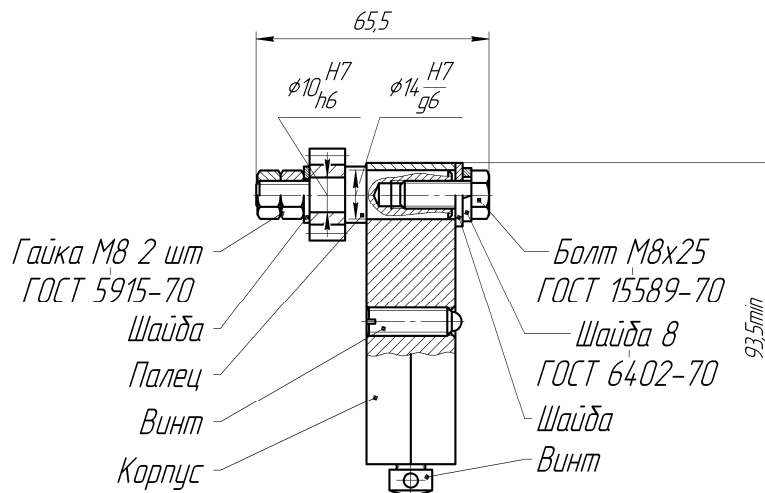


Рис. 4. Эскиз державки в сборе

Державка устанавливается в револьверную головку станка. При этом, ее базирование производится по плоскости основания корпуса (установочная база), задней грани корпуса и сферической головке винта, размещенного в корпусе поперечно (направляющая база) и сферической головке винта, установленного продольно (опорная база). Эти два винта позволяют регулировать вылет державки и компенсировать погрешности ее углового положения в установочной плоскости. Закрепление державки в корпусе револьверной головки производится при затягивании болта, взаимодействующего со скошенной шайбой. Последняя, в свою очередь, образует со скосом корпуса державки клиновую пару.



Рис. 5. Фотография державки в сборе

Винты устанавливаются в корпус по мелкой резьбе, что предохраняет их от саморазвинчивания в процессе эксплуатации приспособления и обеспечивает соблюдение необходимой точности базирования при его настройке.

Базирование пальца в корпусе производится по протяженной цилиндрической поверхности (двойная направляющая база), и торцу бурта (опорная база). Палец устанавливается в корпус по точной посадке с упором в бурт и фиксируется в последнем при помощи крепежного болта и двух шайб. Для предотвращения саморазвинчивания – одна из шайб выполнена пружинной разрезной. Высота цилиндрической поверхности пальца несколько меньше, чем глубина посадочного отверстия в корпусе, тем самым достигается его надежная силовая фиксация при затягивании крепежного болта.

Базирование обрабатываемого зубчатого колеса осуществляется по торцевой поверхности бурта (установочная база), короткой цилиндрической поверхности пальца (направляющая база). Колесо устанавливается на палец и фиксируется на нем при помощи шайбы, гайки и контргайки. Последняя исключает возможность саморазвинчивания при реверсировании вращения пары инструмент-заготовка.

Корпус приспособления, эскиз конструкции которого показан на рис. 6, может быть термообработан – закален до 37,5...42,5 НРСэ, что позволяет добиться высоких эксплуатационных характеристик.

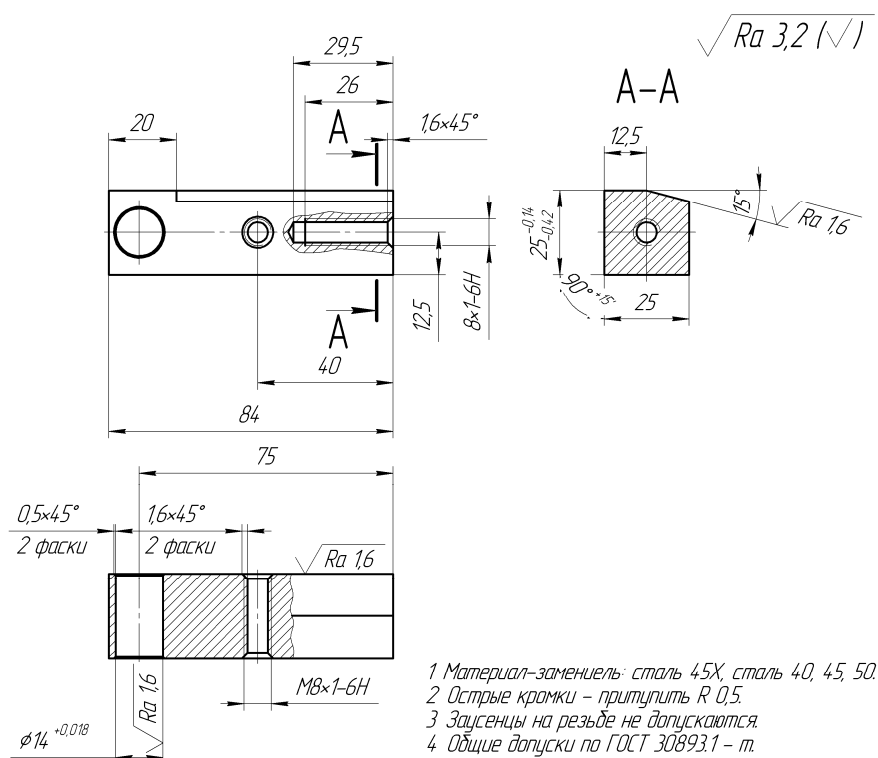
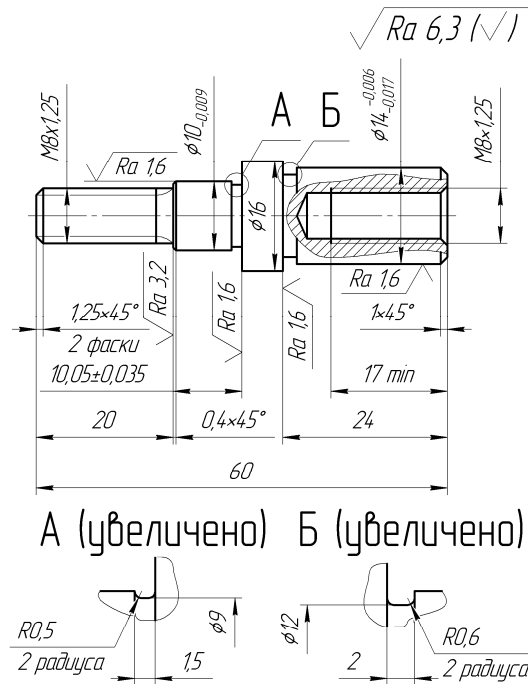


Рис. 6. Эскиз корпуса державки

Материал корпуса – сталь 40Х ГОСТ 4543-71. Базовое отверстие корпуса выполнено по 7-му качеству точности, его шероховатость должна соответствовать $Ra=1,6$ мкм.

Палец, эскиз которого показан на рис. 7, имеет протяженную гладкую цилиндрическую посадочную поверхность, предназначенную для установки в корпус. Она выполнена по 7-му качеству точности. При этом, шероховатость ее, а также примыкающей к ней торцевой поверхности должна соответствовать $Ra=1,6$ мкм.



- 1 Острые кромки – притупить.
- 2 Зазусенцы на наружной резьбе – не допускаются.
- 3 Общие допуски по ГОСТ 30893.1 – т.

Рис. 7. Эскиз детали палец

Цилиндрическая посадочная поверхность, предназначенная для установки колеса выполнена по 6-му качеству точности. Ее длина выдерживается в пределах 10-го качества точности, тем самым обеспечивая необходимый гарантированный небольшой зазор между торцами заготовки, торцом бурта и шайбой. Последняя, в свою очередь, упирается в торец резьбовой шейки пальца. Шероховатость посадочной поверхности, а также примыкающей к ней торцевой поверхности должна соответствовать $Ra=1,6$ мкм. Для повышения эксплуатационных характеристик приспособления палец выполнен из антифрикционного материала – бронзы БрОФ8,0-0,3 ГОСТ 5017-74.

Список литературы

1. Маликов А.А., Сидоркин А.В., Ямников А.С. Резание и пластическое деформирование при шевинговании-прикатывании цилиндрических колес с круговыми зубьями. СТИН, 2012. №11. С. 17-21.

2. Маликов А.А., Сидоркин А.В., Ямников А.С. Динамические характеристики шевингования-прикатывания цилиндрических колес с круговыми зубьями // *Технология машиностроения*, 2012. №2. С. 19-23.

3. 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.

4. 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.

5. 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.

6. Маликов А.А., Сидоркин А.В. Оценка вероятности повреждения шевра-прикатника при его вводе в зацепление с обрабатываемым колесом // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*, 2017. Вып. 8. Ч. 1. С. 216-222.

7. Маликов А.А., Феофилов Н.Д., Сидоркин А.В., Янов Е.С. Использование 3D-принтеров для прототипирования деталей изоляторов токосъемных узлов // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*, 2015. Вып. 8. Ч. 1. С. 17-23.

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., alan-a@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Разуваев Михаил Львович, преподаватель спец. дисциплин, alan-a@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный машиностроительный колледж им. Н. Демидова,

Смолянинов Никита Сергеевич, магистрант, smuffus19991@gmail.com, Россия, Тула, Тульский государственный университет

**SOME ASPECTS OF DESIGN-TECHNOLOGICAL SUPPORT OF EXPERIMENTAL STUDY
OF THERMAL PHYSICAL PARAMETERS OF SHAV-ROLLING PROCESS
OF CYLINDRICAL GEAR WHEELS**

A.A. Malikov, A.V. Sidorkin, M.L. Razuvaev, N.S. Smolyaninov

A number of features of the design of technological equipment for the implementation of experimental studies of heat generation in the process of combined (cutting-deforming) finishing gearing of cylindrical wheels by shav-rolling. Recommendations are made on the choice of optimal solutions that ensure a sufficiently high quality of data obtained during the experiments.

Key words: rigging, resistance thermometer, shav-rolling, temperature, CNC.

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

Sidorkin Andrey Vistrovich, candidate of technical science, docent, alan-a@mail.ru, Russia, Tula State University,

Razuvaev Mikhail Lvovich, teacher of special disciplines, alan-a@mail.ru, Russia, Tula, N. Demidov's Tula State Engineering College,

Smolyaninov Nikita Sergeevich, undergraduate, smuffus19991@gmail.com, Russia, Tula State University

УДК 621.914.2

АППРОКСИМАЦИЯ ПРОФИЛЯ ЗУБА ДИСКОВОЙ ЗУБОРЕЗНОЙ МОДУЛЬНОЙ ФРЕЗЫ СПЛАЙНАМИ БЕЗЬЕ

Р.М. Грубка, А.Н. Михайлов, И.А. Петряева

Приведенные в статье зависимости аппроксимации координат точек профиля зуба дисковой модульной фрезы сплайнами Безье пятого порядка могут быть использованы при решении пространственных технологических задач и анализе процессов, происходящих во время формообразования зубчатых венцов, в том числе и с пространственными геометриями боковой поверхности зубьев. На примере стандартного инструмента оценена точность выполнения аппроксимации геометрии профиля зуба дисковой модульной фрезы сплайном Безье пятого порядка.

Ключевые слова: дисковая модульная фреза, аппроксимация, сплайн Безье, режущая кромка, цилиндрическое зубчатое колесо, система уравнений.

В настоящее время довольно актуальным направлением усовершенствования машин и механизмов является применение в их конструкции цилиндрических зубчатых передач с пространственно-модифицированными зубьями. Различные эксплуатационные и производственные факторы определяют многообразие возможных вариантов пространственной модификации зубьев. При этом процессы, происходящие во время формообразования зубчатых венцов и во время эксплуатации изделий с зубчатыми венцами со сложной геометрией боковых поверхностей зубьев, обуславливают необходимость совершенствовать существующие и разрабатывать новые методики их математического описания.

Сложность геометрии самих изделий, геометрии режущего инструмента, а также кинематики относительных движений инструмента и заготовки затрудняют анализ процессов зубообработки рассматриваемых зубчатых венцов. В процессе обработки на зуборезный инструмент действуют значительные и неравномерно распределенные по режущей кромке нагрузки. Анализ закономерностей изменения параметров срезаемого слоя и силового нагружения режущих кромок инструментов, особенно при решении пространственных технологических задач на различных этапах технологического процесса, может способствовать интенсификации режимов резания, выравниванию нагрузки, повышению качества обработки зубчатых венцов, управлению параметрами поверхностного слоя обрабатываемых поверхностей, совершенствованию геометрии режущей части инструмента, совершенствованию технологического оборудования и процессов формообразования изделий с зубчатыми венцами.

Поэтому, актуальной является задача детального анализа закономерностей процессов формообразования зубчатых венцов со сложной геометрией, определения зависимостей для описания геометрии рабочих поверхностей зубьев и режущих инструментов с использованием возможностей современных компьютерных технологий.

В настоящее время достаточно хорошо разработаны способы задания геометрии профиля инструмента, в том числе и зуборезного, такого как дисковая модульная фреза. Координатным способом профиль зуба дисковой модульной фрезы принято задавать в виде радиусов окружностей в сечении поверхностью параллельной торцовой поверхности фрезы и расстояний до этих сечений от оси симметрии фрезы или в виде таблицы значений координат [1, 2]. Т.е. задание профиля координатами выполняется дискретно. Такой способ применяется при построении двухмерных изображений, при этом применение автоматических расчетов с описанием координат точек принадлежащих режущей кромке инструмента весьма затруднено, поскольку результаты расчетов могут быть получены для ограниченного количества таких точек.

Второй из наиболее известных способов задания геометрии профиля зуборезного инструмента - матрично-векторный, позволяет задавать множество точек принадлежащих режущей кромке инструмента. В этом случае геометрия режущей части инструмента задается в виде функций координат точек, что позволяет автоматизировать расчеты и получать непрерывную последовательность значений координат точек принадлежащих режущей кромке инструмента [3, 4, 5]. Однако, в случае сложной геометрии режущей кромки, характерной для зуборезного инструмента, когда кромка состоит из нескольких участков с различной геометрией (сопряжения прямолинейных участков, дуг окружностей и эвольвентного участка) каждый отдельный участок описывается собственной системой уравнений. Это в свою очередь ведет к увеличению количества расчетных модулей и

выполняемых операций в соответствии с количеством участков на режущей кромке. Такое рассмотрение участков в трехмерных постановках технологических задач не позволяет в одном расчетном модуле или подпрограмме рассчитать некоторые величины, например параметры среза, в местах сопряжения двух соседних участков режущей кромки фрезы.

В прогрессивных трехмерных постановках технологических задач при анализе взаимодействия режущего инструмента со сложной геометрической формой профиля и заготовки следует рассматривать аналитически описанные гладкие, дважды и более дифференцируемые кривые, с минимальным количеством управляемых элементов.

Известен универсальный способ описания геометрии профиля зуба цилиндрического зубчатого колеса с применением кривых Безье [6], которые широко используются в системах автоматизированного проектирования благодаря ряду их свойств [7, 8].

Таким образом, сложность геометрии режущей кромки дисковой модульной фрезы, состоящей из сопряжений прямолинейного участка (или нескольких участков), дуг окружностей и эвольвентного участка не позволяет в полной мере использовать автоматические методы расчета таких параметров как параметры срезаемого слоя ввиду ограниченности существующих методов описания геометрии режущей кромки инструмента.

Геометрия режущей кромки дисковой модульной фрезы зависит от величины модуля и количества зубьев обрабатываемого зубчатого колеса. В нормативно-технической документации на дисковые модульные фрезы приводится три варианта геометрии режущей кромки [2]. В данной статье рассмотрим геометрию профиля зуба дисковой модульной фрезы для числа зубьев обрабатываемого колеса от 80 шт. рис. 1.

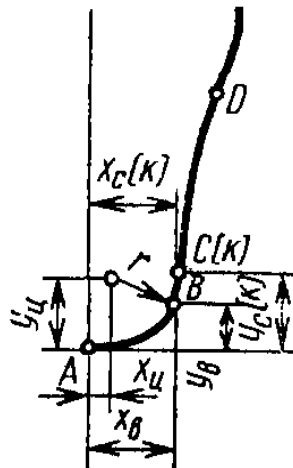


Рис. 1. Профиль зуба дисковой зуборезной модульной фрезы при $z \geq 80$

Профиль зуба дисковой модульной фрезы, предназначенной для обработки зубчатых колес с числом зубьев от 80 шт состоит из: прямолинейного участка, дуги окружности и эвольвентного участка (рис. 1.). Гео-

метрия участков задается в нормативно-технической документации таблично - координатами узловых точек, для участка дуги окружности так же задаются координаты центра окружности [2].

Участки профиля зуба фрезы можно аппроксимировать с высокой степенью точности сплайнами Безье. Прямолинейный участок профиля зуба можно описать сплайном Безье первого порядка для чего необходимо задать координаты двух точек, определяющих концы рассматриваемого отрезка. Для аппроксимации дуги окружности и эвольвентного участка необходимо использовать сплайны Безье третьего порядка и в этом случае необходимо задаваться 4 точками на каждой кривой. Исходя из геометрии рассматриваемого профиля зуба дисковой модульной фрезы для его аппроксимации сплайн Безье не менее чем 5 порядка.

Значение координат точек принадлежащих сплайну Безье произвольного порядка определяется зависимостью вида [7, 8]:

$$P(\lambda) = \sum_{i=0}^N J_i^N(\lambda) \cdot P_i, \quad (1)$$

где λ – параметр сплайна Безье, $0 \leq \lambda \leq 1$; N – степень полинома; P_i – координаты опорных точек, мм; $J_i^N(\lambda)$ – аппроксимирующие многочлены Бернштейна

$$J_i^N(\lambda) = C_i^N \cdot \lambda^i \cdot (1-\lambda)^{N-i}, \quad (2)$$

где C_i^N – биномиальные коэффициенты

$$C_i^N = \frac{N!}{i!(N-i)!}, \quad (3)$$

Найдя биномиальные коэффициенты (3) и аппроксимирующие многочлены Бернштейна (2) при степени полинома $N=5$ и подставив в зависимость (1), получим уравнение для определения координат точек принадлежащих сплайну Безье пятого порядка

$$\begin{aligned} P(\lambda) = & P_0 \cdot (1-\lambda)^5 + 5P_1 \cdot \lambda \cdot (1-\lambda)^4 + 10P_2 \cdot \lambda^2 \cdot (1-\lambda)^3 + \\ & 10P_3 \cdot \lambda^3 \cdot (1-\lambda)^2 + 5P_4 \cdot \lambda^4 \cdot (1-\lambda) + P_5 \cdot \lambda^5. \end{aligned} \quad (4)$$

Подставив в зависимость (4) координаты опорных точек P_i , получим систему уравнений для определения координат точек профиля зуба дисковой модульной фрезы

$$\left. \begin{aligned} X(\lambda) = & X_{P_0} \cdot (1-\lambda)^5 + 5X_{P_1} \cdot \lambda \cdot (1-\lambda)^4 + 10X_{P_2} \cdot \lambda^2 \cdot (1-\lambda)^3 + \\ & 10X_{P_3} \cdot \lambda^3 \cdot (1-\lambda)^2 + 5X_{P_4} \cdot \lambda^4 \cdot (1-\lambda) + X_{P_5} \cdot \lambda^5; \\ Y(\lambda) = & Y_{P_0} \cdot (1-\lambda)^5 + 5Y_{P_1} \cdot \lambda \cdot (1-\lambda)^4 + 10Y_{P_2} \cdot \lambda^2 \cdot (1-\lambda)^3 + \\ & 10Y_{P_3} \cdot \lambda^3 \cdot (1-\lambda)^2 + 5Y_{P_4} \cdot \lambda^4 \cdot (1-\lambda) + Y_{P_5} \cdot \lambda^5. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

В систему уравнений (5) входит 9 неизвестных, это параметр сплайна λ и координаты опорных точек $X_{p_1} - X_{p_4}$, $Y_{p_1} - Y_{p_4}$. При решении системы задаются координаты точек принадлежащих профилю зуба $X(\lambda)$ и $Y(\lambda)$. Записав уравнения системы (5) для координат 8-ми точек принадлежащих профилю зуба $X(\lambda_i)$ и $Y(\lambda_i)$ дисковой модульной фрезы, в том числе и для координат точек начала и конца кривой профиля X_{p_0} и X_{p_5} , Y_{p_0} и Y_{p_5} , получим систему уравнений для определения неизвестных параметров и величин входящих в систему уравнений (5)

$$\left. \begin{aligned} X(\lambda_0) &= X_{P_0} \cdot (1-\lambda_0)^5 + 5X_{P_1} \cdot \lambda_0 \cdot (1-\lambda_0)^4 + 10X_{P_2} \cdot \lambda_0^2 \cdot (1-\lambda_0)^3 + \\ &10X_{P_3} \cdot \lambda_0^3 \cdot (1-\lambda_0)^2 + 5X_{P_4} \cdot \lambda_0^4 \cdot (1-\lambda_0) + X_{P_5} \cdot \lambda_0^5; \\ Y(\lambda_0) &= Y_{P_0} \cdot (1-\lambda_0)^5 + 5Y_{P_1} \cdot \lambda_0 \cdot (1-\lambda_0)^4 + 10Y_{P_2} \cdot \lambda_0^2 \cdot (1-\lambda_0)^3 + \\ &10Y_{P_3} \cdot \lambda_0^3 \cdot (1-\lambda_0)^2 + 5Y_{P_4} \cdot \lambda_0^4 \cdot (1-\lambda_0) + Y_{P_5} \cdot \lambda_0^5; \\ &\dots\dots\dots \\ X(\lambda_7) &= X_{P_0} \cdot (1-\lambda_7)^5 + 5X_{P_1} \cdot \lambda_7 \cdot (1-\lambda_7)^4 + 10X_{P_2} \cdot \lambda_7^2 \cdot (1-\lambda_7)^3 + \\ &10X_{P_3} \cdot \lambda_7^3 \cdot (1-\lambda_7)^2 + 5X_{P_4} \cdot \lambda_7^4 \cdot (1-\lambda_7) + X_{P_5} \cdot \lambda_7^5; \\ Y(\lambda_7) &= Y_{P_0} \cdot (1-\lambda_7)^5 + 5Y_{P_1} \cdot \lambda_7 \cdot (1-\lambda_7)^4 + 10Y_{P_2} \cdot \lambda_7^2 \cdot (1-\lambda_7)^3 + \\ &10Y_{P_3} \cdot \lambda_7^3 \cdot (1-\lambda_7)^2 + 5Y_{P_4} \cdot \lambda_7^4 \cdot (1-\lambda_7) + Y_{P_5} \cdot \lambda_7^5. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Выполним расчеты по определению параметров сплайна, который аппроксимирует профиль зуба дисковой модульной фрезы предназначенной для обработки зубчатого венца с числом зубьев 80 шт. и модулем 3 мм. В расчетах будем использовать координаты точек принадлежащих левому профилю режущего инструмента приведенные в таблице 1 [2]. Точки 0 и 1 принадлежат отрезку, точки с 1 по 4 – участку дуги профиля, точки с 4 по 27 - эвольвентному участку.

В нормативно-технической документации дуга задается центром и двумя точками [2]. Для аппроксимации сплайном участка дуги необходимо определить координаты еще двух точек принадлежащих ей. Определим недостающие координаты точек, используя уравнение окружности

$$y^2 - 2 \cdot y_u \cdot y + (x - x_u)^2 = 0,$$

где x_u и y_u - координаты центра участка дуги профиля зуба, мм; r - радиус дуги участка профиля, мм.

Решив уравнение (8) получим два корня:

$$y_{1,2} = \frac{2 \cdot y_u \pm \sqrt{(2 \cdot y_u)^2 - 4 \cdot (x - x_u)^2}}{2}.$$

Один из корней позволит определить координаты точек принадлежащих участку дуги профиля зуба дисковой модульной фрезы. Подставляя значения x_u , y_u и x_B , с учетом того что в нормативно-технической докумен-

тации приведены безразмерные значения координат точек отнесенные к модулю и увеличенные на 100, определим соответствующую им координату y : т. 2 при $x = -0,575\text{мм}$, $y = 0,097\text{мм}$; т. 3 при $x = -1,095\text{мм}$, $y = 0,44\text{мм}$. Результаты расчетов дополнительных координат точек принадлежащих участку дуги заносим в табл.1.

Таблица 1

**Координаты точек на профиле зуба дисковой модульной фрезы
при числе зубьев нарезаемого колеса от 80шт, модуль 3 мм**

№ п/п	Табличные значения координат точек на профиле		Значения координат точек сплайна				
	X, мм	Y, мм	λ	X(λ), мм	$\Delta X(\lambda)$, %	Y(λ), мм	$\Delta Y(\lambda)$, %
0	0	0	-	-	-	-	-
1	-0,055	0	-	-	-	-	-
2	-0,575	0,097	0,10856	-0,575	0,011	0,097	0,026
3	-1,095	0,440	0,28668	-1,095	$3,38 \times 10^{-3}$	0,440	$8,55 \times 10^{-3}$
4	-1,441	1,031	0,53051	-1,441	$1,75 \times 10^{-3}$	1,031	$6,87 \times 10^{-3}$
5	-1,489	1,191	0,57027	-1,495	0,393	1,191	$5,08 \times 10^{-3}$
6	-1,582	1,489	0,62727	-1,589	0,456	1,489	$6,74 \times 10^{-3}$
7	-1,677	1,788	0,67056	-1,683	0,311	1,788	$8,49 \times 10^{-3}$
8	-1,776	2,087	0,70548	-1,779	0,121	2,087	$7,75 \times 10^{-3}$
9	-1,877	2,385	0,73491	-1,878	$2,39 \times 10^{-3}$	2,385	$5,57 \times 10^{-3}$
10	-1,982	2,684	0,76047	-1,98	-0,099	2,684	$8,01 \times 10^{-3}$
11	-2,089	2,982	0,78312	-2,086	-0,161	2,982	$4,68 \times 10^{-3}$
12	-2,199	3,28	0,80351	-2,195	-0,169	3,280	$6,56 \times 10^{-3}$
13	-2,311	3,578	0,82211	-2,308	-0,158	3,578	$8,12 \times 10^{-3}$
14	-2,368	3,727	0,83083	-2,365	-0,144	3,727	$6,90 \times 10^{-3}$
15	-2,485	4,024	0,8473	-2,482	-0,13	4,025	$5,19 \times 10^{-3}$
16	-2,604	4,322	0,86264	-2,602	-0,094	4,322	$8,40 \times 10^{-3}$
17	-2,725	4,619	0,877	-2,724	-0,048	4,620	$6,04 \times 10^{-3}$
18	-2,849	4,917	0,89053	-2,849	$6,36 \times 10^{-3}$	4,917	$8,67 \times 10^{-3}$
19	-2,974	5,214	0,90331	-2,977	0,073	5,214	$7,02 \times 10^{-3}$
20	-3,105	5,510	0,91545	-3,107	0,048	5,511	$8,99 \times 10^{-3}$
21	-3,236	5,807	0,927	-3,239	0,087	5,807	$6,55 \times 10^{-3}$
22	-3,370	6,104	0,93804	-3,373	0,101	6,104	$7,72 \times 10^{-3}$
23	-3,506	6,400	0,9486	-3,510	0,112	6,400	$5,55 \times 10^{-3}$
24	-3,644	6,696	0,95875	-3,648	0,111	6,697	$8,55 \times 10^{-3}$
25	-3,928	7,288	0,9779	-3,931	0,086	7,288	$7,07 \times 10^{-3}$
26	-4,073	7,583	0,98696	-4,075	0,057	7,583	$5,29 \times 10^{-3}$
27	-4,295	8,026	1,00002	-4,296	$8,11 \times 10^{-3}$	8,026	$8,66 \times 10^{-3}$

Подставив в левую часть уравнений системы (6) вместо функций $X(\lambda_i)$ и $Y(\lambda_i)$ значения координат точек участков профиля дисковой модульной фрезы с номерами: 0, 1, 2, 3, 4, 9, 18 и 27 получим систему для определения параметров сплайна Безье пятого порядка описывающего геометрию кривой профиля зуба рассматриваемой дисковой модульной фрезы. Данную систему можно решить численными методами в математическом пакете MathCAD. В результате расчета получим неизвестные входящие в систему уравнений (6): координаты опорных точек, в мм - $Xp_1=-1,3298$, $Xp_2=-1,2041$, $Xp_3=-1,7856$, $Xp_4=-0,8106$, $Yp_1=-0,0202$, $Yp_2=1,1725$, $Yp_3=0,4725$, $Yp_4=1,0743$; параметр сплайна Безье - $\lambda_0=0$, $\lambda_1=8,49428 \times 10^{-3}$, $\lambda_2=0,10854$, $\lambda_3=0,28666$, $\lambda_4=0,53049$, $\lambda_5=0,7349$, $\lambda_6=0,89051$, $\lambda_7=1$

Подставив полученные в результате решения системы уравнений (6) координаты опорных точек в систему уравнений (5) получим зависимости для определения координат точек описывающих геометрию профиля зуба дисковой модульной фрезы, предназначенной для обработки цилиндрических зубчатых колес с числом зубьев от 80шт и модулем 3 мм:

$$\left. \begin{aligned} X(\lambda) &= -6,649\lambda \cdot (1-\lambda)^4 - 12,041\lambda^2 \cdot (1-\lambda)^3 - \\ &- 17,856\lambda^3 \cdot (1-\lambda)^2 - 4,053\lambda^4 \cdot (1-\lambda) - 4,295\lambda^5; \\ Y(\lambda) &= -0,101\lambda \cdot (1-\lambda)^4 + 11,725\lambda^2 \cdot (1-\lambda)^3 + \\ &+ 4,725\lambda^3 \cdot (1-\lambda)^2 + 5,372\lambda^4 \cdot (1-\lambda) + 8,026\lambda^5. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Выполнив расчеты по зависимостям (7), изменяя параметр сплайна λ от 0 до 1 с шагом 0,1, получим координаты точек принадлежащих сплайну, который описывает профиль зуба дисковой модульной фрезы табл. 2. По результатам расчета строим сплайн в Декартовой системе координат рис. 2.

Таблица 2

Результаты расчетов координат точек сплайна

№ п/п	1	2	3	4	5	6
λ	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
$X(\lambda)$, мм	0	-0,539	-0,889	-1,12	-1,278	-1,403
$Y(\lambda)$, мм	0	0,083	0,265	0,467	0,674	0,93
№ п/п	7	8	9	10	11	
λ	0,6	0,7	0,8	0,9	1	
$X(\lambda)$, мм	-1,541	-1,762	-2,175	-2,943	-4,295	
$Y(\lambda)$, мм	1,334	2,036	3,227	5,136	8,026	

Из рис. 2 видно, что полученные параметры сплайна позволяют достаточно точно аппроксимировать профиль зуба дисковой модульной фрезы сплайном Безье 5-го порядка. Выполним оценку точности аппрок-

симации профиля зуба фрезы сплайном, для чего определим параметр сплайна λ , соответствующий заданному табличному значению координаты Y , подставив во второе уравнение системы (5) соответствующее значение координаты Y

$$Y(\lambda) = Y_{P_0} \cdot (1-\lambda)^5 + 5Y_{P_1} \cdot \lambda \cdot (1-\lambda)^4 + 10Y_{P_2} \cdot \lambda^2 \cdot (1-\lambda)^3 + 10Y_{P_3} \cdot \lambda^3 \cdot (1-\lambda)^2 + 5Y_{P_4} \cdot \lambda^4 \cdot (1-\lambda) + Y_{P_5} \cdot \lambda^5. \quad (8)$$

Уравнение (8) можно решить численными методами в математическом пакете MathCAD. Для чего составим программный блок в соответствии с блок-схемой представленной на рис. 3.

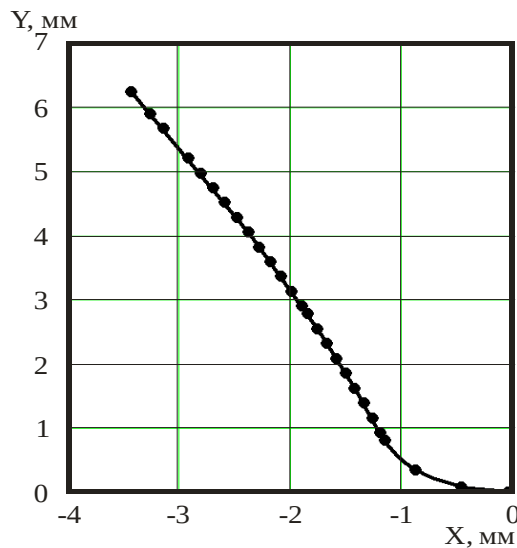


Рис. 2. Сплайн описывающий профиль зуба дисковой модульной фрезы

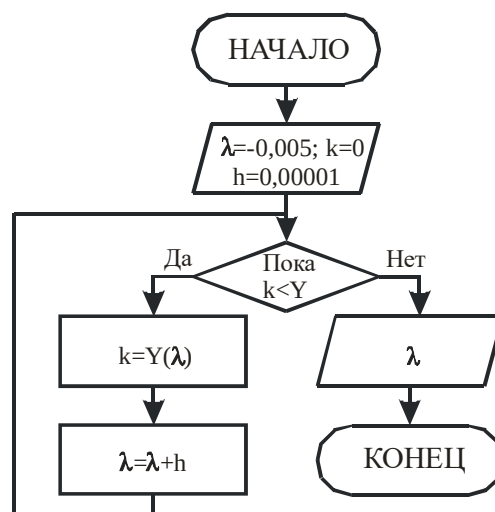


Рис. 3. Блок-схема программного модуля для решения уравнения (8)

Найденный из уравнения (8) параметр сплайна λ подставим в уравнения системы (5) и определим соответствующие значения координат $X(\lambda)$ и $Y(\lambda)$ точки сплайна. Выполним расчеты для всех координат Y точек заданных в табл. 1 по зависимостям (11) и (5). Полученные значения параметра сплайна λ и координат запишем в табл. 1. Сравним полученное значение координат $X(\lambda)$ и $Y(\lambda)$ с табличным стандартным значениями координат. Для рассчитанных значений координат точек сплайна определим относительную погрешность.

В работе приведены основные зависимости позволяющие выполнить аппроксимацию геометрии профиля зуба дисковой зуборезной модульной фрезы сплайном Безье 5-го порядка. Проведены расчеты для дисковой модульной фрезы, предназначенной для обработки цилиндрических зубчатых колес с числом зубьев от 80 шт с модулем 3 мм. Проверка точности выполнения аппроксимации позволила установить, что она выполнена с высокой точностью, т.к. относительная погрешность в определении координаты $X(\lambda)$ не превышает 0,456 %, а координаты $Y(\lambda)$ - не более 0,026 %.

Результаты, полученные в работе, могут быть использованы при решении пространственных технологических задач при анализе процессов происходящих во время формообразования зубчатых венцов, в том числе и с пространственными геометриями боковой поверхности зубьев.

Список литературы

1. Романов В.Ф. Расчет зуборезных инструментов. М.: Машиностроение, 1969. 251 с.
2. ОСТ 2И-41-14-87. Фрезы дисковые зуборезные модульные. Технические условия. 21 с.
3. Равська Н.С., Охріменко О.А. Визначення товщини зрізу при зубофрезеруванні черв'ячними фрезами зубчатих коліс // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць. Краматорськ, вип. №28, 2011. С. 3-12.
4. Андросов С.П. Уравнение режущих кромок червячной модульной фрезы // Приволжский научный вестник. 2013. 2(18). С.4-7.
5. Отт О.С. Формирование эвольвентных поверхностей деталей дисковым инструментом // Вестник МГТУ Станкин. 2010, №3. С. 67-71.
6. Воронцов Б.С. Математическое обеспечение интерактивного синтеза передач зацеплением // Сборник научных трудов "Вестник НТУ "ХПИ" : Проблеми механічного приводу №27 - Вестник НТУ "ХПИ", 2010. С. 49- 54.
7. Роджерс, Д., Адамс, Дж. Математические основы машинной графики. М.: Мир, 2001. 604 с.

8. Белов В.В. Компьютерная реализация решения научно-технических и образовательных задач: учебное пособие / В.В. Белов, И.В. Образцов, В.К. Иванов, Е.Н. Коноплев // Тверь: ТвГТУ, 2015. 108 с. [Электронный ресурс] URL: <https://www.sunspire.ru/articles/> (дата обращения 5.06.2017).

Грубка Роман Михайлович, канд. техн. наук, доц., grubka_roman@mail.ru, ДНР, Донецк, Донецкий национальный технический университет,

Михайлов Александр Николаевич, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой, tm@fimm.donntu.org, ДНР, Донецк, Донецкий национальный технический университет,

Петряева Ирина Алексеевна, канд. техн. наук, ассист., irina_petryaeva@mail.ru, ДНР, Донецк, Донецкий национальный технический университет

APPROXIMATION TOOTH PROFILE BY DISK MODULAR MILLING CUTTER WITH BEZIER SPLINES

R.M. Grubka, A.N. Mikhaylov, I.A. Petryaeva

The article presents the dependencies for the approximation of points coordinates belonging to the profile of disk modular milling cutter with Bézier splines of the fifth order. It can be used in solving spatial technological problems and analyzing the processes of shaping the toothed rims with spatial geometry of the teeth lateral surface. Using the example of a standard tool, the accuracy of the approximation of the profile geometry of disk modular milling cutter with a Bézier spline of the fifth order is estimated.

Key words: disk modular milling cutter, approximation, Bezier spline, cutting edge, cylindrical gear wheel, system of equations

Grubka Roman Mikhailovich, candidate of technical science, docent, grubka_roman@mail.ru, DPR, Donetsk, Donetsk National Technical University,

Mikhaylov Alexcandr Nicolayevich, doctor of technical science, professor, manager of department, tm@fimm.donntu.org, DPR, Donetsk, Donetsk National Technical University,

Petryaeva Irina Alexceevna, candidate of technical science, assistant, irina_petryaeva@mail.ru, DPR, Donetsk, Donetsk National Technical University.

ТЕХНОЛОГИИ АУТЕНТИФИКАЦИИ ЗАЩИТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПОЛИГРАФИЧЕСКОЙ ПРОДУКЦИИ

Я.Р. Голубничая, Н.Е. Проскуряков

Рассмотрены технологические решения, предназначенные для проверки подлинности защищенной полиграфической продукции (акцизных марок, идентификационных документов, банкнот и др.) с использованием смартфона. Показано, что используя возможности смартфонов для визуальных способов контроля, можно достаточно просто выявлять фальшивые денежные знаки и документы на уровне обычных потребителей.

Ключевые слова: смартфон, мобильная аутентификация, проверка подлинности, защищенная полиграфия, акцизная марка, ID-документ, банкноты.

Для нормального функционирования любой системы (в том числе паспортной, торговой, денежной) необходим постоянный объективный контроль подлинности и дальнейшие корректировки по результатам контроля. Системы наличного денежного оборота, торговли и защищенного документооборота очень важны, притягательны для атак, нуждаются в мощной защите и контроле. Функции контроля осуществляют специальные органы, укомплектованные подготовленным персоналом и оборудованием, но с документами, товарами и деньгами имеет дело подавляющее большинство населения. С появлением и развитием цифровых технологий и мобильной связи появилась возможность оперативной мобильной проверки населением подлинности документов, банкнот и товаров. Мобильная аутентификация защитных элементов пока только развивается, но она весьма перспективна, разрабатывается и тестируется рядом заинтересованных структур во многих странах, а в некоторых уже широко используется. Этот метод прост в применении и достаточно дешев, а привлечение широких масс потребителей к проверке подлинности даст несомненный эффект и значительно уменьшит количество подделок и контрафакта [1]. Проверка может осуществляться двумя методами: с привлечением только смартфона и с помощью смартфона и мобильной связи с удаленной базой данных. Очевидно, что второй способ более действенный и надежный, но только при наличии устойчивой мобильной связи.

АО «Гознак» является одним из мировых лидеров среди производителей защищенной полиграфической продукции. Гознак производит высокотехнологичные защитные элементы (самостоятельно или по заказу на сертифицированных предприятиях), разрабатывает идентификационное программное обеспечение. Система мобильной аутентификации акцизных товаров включает в себя смартфон, базу данных и идентификационную марку [2]. Смартфон должен иметь возможность считать данные с QR-кода марки, отправить запрос на сервер, получить ответ и довести его до поль-

зователя. Для этого необходимо наличие камеры достаточного разрешения, значительные вычислительные способности и специальное программное обеспечение. Идентификационная марка должна быть персонализирована. Персонализация марки производится методом струйной печати двумерным штрих-кодом. Код содержит данные о продукте, производителе и уникальный серийный номер акцизной марки. На марку (обычно на фольгу или на участок защитной нити, видимый в окне) методом дегаллизации наносится проверочный код (рис. 1). Это сгенерированная случайная последовательность букв и цифр. Проверочный код формируется и записывается в базу данных. С системы персонализации, органично встроенной на Гознаке в линию производства акцизных марок, информация записывается в базу данных на хорошо защищенном сервере.



Рис. 1. Идентификационная марка

Алгоритм проверки (рис. 2) состоит в следующем: потребитель устанавливает с официального сайта АО «Гознак» приложение «Проверка идентификационных марок»; потребитель сканирует 2D-штрих-код на марке; приложение определяет уникальный серийный номер марки и передает его на сервер, который по базе определяет присвоенный этой марке проверочный код и передает его на смартфон; потребитель визуально сравнивает ответ с проверочным кодом на нити.



Рис. 2. Проверка подлинности марки с помощью смартфона

В базе данных фиксируется количество запросов по серийному номеру марки с определенных IP-адресов и осуществляется приблизительная геолокация. На основании этих данных можно уже установить наличие контрафакта и определить его примерное местонахождение.

С 2005 года в Российской Федерации функционирует единая автоматизированная информационная система (ЕГАИС) по обороту подакцизных товаров, в основном в фискальных целях. АО «Гознак» проводит постоянную работу по совершенствованию защитных элементов, методик и оборудования для их проверки. При изготовлении акцизных марок (рис. 3, а) использованы: QR-код; припрессовка голографической медной фольги с повторяющимися деметаллизированным узором и надписями; специальная защитная нить в нерегулярном окне с поляризационным цветным изображением; элементы машинного контроля [3]. По договору с оргкомитетом Олимпиады-2014 в г. Сочи АО «Гознак» разработал и внедрил высокотехнологичную систему проверки подлинности защитных элементов [4, 5]. Полосовая голограмма под разными углами показывает логотипы Олимпийских или Паралимпийских игр (рис. 3, б). Технология успешно прошла апробацию при продаже лицензионной продукции с символикой Олимпиады. АО «Гознак» является производителем контрольных идентификационных знаков (КиЗ) для маркировки меховых изделий (рис. 3, в). Учитывая специфику продукта, особое внимание уделялось не только защитным, но и декоративным свойствам КиЗ (в дизайн добавлены узоры, выборочное лакирование и печать металлизированными красками). Защита получилась сложной для подделки и простой для определения подлинности. КиЗ выпускаются в разных вариантах: вшивные, накладные или клеевые и содержат QR-код, радиочастотную метку (RFID) и отметку о ее наличии [6].

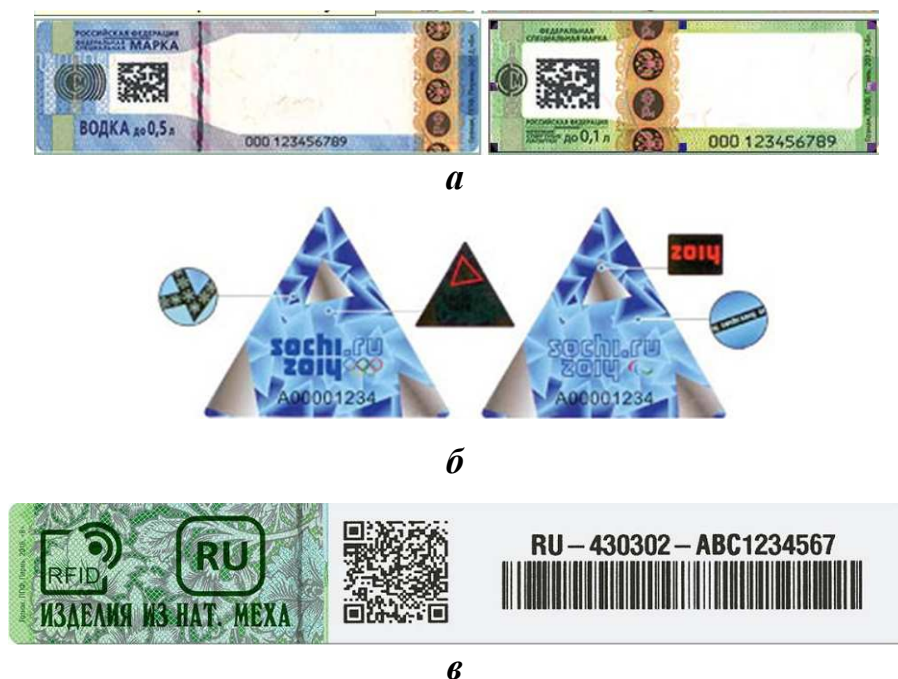


Рис. 3. Образцы защитных знаков: а - акцизные марки; б – голограмма для защиты товаров с символикой Олимпиады-2014; в - КиЗ для меховых изделий

С 2014 года ведутся работы по внедрению подобного сервиса для лекарственных препаратов. На упаковку лекарства наносится двухмерный код DataMatrix, который считывается аптечным сканером или смартфоном с установленным соответствующим приложением и проверяется по базе данных. Данная технология достаточно дешева и вызовет удорожание лекарств не более чем на 1%. Стоимость сканера для одной аптеки обойдется примерно в 20 тыс. рублей, оборудование для маркировки упаковок лекарств в фармацевтических компаниях – в 30...150 тыс. евро. Учитывая положение на рынке лекарств в России, такая система действительно необходима. Пока она тестируется в нескольких областях шести регионов, но планируется, что при полномасштабном внедрении в систему будет включено свыше 350 тысяч организаций (производители лекарств, лечебные учреждения и аптеки) с мониторингом нескольких миллиардов упаковок медикаментов ежегодно.

Проверка подлинности документов и банкнот строится на таком же принципе. Защищенные документы и банкноты содержат комплекс защитных элементов, и для проверки подлинности могут использоваться все машиночитаемые элементы. В машиночитаемый код могут зашифровываться все необходимые данные, в том числе и биометрические. Перспективным представляется использование системы распознавания текста и образов. Обработка изображений достаточного разрешения по определенному алгоритму и сравнение (по контрольным суммам) с эталонным, хранящимся в базе данных, может точно идентифицировать документ.

Компания OVD KINEGRAM (группа KURZ) разработала приложение для мобильной проверки документов, оснащенных QR-кодами (рис. 4). Программа KINEGRAM[®] DIGITAL Seal (доступна для Windows, iOS и Android) проверяет персональные данные владельца: сканирует QR-код (он персонализируется во время персонализации документа), проверяет данные чипа NFS и машиночитаемой зоны, функции QR-кода и защитной кинеграммы, связывается с базой данных и дает заключение о подлинности документа. Кроме того, программа имеет собственную базу данных и может давать частичное заключение в режиме офлайн, без мобильной связи.



Рис. 4. Программа KINEGRAM[®] DIGITAL Seal для ID-документов [8]

Французская фирма Surys в конце 2016 года презентовала технологию Фотометрикс (PhotometricsTM) для автоматической аутентификации портрета владельца ID-документа. Технология основана на измерении характеристик изображения по уникальному алгоритму и кодировании их в код PhotometricsTM. В код могут добавляться биометрические и другие данные, которые могут быть считаны с помощью приложения смартфоном. Часть информации доступна офлайн, а более полные данные хранятся в базе данных на защищенном сервере. Эта технология удобна для небольших организаций, не имеющих специального оборудования для верификации документов, и рядовых граждан. Ранее разработанная компанией Surys подобная технология уже применяется в Малайзии при проверке подлинности медицинских препаратов [9].

Похожую технологию представила российская фирма АBBYY. Продукты АBBYY Digital Banks и АBBYY Real-Time Recognition позволяют «на лету» распознавать информацию с идентификационного документа и по селфи и базе данных однозначно подтверждать личность. Кроме документов эта технология с качественной системой распознавания образов может быть использована и для проверки товаров и банкнот [10].

Для проверки защитного комплекса банкнот создаются специализированные технологические решения и приложения, которые непрерывно совершенствуются и уже используются на рынке защищенной печати. Например, компания Jуга представила защитный признак, который считывается смартфоном (его уже применяет центральный банк Венгрии), а при поддержке Национального банка Нидерландов создано первое специализированное мобильное приложение – «Echt of Vals» для проверки подлинности евробанкнот (с отдельными режимами для банкнот разных номиналов). Российский Гознак выпустил анимированное приложение «Банкноты 2017» (доступно для Windows, iOS и Android) для популяризации публичных защитных признаков и визуального контроля подлинности новых банкнот Банка России номиналом 200 и 2000 рублей (рис. 5). Для корректной работы приложения камера смартфона должна иметь автофокус и разрешение не менее 8 Мп. Освещение должно быть достаточным (хорошим), без прямых солнечных лучей, а проверяемые банкноты не должны быть значительно загрязнены и помяты [11]. Это мобильное приложение свободно скачивается с помощью AppStore и GooglePlay и может защитить от грубых подделок. На начало февраля 2018 года данное приложение было скачано более миллиона раз.

Камера смартфона направляется на лицевую сторону банкноты, приложение определяет ее номинал и показывает анимированную картинку символов городов, изображенных на банкнотах, что указывает на номинал банкноты. Подлинность банкноты определяется по признакам подлинности при точном позиционировании изображения обеих сторон банкноты при двух ракурсах. Пока по многочисленным отзывам в интернете пользо-

ватели довольны информационной частью, но отмечают проблемы с определением подлинности, особенно не очень новых или загрязненных купюр [12]. На сегодняшний день компания продолжает тестирование и доработку приложения для возможности использования его с целью определения подлинности купюр других номиналов, находящихся в обращении.

Технологию проверки подлинности защитных элементов, основанную на принципе поляризации света с помощью тонкопленочных поляризаторов, предложило НПО «Криптен» (партнер Гознака), производящее оптические защитные элементы.



Рис. 5. Принцип работы мобильного приложения «Банкноты 2017»:
а – распознавание; б – проверка подлинности;
в – информация о защитном комплексе банкноты

Оптически переменные элементы, базирующиеся на технологии HIT (Hidden Image Technology), имеют многослойную структуру (рис. 6), они располагаются в прозрачных окнах и могут работать как на просвет,

так и в отраженном свете, причем разные защитные элементы могут располагаться с обеих сторон. При облучении поляризованным светом прямо и с поворотом на 90° изображение значительно меняется. То есть, налицо элемент первого уровня защиты. «Криптен» выпускает следующие защитные элементы с визуальными эффектами:

- Smart-HIT-M, в котором использованы поляризационные монохромные чернила, и при облучении со сдвигом на 90° темные и светлые части изображения меняются местами (рис. 7, а);

- Smart-HIT-Dynamic – еще более продвинутая защита с применением цветной GIF-анимации (рис. 7, б);

- Smart-HIT-CN – это прозрачный при обычном свете элемент, а при облучении поляризованным светом – цветное изображение, которое с изменением угла освещения меняет цвета местами (рис. 7, в).

Защитные элементы HIT комбинируются с голограммами, микро- и макроэлементами, полиграфией, лакированием, деметаллизацией. Они стойкие и надежные, могут применяться при защите документов, банкнот и товарных брендов. Защитные элементы HIT апробированы на нитях акцизных марок и КИЗах для меховых изделий. Для верификации защитных элементов, изготовленных по технологии HIT, смартфоны комплектуются LCD или LED экранами, излучающими поляризованный свет. Технология представляется очень перспективной, причем для проверки не требуется ни специальное программное обеспечение, ни база данных, ни интернет [13].

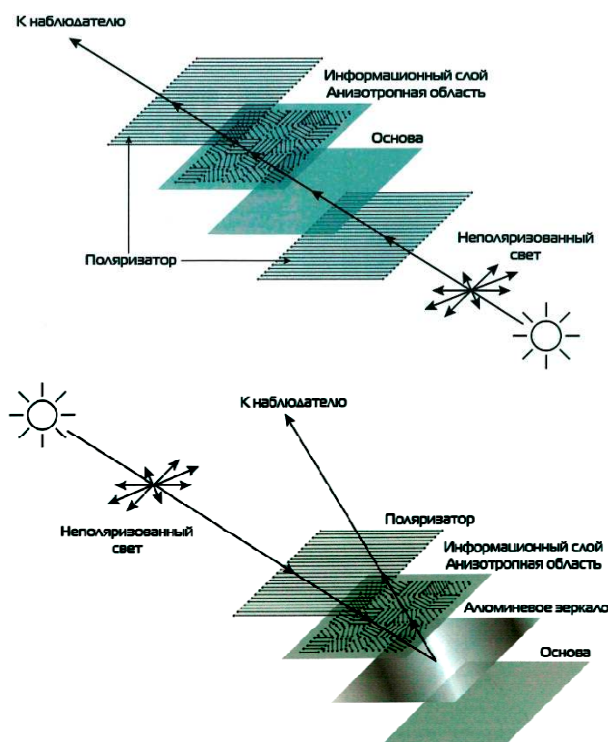


Рис. 6. Послойная конструкция защитных элементов HIT

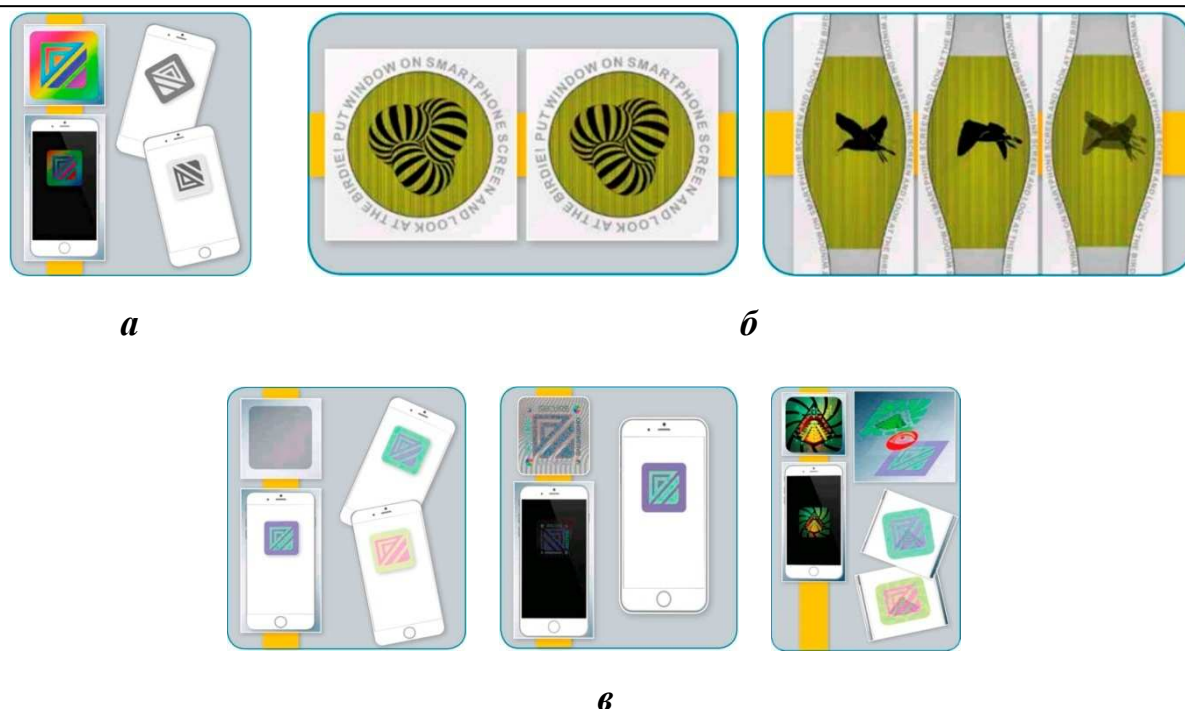


Рис. 7. Защитные элементы: а - Smart-HIT-M; б - Smart-HIT-Dynamic; в - Smart-HIT-CH (элемент; элемент в сочетании с отражательной голограммой; элемент в сочетании с фотополимерной голограммой)

В настоящее время смартфоны активно используются в платежной сфере, а также для идентификации человека (например, в интернете для предоставления доступа к определенным сервисам). Мобильная верификация становится все более востребованной и удобной для пользователей. Развивается цифровая защита документов и банкнот, которая дополняет полиграфическую и работает с ней и с программным обеспечением в комплексе. Испытания и разработки, проводимые в данной области, подтверждают возможности и значительный потенциал смартфонов для использования в целях контроля подлинности. Конечно, проверка защитных элементов с помощью мобильных устройств связи не имеет юридической силы и не может быть единственной и 100% надежной. Смартфоны осуществляют аутентификацию публичных графических признаков подлинности и не применяются, например, для проверки машиночитаемых, обеспечивающих магнитную, ультрафиолетовую и инфракрасную защиту (комплектовать смартфоны датчиками для этой цели вряд ли целесообразно). Но используя возможности смартфонов для визуальных способов контроля, можно достаточно просто выявлять фальшивые денежные знаки и документы на уровне обычных потребителей, вовлекать население в процесс проверки подлинности товаров. Если показания проверки смартфоном позволили заподозрить подделку, это может насторожить пользователя и при необходимости побудить его к принятию мер (отказаться от сделки, сооб-

щить в компетентные органы и т.д.). Для юридически значимого заключения о подлинности потребуется профессиональная экспертиза, поводом для которой также может стать дистанционная проверка с помощью смартфона.

Список литературы

1. Watermark Conference-2017: все оттенки защитных решений // Водяной знак, 2017. № 5-6. С. 12-19.
2. Проверка подлинности: марка, база данных и смартфон // Водяной знак, 2017. № 5-6. С. 20-23.
3. Федеральные специальные и акцизные марки [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: <http://goznak.ru/products/26/> (дата обращения 09.02.2018).
4. Гознак. Системы защиты бренда [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: <http://goznak.ru/products/96/> (дата обращения 11.02.2018).
5. Олимпиада под защитой // Водяной знак. 2012, № 3. С. 8-11.
6. Контрольные идентификационные знаки (КиЗ) [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: <http://goznak.ru/products/4317> (дата обращения 13.03.2018).
7. Какие наши коды: покупатели смогут проверить лекарства на «фальшивость» с помощью смартфона [Электронный ресурс]. Режим доступа URL: <https://rg.ru/2017/02/08/pokupateli-smogut-proverit-podlinnost-lekarstv-s-pomoshchiu-smartfona.html> (дата обращения 17.02.2018).
8. Integrating the secure physical credential with mobile ID processes [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: <https://www.kinegram.com/en/government-documents/kinegram-products> (дата обращения 19.03.2018).
9. Смартфон всем в помощь // Водяной знак, 2017. № 1-2. С. 40-41.
10. АБВУУ поможет удаленно идентифицировать клиентов с помощью смартфона [Электронный ресурс]. Режим доступа URL: <https://www.abbyy.com/ru-ru/news/2017/09/abbyy-pomozhet-udalенno-identificirovat-klientov-s-pomoshhju-smartfona> (дата обращения 27.03.2018).
11. Гознак представил мобильное приложение для проверки подлинности новых банкнот в 200 и 2000 рублей // Банкноты стран мира. 2018. № 2. С. 8-10.
12. Приложение «Банкноты 2017» [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: <http://goznak.ru/about/press/news/22769> (дата обращения 05.04.2018).
13. НПО «Криптен» [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: <http://www.krypten.ru/index.php> (дата обращения 09.04.2018).

Голубничая Яна Романовна, магистрант, yana_tula@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Проскуряков Николай Евгеньевич, д-р техн. наук, проф., vippne@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

MOBILE TECHNOLOGIES USED FOR AUTHENTICATION OF SECURITY FEATURES

Y.R. Golubnichaya, N.E. Proskuriakov

Technological solutions designed to verify the authenticity of protected printed products (excise stamps, identification documents, banknotes, etc.) using a smartphone are considered.

Key words: smartphone, mobile authentication, authentication, secure printing, excise stamp, ID-document, banknotes.

Golubnichaya Yana Romanovna, post-graduate student, yana_tula@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Proskuriakov Nikolay Evgenevich, doctor of technical sciences, professor, vippne@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 621.979; 621.9

АВТОМАТИЧЕСКАЯ ЗАГРУЗКА КОРКОВЫХ ПРОБОК В АВТОМАТИЧЕСКИЕ ЛИНИИ РОЗЛИВА ВИН

А.В. Болтунов, В.С. Кузнецов, Е.В. Пантюхина

Рассматриваются роторные и стационарные системы автоматической загрузки корковых пробок в автоматические линии розлива вин на базе механических бункерных загрузочных устройств.

Ключевые слова: корковая пробка, укупорка стеклянных бутылок, розлив вина, автоматическая загрузка.

Вино является одним из сложных пищевых продуктов, в котором обнаружено около 800 минеральных и органических составляющих, большинство из которых оказывают на организм человека и его здоровье благоприятное воздействие. Основными этапами производства вин являются: непосредственное производство вина и розлив его в специально подготовленную тару. Любое отклонение от требований на этапе розлива, который включает такие операции, как, ополаскивание стеклянных бутылок, розлив вина, укупорка бутылок корковыми пробками и товарное оформление бутылок, может привести к заметному ухудшению качества вина. Производительность отечественных линий розлива вин в стеклянные бутылки объемом 0,75 л составляет от 50 до 100 шт./мин и до 300 шт./мин зарубежных.

Укупорка является одним из важных этапов при розливе вина, целью которой является избежание вытекания вина из бутылки, ее герметизация, продление сроков хранения и сохранение качества вина. Для укупорки бутылок широко используют корковые пробки двух форм (рис. 1).

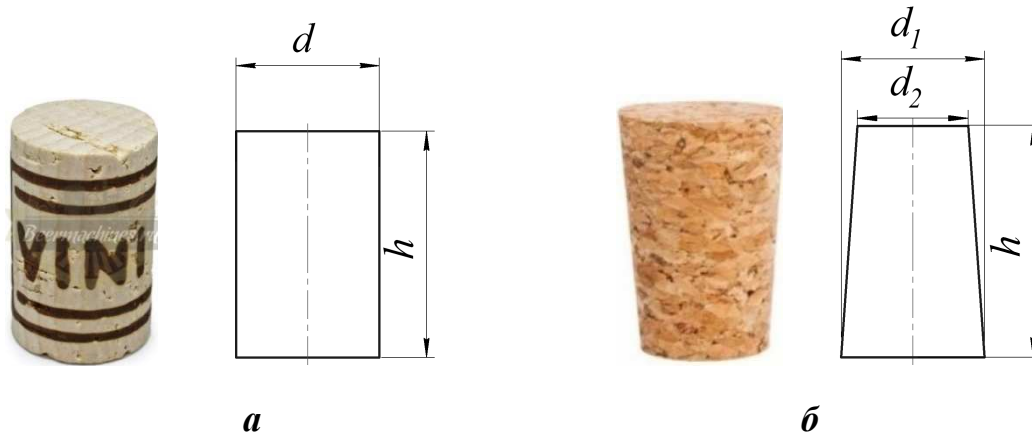


Рис. 1. Цилиндрическая (а) и коническая (б) корковые пробки

Пробки изготавливают нескольких размеров. Более длинная пробка (h до 55 мм) необходима для вин, закладываемых на хранение в течение многих лет. Пробку $h = 30-35$ мм применяют для бутылок с вином, выпускаемых в продажу с учетом реализации в течение короткого периода времени. Пробки короче $h = 30-35$ мм не рекомендуются к применению. Корковые пробки выбирают с учетом внутреннего диаметра горловин бутылок по ГОСТ 5541-2002, для избегания вытекания вина. Правильным углублением пробки в горлышко бутылки достигается герметичность укупоривания [1, 2].

Автоматическая загрузка укупорочных элементов, в том числе корковых пробок, в линии розлива обеспечиваю системы автоматической загрузки (САЗ), основным функциональным элементом которого является бункерное загрузочное устройство (БЗУ) [3].

Выделяют два класса САЗ штучных изделий: стационарные и роторные. Роторные САЗ осуществляют все свои функции в процессе непрерывного вращения и применяются только для питания изделиями роторных и роторно-конвейерных машин и линий. Надежные и стабильные эксплуатационные показатели их работы достигаются лишь при загрузке изделий с явно выраженными ключами ориентации (асимметрия внешней или внутренней формы, смещение центра масс относительно середины изделий и др.). Стационарные САЗ применяются для загрузки различных по конфигурации изделий, в том числе сложных форм, в технологические машины различного назначения, включая роторного типа [4].

В структуре САЗ различают два типа БЗУ: вибрационное или механическое. В вибрационных БЗУ ориентирование движущихся по дорожке изделий осуществляется в бункере путевыми ориентаторами с помощью упоров и трафаретов, конструкция которых зависит от геометрических и физико-механических параметров загружаемых изделий. Данная группа

методов основана на использовании явно выраженных геометрических ключей ориентации. Привод вибрационных БЗУ вызывает ощутимые и небезопасные для человека вибрации, которые особенно сильно проявляются при загрузке изделий, длина которых свыше 30 мм. Это обусловлено тем, что для надежной и стабильной работы вибрационного БЗУ при загрузке таких изделий требуется соответствующее увеличение диаметра бункера и, следовательно, мощности вибропривода БЗУ [5]. Механические БЗУ лишены указанного недостатка. Их применяют для загрузки изделий, как с явно, так и с неявно выраженными ключами ориентации. В отличие от вибрационных БЗУ, механические БЗУ могут входить в структуру, как стационарных, так и роторных САЗ. Поэтому, для автоматической загрузки линий розлива вин корковыми пробками целесообразно применять механические БЗУ.

Механическое БЗУ с возвратно-поступательно движущейся трубкой показано на рис. 2, а. Производительность таких БЗУ может достигать 2800 шт./мин при числе ходов трубки в минуту $n = 250...300 \text{ мин}^{-1}$. Наиболее универсальны, достаточно технологичны в изготовлении и хорошо komponуются в захватных механизмах БЗУ роторных САЗ захватывающие органы в виде вращающихся воронок (рис. 2, б). Производительность БЗУ с вращающимися воронками может достигать 270 шт./мин при числе оборотов в минуту $n = 270...320 \text{ мин}^{-1}$.

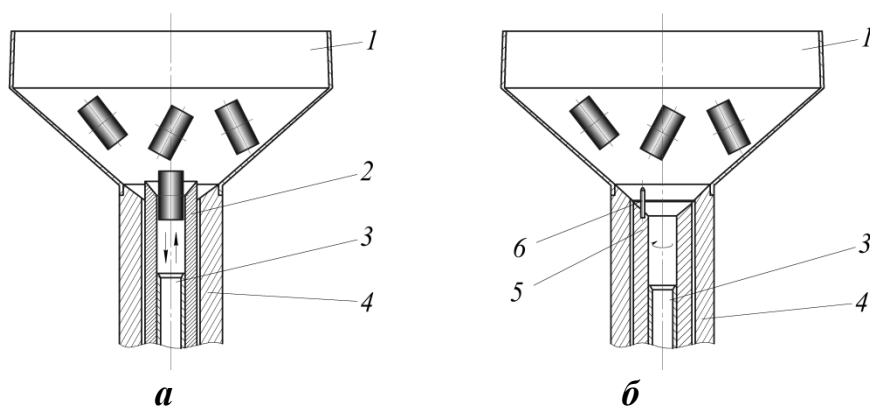


Рис. 2. Схемы бункерных загрузочных устройств с возвратно-поступательно-движущейся трубкой (а) и вращающейся воронкой (б): 1 – бункер; 2 – возвратно-поступательно движущаяся трубка; 3 – приемный лоток; 4 – корпус; 5 – вращающаяся воронка; 6 – ворошитель

Функции захвата и ориентирования в устройствах этого типа полностью совмещены (см. рис. 2). Метод совмещения этих функций, как правило, малопроизводителен вследствие более низкой вероятности захвата изделий захватывающими органами и применим для ограниченной номенклатуры изделий. Поэтому данные устройства целесообразно использовать для изделий, имеющих две и более осей симметрии.

На рис. 3 представлены конструкции механических БЗУ секторного и ножевого типа. Их основное отличие заключается в том, что основным рабочим органом секторного БЗУ (сектор) совершает возвратно-качательное движение, а основным рабочим органом ножевого БЗУ (нож) совершает возвратно-поступательное движение.

В секторном БЗУ захват и ориентация пробок осуществляются в результате маятникового движения сектора через слой пробок, находящихся в бункерной чаше. Для удаления пробок, не попавших в паз и находящихся на верхней части сектора устанавливают сбрасыватель (см. рис. 3, а). Максимальная производительность секторных БЗУ составляет 180 шт./мин при числе качаний сектора в минуту $n = 50 \dots 60 \text{ мин}^{-1}$. В ножевом БЗУ правильно ориентированные пробки поступают в лоток, а неправильно ориентированные удаляются сбрасывателем с приемника обратно в бункер (см. рис. 3, б). Максимальная производительность ножевых БЗУ может составлять 340 шт./мин при числе ходов ножа в минуту $n = 100 \dots 120 \text{ мин}^{-1}$. Коэффициент выдачи рассмотренных конструкций $\eta = 0,10 \dots 0,25$, что свидетельствует о нестабильности работы секторного и ножевого БЗУ, поэтому в последнее время конструкции этих БЗУ практически не используются.

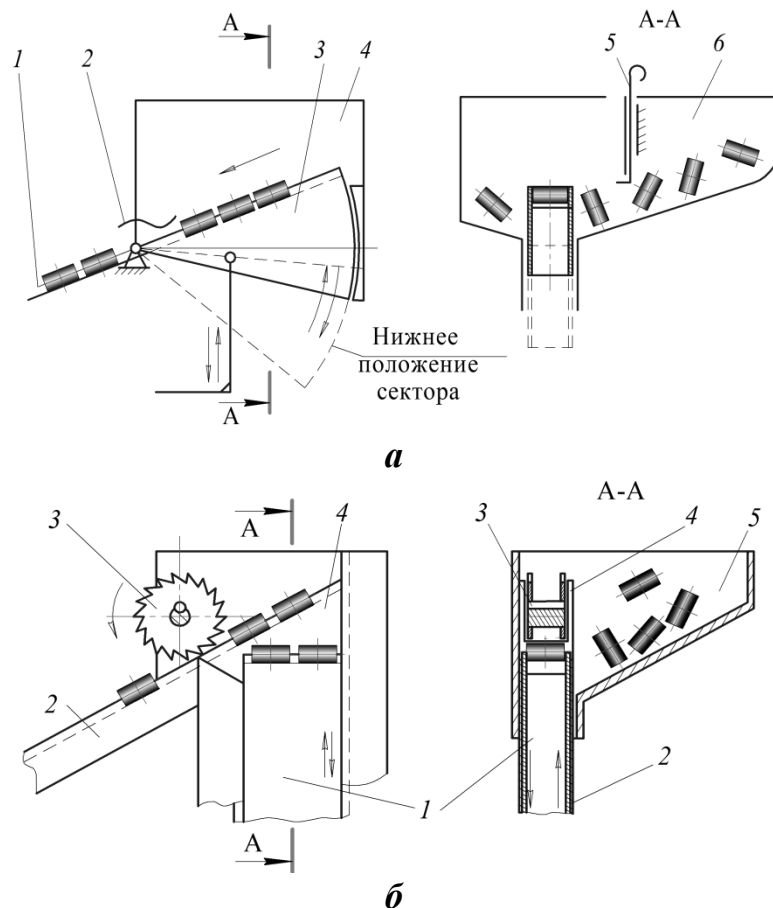


Рис. 3. Схема секторного (а) (1 – приемный лоток; 2 – сбрасыватель; 3 – сектор; 4 – бункер; 5 – заслонка; 6 – предбункер) и ножевого (б) (1 – нож; 2 – лоток; 3 – сбрасыватель; 4 – приемник; 5 – бункер) бункерных загрузочных устройств

Широкое распространение среди механических БЗУ получили дисковые БЗУ. Главным их отличием от других типов механических БЗУ является наличие вращающегося диска, по периферии которого расположены захватывающие органы. В зависимости от их расположения органов по поверхности вращающегося диска различают дисковые БЗУ с тангенциально и радиально расположенными захватывающими органами, называемыми, как правило, гнездами. Захват изделий цилиндрической формы тангенциально расположенным гнездом более производителен. Это обусловлено тем, что при вращении диска изделия, стремясь занять преимущественное положение, располагаются по его периферии образуя своей цилиндрической поверхности в направлении захватных органов.

На рис. 4 показано механическое дисковое БЗУ с гнездами, расположенными тангенциально по периферии вращающегося диска и выполненными в соответствии с конфигурацией по внешнему контуру изделия (на рис. 4 показан вариант конструкции БЗУ для цилиндрической пробки).

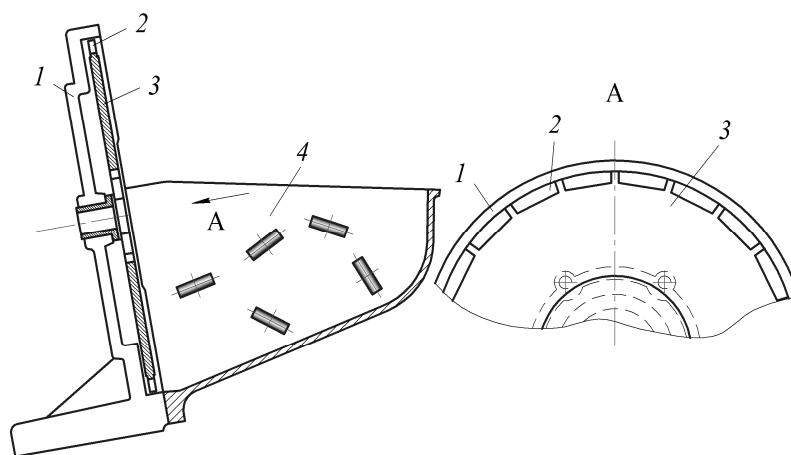


Рис. 4. Схема бункерного загрузочного устройства с тангенциальными профильными гнездами:

1 – основание диска; 2 – карман; 3 – вращающийся диск; 4 – бункер

Принцип действия БЗУ основан на том, что пробки, засыпанные в бункер 4 и запавшие в гнезда в правильном положении, помещаются в них полностью и поэтому надежно удерживаются в них. Пробки, запавшие в гнезда в не требуемом ориентированном положении, значительно выступают из гнезда, что в совокупности с большим углом наклона бункера к горизонту, способствует их выпадению под действием силы тяжести из гнезда обратно в нижнюю часть бункера БЗУ. Максимальная производительность дисковых БЗУ с тангенциальными гнездами может составлять 300 шт./мин при окружной скорости захватывающих органов $v = 0,6...0,8$ м/с; коэффициент выдачи $\eta = 0,35...0,40$ [6]. В рассмотренной конструкции БЗУ с тангенциальными гнездами по форме изделия функции захвата и ориентирования совмещены, так как захватывающий орган является также и ориентирующим.

На рис. 5 показано механическое дисковое БЗУ с радиальными гнездами и скосами. При проектировании конструкции было учтено то, что вероятность западания стержневых изделий в радиально расположенные захватывающие органы не велика вследствие того, что в процессе вращения диска БЗУ стержневые изделия стремятся лечь образующей своей цилиндрической поверхности по периферии бункера БЗУ. Для увеличения вероятности западания в гнезда засыпанных в бункер пробок по поверхности вращающегося диска выполнены скосы. Запавшие в гнезда пробки перемещаются вращающимся диском в приемник к змейковому лотку. Максимальная производительность дисковых БЗУ с радиальными гнездами может составлять 230 шт./мин при окружной скорости захватывающих органов $v = 0,15...0,2$ м/с. Коэффициент выдачи $\eta = 0,35...0,45$ [7-10].

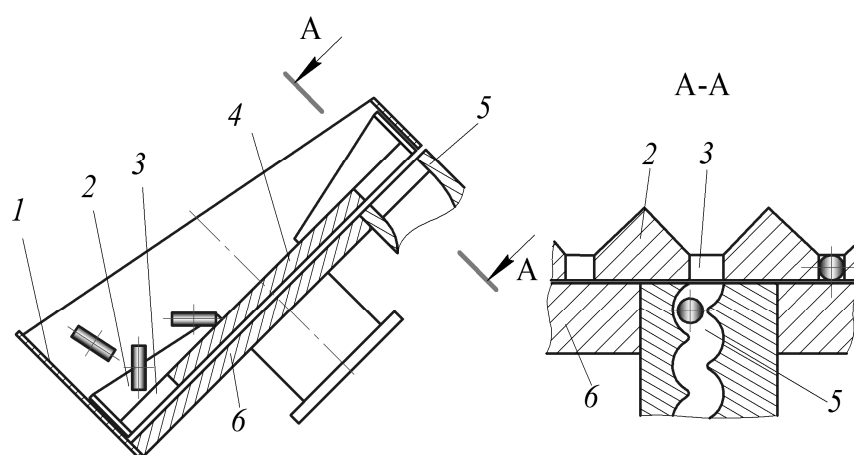


Рис. 5. Схема бункерного загрузочного устройства с радиальными гнездами и скосами: 1 – бункер; 2 – скосы; 3 – гнездо; 4 – вращающийся диск; 5 – змейковый лоток; 6 – неподвижное основание

Анализ рассмотренных конструкций механических БЗУ показал, что для автоматической загрузки наилучшим образом подходят механические дисковые БЗУ. Это обусловлено возможностью их использования для пробок с двумя или одной осью симметрии, как с явно, так и с неявно выраженной асимметрией по торцам, и надежностью загрузки корковых пробок в линии розлива вин с производительностью до 300 шт./мин.

Список литературы

1. Давыдова Е.В., Прейс В.В. Автоматизация загрузки укупорочных элементов в автоматические роторные машины для розлива жидких пищевых продуктов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Вып. 1. 2012. С. 91-102.
2. Давыдова Е.В., Прейс В.В. Автоматическая загрузка стержневых предметов обработки с неявно выраженной асимметрией по торцам / Под ред. В.В. Прейса. Тула: Изд-во ТулГУ, 2009. 112 с.

3. Системы автоматической загрузки штучных предметов обработки в технологические машины-автоматы: учебное пособие / Н.А. Усенко, В.В. Прейс, Е.В. Давыдова, Е.С. Бочарова; под ред. проф. В.В. Прейса. Тула: Изд-во ТулГУ, 2013. 310 с.

4. Гравитационные ориентаторы с маятниковым L-образным захватом в роторных ориентирующих устройствах / И.Н. Пахомов, В.В. Прейс, Е.Н. Давыдова, В.А. Крюков; под науч. ред. В.В. Прейса. Тула: Изд-во ТулГУ, 2013. 100 с.

5. Давыдова Е.В., Прейс В.В. Механические бункерные загрузочные устройства в пищевой промышленности: под науч. ред. В.В. Прейса. Тула: Изд-во ТулГУ, 2012. 168 с.

6. Давыдова Е.В., Прейс В.В., Провоторова К.Н. Математическая модель производительности дискового бункерного загрузочного устройства с тангенциальными профильными гнездами // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2014. №10. С. 7-10.

7. Давыдова Е.В., Прейс В.В. Аналитическая модель производительности бункерного загрузочного устройства с радиальными гнездами и кольцевым ориентатором // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2009. № 11. С. 23-30.

8. Голубенко В.В., Давыдова Е.В., Прейс В.В. Аналитическая модель производительности дискового зубчатого бункерного загрузочного устройства с кольцевым ориентатором // Известия Тульского государственного университета. Технические науки, 2011. Вып. 6. Ч. 2. С. 104-113.

9. Бурцев Д.В., Давыдова Е.В., Прейс В.В. Математическая модель производительности дискового бункерного загрузочного устройства с радиальными профильными гнездами // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2014. №9. С. 33-36.

10. Давыдова Е.В., Пантюхин О.В. Аналитические модели производительности бункерных загрузочных устройств для сувенирной ПЭТ-тары с неявно выраженной асимметрией // Известия Тульского государственного университета. Технические науки, 2016. Вып. 7. Ч. 2. С. 274-281.

Болтунов Александр Владимирович, магистрант, boltunovsanek@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Кузнецов Виктор Сергеевич, магистрант, viktor.kuznetsov95@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Пантюхина Елена Викторовна, канд. техн. наук, доц., elen-davidova@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

*AUTOMATIC FEEDING OF CORKS
IN AN AUTOMATIC BOTTLING LINE OF WINES*

A.V. Boltunov, V. S. Kuznetsov, E. V. Pantyukhina

Discusses rotary and stationary system of automatic over-feed of corks in an automatic bottling line of wines on the basis of mechanical bunker boot device.

Key words: cork stopper, glass bottles capping, wine bottling, automatic feeding.

Boltunov Alexander Vladimirovich, master, boltunovsanek@rambler.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Kuznetsov Viktor Sergeevich, master, viktor.kuznetsov95@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Pantuykhina Elena Viktorovna, candidate of technical science, docent, elen-davidova@mail.ru, Russia, Tula, Tula state university.

УДК 539.3

К ЧИСЛЕННОМУ РЕШЕНИЮ СТАТИЧЕСКИХ ЗАДАЧ ТЕРМОУПРУГИХ ОБОЛОЧЕК

Р.М. Бахшинян

Рассмотрена задача термоупругости ортотропной оболочки вращения, физико – механические характеристики материала которой являются функциями температуры нагрева. В основу выкладок положено предположение о параболическом законе распределения касательных напряжений по толщине оболочки. Решение полученной системы дифференциальных уравнений проводится методом дискретной ортогонализации, с помощью которого численное решение задачи сводится к устойчивому вычислительному процессу. Проведён анализ рассмотренных числовых примеров.

Ключевые слова: термочувствительная оболочка; модули упругости; сдвиговая жёсткость; численный метод.

Уравнения оболочки вращения, подверженной температурному и силовому воздействию. Рассматривается ортотропная оболочка вращения, модули упругости E_1 и E_2 , модуль сдвига G_{13} , коэффициенты Пуассона μ_{12} , μ_{21} и линейного температурного расширения β_1 , β_2 , β_3 материала которой являются произвольными функциями от температуры нагрева t . Предположено, что температурное поле, условия нагружения и закрепления оболочки симметричны относительно оси вращения z , а касательные напряжения по толщине h оболочки изменяются по параболическому закону [1]

Дифференциальные уравнения равновесия и деформации представив в форме, разрешённой относительно первых производных основных функций, в качестве которых, следуя работе [2], выбрав функции T_r , T_z , M_1 , U_r , U_z и Θ , для численного интегрирования получим систему дифференциальных уравнений осесимметричной задачи несвязанной термоупругости термочувствительной оболочки вращения с конечной сдвиговой жёсткостью, приведённую к нормальной форме

$$\frac{d\bar{X}}{ds} = B(s)\bar{X} + \bar{f}(s), \quad (1)$$

где $\bar{X}(s) = \{T_r, T_z, M_1, U_r, U_z, \Theta\}$ – вектор–столбец; $B(s) = \|b_{ji}(s)\|$ – квадратная матрица шестого порядка.

Элементы матрицы $B(s)$ имеют вид

$$\begin{aligned} b_{11} &= \frac{h^3}{\Delta_1} \left[(1-d_{31}) \sin \alpha - \frac{12}{h^3} \left(\frac{d_{35} \sin \alpha}{R_1} - d_{36} \cos \alpha \right) \right], \quad b_{13} = \frac{h^3 d_{32}}{\Delta_1}, \quad b_{14} = \frac{h^3 d_{33}}{r \Delta_1}, \quad b_{15} = 0, \\ b_{12} &= \frac{h^3}{\Delta_1} \left\{ d_{31} \cos \alpha + \frac{12}{h^3} \left[d_{35} \left(\frac{\cos \alpha}{R_1} + \frac{\sin^2 \alpha}{r} \right) + d_{36} \sin \alpha \right] \right\}, \quad b_{16} = \frac{h^3 d_{34} \sin \alpha}{r \Delta_1}, \quad b_{21} = 0, \\ b_{22} &= \frac{\sin \alpha}{r}, \quad b_{23} = b_{24} = b_{25} = b_{26} = 0, \quad b_{31} = \cos \alpha + \frac{\sin \alpha}{r} \left(d_{41} \sin \alpha - \frac{12 d_{46} \cos \alpha}{h^3} - \frac{12 d_{45} \Delta_2}{\Delta_1} \right), \\ b_{32} &= \sin \alpha \left(1 - \frac{d_{41} \cos \alpha}{r} - \frac{12 d_{46} \sin \alpha}{r h^3} - \frac{12 d_{45} \Delta_3}{\Delta_1} \right), \quad b_{33} = \frac{\sin \alpha}{r} \left(1 - d_{42} - \frac{12 d_{45} d_{32} \cos \alpha}{\Delta_1} \right), \\ b_{34} &= -\frac{\sin \alpha}{r^2} \left(d_{43} + \frac{12 d_{45} d_{33} \cos \alpha}{\Delta_1} \right), \quad b_{35} = 0, \quad b_{36} = -\frac{\sin^2 \alpha}{r^2} \left(d_{44} + \frac{12 d_{45} d_{34} \cos \alpha}{\Delta_1} \right), \\ b_{41} &= \sin \alpha \left(d_{11} \sin \alpha - \frac{12 d_{16} \cos \alpha}{h^3} - \frac{12 d_{15} \Delta_2}{\Delta_1} \right), \quad b_{42} = -\sin \alpha \left(d_{11} \cos \alpha + \frac{12 d_{16} \sin \alpha}{h^3} + \frac{12 d_{15} \Delta_3}{\Delta_1} \right), \\ b_{43} &= -\sin \alpha \left(d_{12} + \frac{12 d_{15} d_{32} \cos \alpha}{\Delta_1} \right), \quad b_{44} = -\frac{\sin \alpha}{r} \left(d_{13} + \frac{12 d_{15} d_{33} \cos \alpha}{\Delta_1} \right), \quad b_{45} = 0, \quad (2) \\ b_{46} &= \cos \alpha - \frac{\sin^2 \alpha}{r} \left(d_{14} + \frac{12 d_{15} d_{34} \cos \alpha}{\Delta_1} \right), \quad b_{51} = \cos \alpha \left(-d_{11} \sin \alpha + \frac{12 d_{16} \cos \alpha}{h^3} + \frac{12 d_{15} \Delta_2}{\Delta_1} \right), \\ b_{52} &= \cos \alpha \left(d_{11} \cos \alpha + \frac{12 d_{16} \sin \alpha}{h^3} + \frac{12 d_{15} \Delta_3}{\Delta_1} \right), \quad b_{53} = \cos \alpha \left(d_{12} + \frac{12 d_{15} d_{32} \cos \alpha}{\Delta_1} \right), \quad b_{55} = 0, \\ b_{54} &= \frac{\cos \alpha}{r} \left(d_{13} + \frac{12 d_{15} d_{33} \cos \alpha}{\Delta_1} \right), \quad b_{56} = \sin \alpha \left[1 + \frac{\cos \alpha}{r} \left(d_{14} + \frac{12 d_{15} d_{34} \cos \alpha}{\Delta_1} \right) \right], \\ b_{61} &= d_{21} \sin \alpha - \frac{12 d_{26} \cos \alpha}{h^3} - \frac{12 d_{25} \Delta_2}{\Delta_1}, \quad b_{62} = -d_{21} \cos \alpha - \frac{12 d_{26} \sin \alpha}{h^3} - \frac{12 d_{25} \Delta_3}{\Delta_1}, \quad b_{66} = 0, \\ b_{63} &= -d_{22} - \frac{12 d_{25} d_{32} \cos \alpha}{\Delta_1}, \quad b_{64} = -\frac{1}{r} \left(d_{23} + \frac{12 d_{25} d_{33} \cos \alpha}{\Delta_1} \right), \quad b_{66} = -\frac{\sin \alpha}{r} \left(d_{24} + \frac{12 d_{25} d_{34} \cos \alpha}{\Delta_1} \right) \end{aligned}$$

$$\text{где } \Delta_1 = r h^3 - 12 d_{35} \cos \alpha, \quad \Delta_2 = (1 - d_{31}) \sin \alpha \cos \alpha - \frac{r \sin \alpha}{R_1} + \frac{12 d_{36} \cos^2 \alpha}{h^3},$$

$$\Delta_3 = \left(d_{31} \cos \alpha + \frac{r}{R_1} \right) \cos \alpha + \left(\frac{12 d_{36} \cos \alpha}{h^3} + \sin \alpha \right) \sin \alpha.$$

Здесь α – угол между касательной к меридиану срединной поверхности и осью вращения оболочки z ; r – расстояние точки срединной поверхности до оси оболочки z ; $R_1(s)$ и $R_2(s)$ – соответственно, первый и второй главные радиусы кривизны поверхности вращения.

Компоненты вектора $\bar{f}(s)$ определяются формулами

$$\begin{aligned} f_1 &= \frac{h^3}{\Delta_1} \left(d_{30} - r q - \frac{12 d_{35} \sin \alpha}{h^3} \right) q_z, & f_2 &= -q_z, & f_3 &= -\frac{\sin \alpha}{r} \left(d_{40} + \frac{12 d_{45} \Delta_4}{\Delta_1} \right), \\ f_4 &= -\sin \alpha \left(d_{10} + \frac{12 d_{15} \Delta_4}{\Delta_1} \right), & f_5 &= \cos \alpha \left(d_{10} + \frac{12 d_{15} \Delta_4}{\Delta_1} \right), & f_6 &= -d_{20} - \frac{12 d_{25} \Delta_4}{\Delta_1}, \end{aligned} \quad (3)$$

где $\Delta_4 = d_{30} \cos \alpha - r(q_r \cos \alpha + q_z \sin \alpha)$; q_r и q_z – проекции приведённой к срединной поверхности оболочки поверхностной нагрузки соответственно на направления r и z .

Входящие в (2) и (3) коэффициенты d_{nk} определяются выражениями

$$\begin{aligned} d_{10} &= \frac{1}{\Delta} \left[\frac{K_{11} K_{113} - D_{11} C_{113}}{R_1} + \frac{K_{11} K_{123} - D_{11} C_{123}}{R_2} + D_{11} (C_{111} + C_{122}) - K_{11} (K_{111} + K_{122}) \right], & d_{11} &= \frac{D_{11}}{\Delta}, \\ d_{12} &= d_{21} = -\frac{K_{11}}{\Delta}, & d_{13} &= -d_{31} = \frac{K_{11} K_{12} - C_{12} D_{11}}{\Delta}, & d_{14} &= \frac{K_{11} D_{12} - K_{12} D_{11}}{\Delta}, & d_{15} &= \frac{K_{11} K_{114} - D_{11} C_{114}}{\Delta}, \\ d_{16} &= \frac{1}{\Delta} \left[K_{11} K'_{114} - D_{11} C'_{114} + (D_{11} C_{124} - K_{11} K_{124}) \frac{\sin \alpha}{r} \right], & d_{22} &= \frac{C_{11}}{\Delta}, & d_{23} &= \frac{K_{11} C_{12} - K_{12} C_{11}}{\Delta}, \\ d_{24} &= -d_{42} = \frac{K_{11} K_{12} - D_{12} C_{11}}{\Delta}, & d_{25} &= \frac{K_{11} C_{114} - C_{11} K_{114}}{\Delta}, & \Delta &= C_{11} D_{11} - K_{11}^2, \\ d_{26} &= \frac{1}{\Delta} \left[K_{11} C'_{114} - C_{11} K'_{114} + (C_{11} K_{124} - K_{11} C_{124}) \frac{\sin \alpha}{r} \right], & & & & & (4) \\ d_{20} &= \frac{1}{\Delta} \left[\frac{K_{11} C_{113} - C_{11} K_{113}}{R_1} + \frac{K_{11} C_{123} - C_{11} K_{123}}{R_2} + C_{11} (K_{111} + K_{122}) - K_{11} (C_{111} + C_{122}) \right], & d_{32} &= -d_{23}, \\ d_{33} &= C_{22} + C_{12} d_{13} + K_{12} d_{23}, & d_{34} &= d_{43} = K_{22} + C_{12} d_{14} + K_{12} d_{24}, & d_{35} &= C_{124} + C_{12} d_{15} + K_{12} d_{25}, \\ d_{36} &= C'_{124} + C_{12} d_{16} + K_{12} d_{26} - C_{224} \frac{\sin \alpha}{r}, & d_{30} &= C_{12} d_{10} + K_{12} d_{20} + \frac{C_{123}}{R_1} + \frac{C_{223}}{R_2} - C_{121} - C_{222}, \\ d_{41} &= -d_{14}, & d_{44} &= D_{22} + K_{12} d_{14} + D_{12} d_{24}, & d_{45} &= K_{124} + K_{12} d_{15} + D_{12} d_{25}, \\ d_{46} &= K'_{124} + K_{12} d_{16} + D_{12} d_{26} - K_{224} \frac{\sin \alpha}{r}, & d_{40} &= K_{12} d_{10} + D_{12} d_{20} + \frac{K_{123}}{R_1} + \frac{K_{223}}{R_2} - K_{121} - K_{222}. \end{aligned}$$

Здесь введены следующие обозначения:

$$\begin{aligned} C_{ji} &= \int_{-h/2}^{h/2} B_{ji} d\gamma, & K_{ji} &= \int_{-h/2}^{h/2} B_{ji} \gamma d\gamma, & D_{ji} &= \int_{-h/2}^{h/2} B_{ji} \gamma^2 d\gamma, & C_{ji3} &= \int_{-h/2}^{h/2} B_{ji} I d\gamma, \\ K_{ji3} &= \int_{-h/2}^{h/2} B_{ji} I \gamma d\gamma, & C_{jik} &= \int_{-h/2}^{h/2} B_{ji} \beta_k t d\gamma, & K_{jik} &= \int_{-h/2}^{h/2} B_{ji} \beta_k t \gamma d\gamma, & I &= \int_0^\gamma \beta_3 t d\gamma, & B_{jj} &= \frac{E_j}{1 - \mu_{12} \mu_{21}}, \\ B_{12} &= \frac{\mu_{12} E_1}{1 - \mu_{12} \mu_{21}}, & C_{ji4} &= \int_{-h/2}^{h/2} B_{ji} I_0 d\gamma, & C'_{ji4} &= \int_{-h/2}^{h/2} B_{ji} \frac{\partial I_0}{\partial s} d\gamma, & K_{ji4} &= \int_{-h/2}^{h/2} B_{ji} I_0 \gamma d\gamma, \\ K'_{ji4} &= \int_{-h/2}^{h/2} B_{ji} \frac{\partial I_0}{\partial s} \gamma d\gamma, & I_0 &= \int_0^\gamma \frac{1}{2G_{13}} \left(\frac{h^2}{4} - \gamma^2 \right) d\gamma; & & & & \end{aligned}$$

γ – нормальная координата, положительные значения которой отсчитываются от срединной поверхности оболочки к её внешней поверхности.

Решив систему (1), будем иметь основные функции, посредством которых можно найти остальные факторы напряжённо – деформированного состояния оболочки. Так, например, внутренние усилия T_1 , T_2 , N и изгибающий момент M_2 можно определить по формулам

$$\begin{aligned} T_1 &= -T_r \sin \alpha + T_z \cos \alpha, \quad T_2 = d_{31}T_1 + d_{32}M_1 + d_{33}\frac{U_r}{r} + d_{34}\frac{\sin \alpha}{r}\Theta + d_{35}\frac{d\Psi}{ds} + d_{36}\Psi + d_{30}, \\ N &= T_z \sin \alpha + T_r \cos \alpha, \quad M_2 = d_{41}T_1 + d_{42}M_1 + d_{43}\frac{U_r}{r} + d_{44}\frac{\sin \alpha}{r}\Theta + d_{45}\frac{d\Psi}{ds} + d_{46}\Psi + d_{40}, \end{aligned}$$

где

$$\Psi = \frac{12}{h^3}(T_r \cos \alpha + T_z \sin \alpha), \quad (5)$$

$$\frac{d\Psi}{ds} = \frac{12}{h^3} \left[\left(\frac{\sin \alpha \cos \alpha}{r} - \frac{\sin \alpha}{R_1} \right) T_r + \left(\frac{\sin^2 \alpha}{r} + \frac{\cos \alpha}{R_1} \right) T_z + \frac{\cos \alpha}{r} T_2 - q_r \cos \alpha - q_z \sin \alpha \right].$$

Метод решения. Вследствие линейности поставленной краевой задачи для её интегрирования можно использовать метод сведения краевой задачи к ряду задач Коши, каждая из которых решается одним из численных методов (Рунге – Кутта, Адамса – Штермера и др.). Однако, в случае оболочек, материал которых обладает существенной неоднородностью и анизотропией упругих свойств, использование такого подхода может привести к сильно различающимся по величине вещественной части собственным значениям матрицы $B(s)$. Тогда в результате изменения аргумента s при интегрировании в результате потери значащих цифр система векторов решений задачи Коши становится почти линейно зависимой, и поэтому при удовлетворении граничным условиям на другом конце интервала нельзя с достаточной точностью определить постоянные интегрирования и искомые функции.

Для преодоления указанных трудностей используется метод [3], с помощью которого численное решение краевых задач сводится к устойчивому вычислительному процессу. Проведённые исследования [4] показали эффективность и высокую точность метода дискретной ортогонализации, а также его простоту и удобство при численном решении краевых задач. Этот метод даёт возможность получить устойчивый вычислительный процесс за счёт ортогонализации векторов – решений задач Коши в конечном числе точек разбиения интервала изменения аргумента.

Решение поставленной задачи сводится к численному интегрированию системы (1) при граничных условиях, которые в наиболее общем случае запишутся в виде

$$D_1 \bar{X} = \bar{d}_1 \quad (\text{при } s = s_0), \quad D_2 \bar{X} = \bar{d}_2 \quad (\text{при } s = s_1), \quad (6)$$

где D_1 и D_2 – заданные прямоугольные матрицы порядка 6×3 ; $\bar{d}_1$ и $\bar{d}_2$ – заданные векторы – столбцы третьего порядка.

Вычислительный алгоритм решения задачи строится по следующей схеме:

1) по заданным функциям механических и теплофизических характеристик и геометрических параметров оболочки, внешней поверхностной нагрузки, температурного поля и граничным условиям вычисляются элементы матрицы $B(s)$ и компоненты вектора f , а также элементы матриц D_1 и D_2 граничных условий (6);

2) численно решается краевая задача (1), (6);

3) вычисляются основные расчётные величины, характеризующие напряжённо – деформированное состояние оболочки.

Пример расчёта. В качестве числового примера рассмотрена задача термоупругости для подверженной равномерному внутреннему давлению q тонкостенной конструкции, представляющей цилиндрическую оболочку вращения радиуса R_0 постоянной толщины h_0 , сопряжённую со сферическими днищами переменной толщины, имеющими полюсные отверстия разных диаметров. Принято, что контуры полюсных отверстий свободны от внешних нагрузок, а действие крышек, заглушающих полюсные отверстия, заменено равномерным нормальным давлением [5], а также что толщина h_j днищ изменяется по закону

$$h_j = h_0 \frac{R_0}{r_j}, \quad (j = 1, 2)$$

где r_j – расстояние точки срединной поверхности сферического днища до оси вращения.

Предполагается что один из торцов ($s = 0$) конструкции заделан, а другой – свободен от внешних нагрузок.

Пусть проектируемая тонкостенная конструкция изготовлена из конструкционного материала, слабо сопротивляющегося сдвигу, а физико – механические характеристики которого существенно зависят от температуры (такие материалы называют термочувствительными). Принято, что температура t вдоль образующей s изменяется по квадратичному закону, а зависимости модулей упругости, модуля сдвига, коэффициентов Пуассона и линейного температурного расширения от температуры аппроксимированы функциями

$$E_i = E_i^0 (1 - \lambda_{ii} t), \quad \mu_{ij} = \mu_{ij}^0 (1 - \lambda_{ij} t) \quad (i, j = 1, 2; i \neq j),$$

$$\beta_i = \beta_i^0 (1 + \alpha_i t) \quad (i = 1, 2, 3), \quad G_{13} = G_{13}^0 (1 - \lambda_{33} t),$$

где E_i^0 , μ_{ij}^0 , β_i^0 – значения E_i , μ_{ij} , β_i при начальной температуре; λ_{ij} и α_i – постоянные коэффициенты [6].

Результаты расчётов показывают, что значительная часть заднего днища и цилиндрической части конструкции практически находятся в безмоментном состоянии. Зоны с моментным состоянием охватывают облас-

ти, примыкающие к полюсным отверстиям как переднего, так и заднего днищ, а также в местах сопряжения цилиндрической части конструкции с днищами.

На рисунке приведена эпюра обезразмеренных изгибающих моментов M_1 / M'_1 , где M'_1 – максимальное значение изгибающего момента, найденное в случае неучёта поперечных сдвигов ($E_i / G_{13} = 0$) и термочувствительности материала ($\lambda_{ij} = 0$). Этому случаю на рисунке соответствует сплошная линия, а штриховая и штрих – пунктирная линии построены соответственно для случаев

- 1) $E_1^0 / G_{13}^0 = 50$; $\lambda_{ij} = 0$; 2) $E_1^0 / G_{13}^0 = 50$; $\lambda_{11} = \lambda_{22} = \lambda_{13} = \lambda$; $\lambda_{12} = \lambda_{21} = 0$.

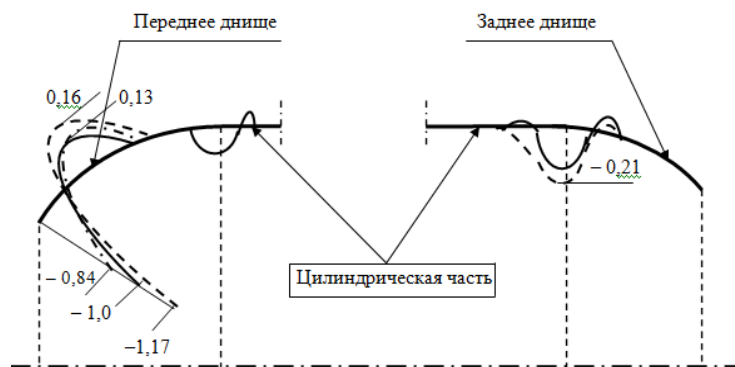


Рис. 1. Графики изменения изгибающего момента.

Как видно из рисунка, учёт только поперечных сдвигов (случай 1) абсолютное значение минимального изгибающего момента увеличивает на 17 %, в то время как одновременный учёт поперечных сдвигов и изотропной термочувствительности уменьшает на 16 % (случай 2).

Вычисления проводились также для случая 3) $E_1^0 / G_{13}^0 = 50$; $\lambda_{11} = \lambda / 3$; $\lambda_{22} = \lambda_{13} = \lambda$; $\lambda_{12} \neq \lambda_{21} \neq 0$. Из результатов расчётов следует, что в отличие от изотропной термочувствительности (случай 2), учёт анизотропной термочувствительности (случай 3) увеличивает значение минимального изгибающего момента на 9 %.

Аналогичная картина наблюдается и при определении значений остальных расчётных величин. Так, максимальные значения перерезывающей силы $N_{\max}$, возникающей в сечении, близлежащем к полюсному отверстию переднего днища, приведены в таблице.

Максимальные значения перерезывающей силы

Величины	$E_i / G_{13} = 0, \lambda_{ij} = 0$	Случай 1	Случай 2	Случай 3
$N_{\max}$ (Н / м)	215750	231220	177545	197775

Выводы.

Из вышеприведённого анализа видно, что поправки от учёта поперечных сдвиговых деформаций, и поправки, обусловленные учётом анизотропной термочувствительности могут иметь как одинаковые, так и разные знаки. Следовательно, они могут либо в какой – то мере компенсировать друг друга, либо существенно изменить значения расчётных величин.

Проведены также числовые расчёты для температурно – силовой задачи цилиндрической оболочки, решение которой получено методом малого параметра в работе [7]. Сравнение результатов, полученных аналитическим и численным методами, показали как необходимость учёта особенностей материала оболочки, так и эффективность применённого численного метода, дающего при решении аналогичных задач вполне приемлемые результаты.

Список литературы

1. Амбарцумян С.А. Общая теория анизотропных оболочек. М.: Наука, 1974. 446 с.
2. Григоренко Я.М. Изотропные и анизотропные слоистые оболочки вращения переменной толщины. Киев: Наукова думка, 1973. 228 с.
3. Годунов С.К. О численном решении краевых задач для систем Линейных обыкновенных дифференциальных уравнений // УМН, 1961. Т. 16. Вып. 3. С. 171 – 174.
4. Бидерман В.Л. Механика тонкостенных конструкций. М.: Машиностроение, 1977. 488 с.
5. Елпатьевский А.Н., Васильев В.В. Прочность цилиндрических оболочек из армированных материалов. М.: Машиностроение, 1972. 168 с.
6. Крицук А.А. Коэффициенты теплового расширения стеклопластиков и их компонент в условиях высоких температур // Проблемы прочности, 1972. №5. С. 98 – 102.
7. Бахшинян Р.М. Температурно – силовая задача податливой на сдвиг неоднородной цилиндрической оболочки // Школа университетской науки: парадигма развития. Поволжский госуд. ун-т сервиса. Тольятти: Изд-во ПВГУС, 2011. № 1(2).

Бахшинян Рубен Мушегович, канд. физ. – мат. наук, доц., brm010@mail.ru, Россия, Тольятти, Поволжский государственный университет сервиса

THE NUMERICAL SOLUTION OF STATIC PROBLEMS OF THERMOELASTIC SHELLS

R.M. Bakhshinyan

The problem of rotational shell orthotropic thermoelasticity is discussed, whose material's physical and mechanical characteristics are functions of heating temperature. The basis for the calculations is the parabolic law of tensions tangents distribution to the thickness of the shell. The solution of received systems of differential equations is carried out by the method of discrete ortogonalisation, which brings the task numerical solution to sustainable calculating process. Analysis of considered numerical examples was made.

Key words: heat-sensitive shell; elasticity modulus; shift rigidity; numerical method.

Bakhshinyan Ruben Mushegovich, candidate of physical and mathematical sciences, docent, brm010@mail.ru, Russia, Togliatti, Volga Region State University of Service

УДК.628.3

ВЛИЯНИЕ МЕДИ ИЗ СТОЧНЫХ ВОД МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

А.А. Нестер

Рассмотрено современное состояние с добычей медных руд и производство меди в Украине. Коротко изложены основные аспекты негативного влияния отходов производства плат и гальваники на окружающую среду. Во избежание накопления шламов на территории машиностроительных предприятий предлагается использовать технологию регенерации отработанных растворов травления, при которой выделенный металл используется в качестве вторичного сырья для производства меди, а регенерируемый раствор повторно используется для травления печатных плат.

Ключевые слова: медь, основной аспект, сточные воды, печатные платы, регенерация, негативный.

Постановка проблемы. Сегодня едва ли не наибольшее негативное влияние на окружающую среду среди всех отраслей промышленности делает добыча полезных ископаемых. Деятельность предприятий добывающей отрасли является постоянным источником техногенной опасности возникновения аварий, которые нередко создают чрезвычайные ситуации и загрязнения естественной среды. При этих условиях особенный вес приобретает соблюдение предприятиями требований действующего законодательства и мер экологической безопасности [1]. Для добычи руды открытым способом необходимо выполнить вскрышные работы с перемещением большого количества почв и других пород. Так например, если 20-25 лет тому назад предельный коэффициент вскрышных работ принимался в размере 2-4 м³/т, то в настоящее время при разработке месторождений со скальными горными породами он достигает 5-10 м³/т, а при разработке пологопадающих месторождений с мягкими покрывающими породами-20-25 м³/т. В настоящее время открытая разработка залежей полезных ископаемых может выполняться на глубинах до 250 м. Эти большие массы, которые нужно переместить, уложить, свидетельствуют о значительных затратах труда и материальных затратах [2].

Природоохранная деятельность в сфере использования недр регламентируется среди других законами государства, который определяет такие основные требования к проведению горных работ: обеспечение безопасного проведения горных работ; рациональная добыча, использование полезных ископаемых и охрана недр [2].

Анализ последних исследований и публикаций. Анализ патентной и научно-технической литературы показал, что вопросами выделения меди из отработанных водных растворов вплотную не занимаются. Известны лишь теоретические работы, в которых анализируются вопросы влияния сточных вод на состояние окружающей среды [1].

Выделение нерешенных прежде частей общей проблемы. В Украине, Белоруссии и других странах есть острая потребность в меди, которая используется очень широко в электротехнической промышленности и других отраслях. В то же время в Украине неизвестны разведанные месторождения медных руд. Перспективные и прогнозные ресурсы медных руд оценены: в Волынском регионе, на Донбассе и в Днепро-донецкой впадине в пределах Украинского щита в Средне-Приднепровском и Волынском регионах. Общие ресурсы руд Волынского района со средним содержанием меди 1,0 % оцениваются в 28 млн.т металла. Все изложенное свидетельствует о недостатке залежей медных руд в Украине. Ежегодные потребности Украины в этом металле составляют приблизительно 120—140 тысяч тонн, двадцать процентов из которых обеспечиваются собственным медным утилем, а остальные потребности в виде черновой меди приходится завозить из соседних России и Польши [3].

Сложность и острота проблемы предопределены тем, что украинские потребители, которые остро нуждаются в меди, вынуждены закупать значительную ее часть за пределами Украины и из-за отсутствия иностранной валюты сокращать производство товаров. В то же время имеющиеся в Украине мощности производства проката меди и ее сплавов не загружены, поскольку нет медного сырья, а значительная часть медеместимого утиля и отходов по различным причинам экспортируется, невзирая на то, что экспорт проката меди и ее сплавов значительно эффективнее, чем экспорт утиля и отходов меди. На каждой тонне экспортированного проката, кроме сохранения рабочих мест, можно получать до 1000 долларов США валютной выручки дополнительно, то есть 30-40 млн. долларов в год [3].

Изложение основного материала исследования. Технология производства цветных металлов имеет свои особенности. Существующий технологический процесс связан с низкой концентрацией цветных металлов в руде в сравнении с железной (в рудах цветных металлов — лишь несколько процентов), а также наличием в руде нескольких металлов. Например, для получения меди используют руды с содержанием основного металла в среднем 2—3 %. Перевозить их далеко нецелесообразно. Поэтому выплавка меди осуществляется вблизи мест добычи. Сначала медные руды обо-

гащают и получают медный концентрат с содержанием металла 35 %. Потом происходит плавка и продувка в конверторе для получения черновой меди, последний этап—очистка от примесей (рафинирование). При применении специальной технологии из медной руды можно получить и некоторые другие цветные металлы [3].

В Украине минерально-сырьевая база цветной металлургии недостаточна, и много предприятий этой отрасли работают на привозном сырье или переплавляют утиль цветных металлов. При размещении этих предприятий также учитываются потребительский, транспортный и экологический факторы. Цветная металлургия является загрязнителем окружающей среды и главным источником поступления тяжелых металлов [3].

В то же время источником пополнения ресурсов утиля цветных металлов частично может стать производство плат и гальваники, где медь используется в качестве проводникового материала и стравливается в процессе подготовки поверхности к использованию (нанесение рисунка и стравливание).

Обследования показали, что предприятиями, которые занимаются изготовлением печатных плат, сбрасывается в сточные воды целый спектр металлов – медь, железо, никель, хром и т.д. Так при годовой односменной работе линии травления печатных плат производительностью 14 м²/час будет изготовлено почти 28000 м² заготовок, а количество выделенного металла (меди) составит приблизительно 14 тн, что при цене 3,27 дол/кг составит 14000 кг•3,27 дол/кг=\$45000. Этот металл может быть повторно использован при использовании рекомендаций и решений, предложенных в данной работе. Количество металла, которое будет стравливаться, при возобновлении промышленного производства плат, может составить солидную добавку к производству и поможет улучшить экологическое состояние вокруг машиностроительного производства.

Наиболее распространенным способом добычи металлических руд (в том числе медных) является открытая разработка месторождений, с помощью которой из недр выбирается свыше 2/3 всех полезных ископаемых. Это относительно дешевый способ разработки, который позволяет применять мощное и высокопродуктивное оборудование. Однако при проведении открытых работ на многие десятилетия из хозяйственного обращения изымаются огромные площади сельскохозяйственных и лесных угодий. Для доступа к месторождению из поверхности придется вынимать, перемещать и укладывать в отвалы пустые породы, объем которых в несколько раз превышает объем добытого полезного ископаемого [3].

Второй по значению способ разработки месторождений — подземный, на часть которого приходится около 20 % добычи железа, до 45 % добычи меди, до 70 % цинка, до 75 % олова и свинца, 100 % вольфрама. Расходы на добычу руды при подземной разработке месторождений заметно больше, чем при открытом способе. Однако он ведется на месторождениях, которые экономически нецелесообразно или технически невозможно разрабатывать открытым способом.

В связи с первоочередным истощением легкодоступных запасов металлических руд глубина разработок постепенно растет, увеличивая себестоимость подземной добычи. Тенденция увеличения глубины разработок прослеживается во всем мире. В Канаде добыча руд, которые содержат золото, медь, никель, ведут на глубинах 1800—2600 м, в США меди и золота — на глубинах 1700—3000 м, в Индии золото достают из глубины 3500 м. В Южноафриканской Республике разрабатывается самое глубокое в мире месторождение, где работы ведутся на глубине свыше 4000 м. Подземная разработка месторождений, в ряде случаев, позволяет полностью сохранить земную поверхность, что обеспечивает значительное преимущество перед открытыми горными работами [3].

В то же время часть необходимого медного сырья можно получить не из недр, а с помощью очистки сточных вод производства плат и гальваники. Как показали результаты исследований, удаленная из сточных вод медь отвечает требованиям, которые позволяют использовать ее в дальнейшем для переплавки или для металлизации подложек при соответствующих технологических процессах [4].

На сегодняшнее время наиболее распространенные реагентные технологии исключения металлов из воды не обеспечивают необходимую эффективность очистки воды для ее повторного использования, приводят к образованию и накоплению токсичных шламов, которые продолжают накапливаться на территориях как действующих предприятий прежнего СССР, так и заново образованных. Не решенным остается вопрос утилизации регенерационных растворов, которые образуются при применении ионообменных технологий и которые позволяют создавать замкнутые системы водопользования в гальванических производствах [4].

Учитывая факт создания оборудования, которое представляется экологически безопасным и энергосберегающим, мы имеем возможность оценить, как обеспечиваются экономические показатели созданного на основе данного исследования оборудование. При этом мы должны учитывать конкретные параметры установок, которые создают возможность повторного использования водных растворов без сброса на очистные сооружения, как предприятия, так и города. При определении экономической целесообразности мы должны выходить из критерия уменьшения нанесения вреда окружающей среде.

Расчет экономической эффективности от внедрения нового оборудования будет проводиться на годовую программу производства заготовок. Себестоимость годового выпуска продукции по проектируемому варианту будет состоять из следующих элементов:

$$C_2 = (C_1 - C_m - C_b + K_3 \cdot E_n), \quad (1)$$

где C_m - стоимость выделенного металла; C_b - стоимость сэкономленной воды; K_3 - капитальные расходы на дополнительное оборудование; E_n - нормативный коэффициент сравнительной экономической эффективности.

Расчет проведен из условия годовой программы работы оборудования. Экономический эффект от внедрения нового оборудования стоимостью \$17000 составит в долларовом эквиваленте **\$63000** То есть внедрение новой технологии очистки сточных вод только одной установкой может принести экономический эффект, улучшит состояние окружающей среды и даст возможность реализации экологически безопасного процесса утилизации меди.

Результаты и их обсуждение. При оценке опасности для окружающей среды шлама-отходов производства плат и гальваники учитывают миграционную способность химических веществ в поверхностные и подземные воды, накопление в почве и растениях, которые выражают через растворимость химических соединений в воде. Токсичность отходов характеризуется предельно допустимой концентрацией (ГДК) веществ в почве и их содержание в общей массе шлама [5]. Индекс опасности отдельного химического вещества определяется по формуле:

$$K_i = \frac{ГДК_i}{(S + C_v)_i}, \quad (2)$$

где, K_i -индекс опасности; ГДК_{*i*} - предельно допустимая концентрация в почве опасного химического вещества, которое содержится в отходах, мг/кг почвы; S - коэффициент растворимости химического вещества в воде; C_v - содержание химического вещества в общей массе отходов, мг/кг; *i* - порядковый номер данного вещества.

Результаты расчета суммарного индекса опасности шлама до удаления медных соединений на одном из предприятий Украины представлены в табл.1.

Таблица 1.
Результаты расчета суммарного индекса опасности шлама

Группа веществ	ГДК _{<i>i</i>} , мг/кг	(S + C _v) _{<i>i</i>} , мг/кг	K _{<i>i</i>}
Соединения меди	3	73,98	0,0405
		21,15	0,141

После удаления медных соединений из сточных вод (не преобразованных в шламы) суммарный индекс опасности становится практически таким, который не несет опасности (табл.2).

В случае неконтролируемого сброса отработанных травильных растворов производства плат и гальваники в окружающую естественную среду можно выделить следующие показатели опасности, которые характеризуют процесс:

1. Химическое загрязнение среды (воздух, водоемы, почва).
2. Повышенная заболеваемость населения, особенно молодого поколения, повязанная с загрязнением окружающей естественной среды; а также возможность летальных случаев.
3. Разрушение жилья населения, а также производственных сооружений, имущества и домов.

Таблица 2.

**Результаты расчета суммарного индекса опасности шлама
производства плат и гальваники после внедрения мероприятий
удаления меди**

Группа веществ	ГДК _i , мг/кг	(S + C _в) _i , мг/кг	K _i
Соединения меди	3	0,01	300,0
		0,03	100,0

Выводы. Проблема повышения экологической безопасности территорий, поддающихся техногенной нагрузке в процессе производства плат и гальваники на машиностроительных предприятиях, требует комплексного подхода для ее решения, которое заключается как в превентивном, так и в комплексе предохранительных ликвидационных мер.

К первой группе методов стоит отнести технологические и управленческие мероприятия. Их задание заключается в предупреждении и снижении загрязнения окружающей среды путем применения экологически безопасных реагентов, приготовления растворов, которые позволяют уменьшить токсичность отходов.

В технологические процессы производства плат и гальваники должны включаться мероприятия по уменьшению негативного влияния отходов производства плат и гальваники на окружающую среду. Отходы, которые могут появляться в процессе машиностроительного производства должны здесь же перерабатываться на необходимые для промышленности, сельского хозяйства и населения, товары.

То есть предприятиями должны разрабатываться комплексы мероприятий по обращению с отходами, среди которых могут быть наиболее экологически безопасными и экономически эффективными повторное использование отдельных составляющих, а также использование шламов, с получением строительных материалов, удобрения сельскохозяйственных угодий, под жестким контролем соответствующих экологических служб предприятий и государственных органов.

Список литературы

1. Нестер А.А., Рогов В.М. Регенерация сточных вод производства печатных плат // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 4. Физика. Химия, 2015. Т. 2 (60). Вып. 1. С. 72-79.
2. Шилаев В.П. Основы обогащения полезных ископаемых. М.: Недра 1986. 296 с.
3. Малькова М.Ю., Колтунов И.И., Задиранов А.Н. Металлургия черных и цветных металлов: монография. М.: Изд-во ЦКТ, 2013. 474 с.

4. Нестер А.А. Очистка сточных вод производства печатных плат: монография. Издательство Хмельницкого национального университета, 2016. 219 с.

5. Вредные химические вещества: Неорганические соединения элементов I - IV групп: справочник / под общей ред. В.А.Филова. Л.: Химия, Ленинградское отделение, 1988. 512 с.

Нестер Анатолий Антонович, канд. техн. наук, доц., nesteranatol111@gmail.com, Украина, Хмельницкий, Хмельницкий национальный университет

INFLUENCE OF COPPER FROM WASTEWATER WATER OF MACHINE-BUILDING ENTERPRISE

A.A. Nester

The modern state with the booty of copper ores and production of copper are considered in Ukraine. The basic aspects of negative influence of wastes of production of pays and galvanic are shortly expounded on an environment. In order to avoid the accumulation of slime on territory of machine-building of enterprises it is suggested to use technology of regeneration of exhaust solutions of etch, at that the distinguished metal is used as secondary raw material for the production of copper, and the regenerated solution is repeatedly used for the etch of PCBS.

Key words: copper, basic aspects, sewer water, PCBS, regeneration, negative.

Nester Anatoliy Antonovich. candidate of technical sciences, docent, nesteranatol111@gmail.com, Ukraine, Khmel'nitsk, Khmel'nitsky National University

УДК 621.83

МАРШРУТНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ЗУБООБРАБОТКИ ВЕНЦА ШЕВЕР-ПРИКАТНИКА ДЛЯ ОБРАБОТКИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ КОЛЕС С КРУГОВЫМИ ЗУБЬЯМИ

А.А. Маликов, А.В. Сидоркин, С.Л. Рахметов

В статье рассматривается ряд ключевых аспектов выбора стратегии построения оптимального варианта маршрутной технологии зубообработки венца комбинированного инструмента – шевера-прикатника. Уделено существенное внимание вопросам применения эффективных процессов формообразования венца инструмента с круговым зубом применительно к условиям современного инструментального производства.

Ключевые слова: шевер-прикатник, круговые зубья, инструментальное производство, формообразование, маршрутная технология.

Процессы формообразования венцов цилиндрических колес, в частности имеющих круговые зубья (ЦККЗ), характеризуются преимущественно удалением слоя металла – припуска путем механической: лезвийной и абразивной обработки. Причем, процессы характерные для построения

маршрута зубообработки ЦККЗ, являются аналогичными и для шеверов-прикатников [1 – 3]. С той лишь разницей, что инструментальное производство вносит свои критерии применимости определенных технологических процессов, тем самым, несколько расширяя область вариантов построения маршрута зубообработки венца комбинированного инструмента.

Как правило, для определенных групп зубчатых венцов, характеризуемых комплексом массогабаритных параметров (модуль, число зубьев, ширина венца), существует несколько вариантов построения маршрутных технологий (рисунок).

Для зубообработки венца шевера-прикатника рассмотрим ряд возможных последовательностей, которые, в определенной степени, нашли свое отражение в работах [4, 5]. Отметим, что в условиях инструментального производства, наибольшую эффективность, как при обработке венцов зуборезными головками, так и при обработке стандартным осевым инструментом, будут иметь 4-х и 5-и координатные станки типа обрабатывающий центр [6 – 10].

Предварительная (черновая) обработка зубчатого венца инструмента может осуществляться односторонними и/или двухсторонними резцовыми головками. Различие, при этом, состоит в механизме формообразования. В первом случае, формообразуется последовательно каждая сторона зуба. Например, сначала – вогнутая, затем – выпуклая. Во втором случае – сразу обе стороны. Первый вариант – более точный, потому что позволяет управлять величиной производящих радиусов, на которых расположены режущие кромки зубьев инструментов второго порядка, предназначенные для профилирования, в некоторых пределах, независимо друг от друга, тогда как второй – не дает такой возможности, т.к. производящий радиус жестко связан с делительной толщиной зубьев головки, определяемой на делительной прямой, для обеспечения заданной ширины обрабатываемой впадины. Можно заключить, что в первом случае появляется возможность более точно управлять припуском для последующей обработки, что более актуально на получистовых операциях, но при этом, увеличивается основное время. Во втором случае, для обеспечения расчетной ширины впадины, задается жестко связанная с ней делительная толщина зуба резцовой головки. При заданном радиусе одной из формообразующих поверхностей зуба – внутренней или наружной, радиус другой определяется исходя из условия обеспечения указанной ширины и не может быть изменен. Таким образом, здесь отсутствует возможность независимо друг от друга управлять припуском, оставляемом для дальнейшей зубообработки. Поэтому последний является более неравномерным, что, в большей степени, является приемлемым для черновых операций. Основное время, затрачиваемое на зубообработку, при этом, значительно меньше, чем в первом случае.



Структурная схема построения маршрута формообразования венца шевера-прикатника для обработки ЦККЗ

По конструкции резцовые головки подразделяются на цельные – относятся к специальному инструменту и сборные – относятся к специальному и специализированному инструменту.

Положительные стороны использования специального инструмента, в данном случае, состоят в том, что его изготовление не требует сложной маршрутной технологии или большой номенклатуры инструмента второго порядка и может осуществляться на универсальном оборудовании. Отрицательные стороны – невозможность изменения производящих радиусов инструмента, что говорит о его использовании исключительно для формообразования венца шевера-прикатника одного типа в рамках одного технологического процесса.

Положительные стороны использования специализированного инструмента заключаются в том, что появляется возможность изменять, в некоторых пределах, производящий радиус за счет предусмотренных его конструкцией регулировочных элементов, а также угол профиля исходного контура за счет регулировки режущих зубьев головки или их полной замены. Это позволяет расширить область применения подобного инструмента до, например, различных стадий зубообработки венца шевера-прикатника. Также появляется возможность повторного использования корпуса, после полного износа режущих частей, для чего достаточно установить новый комплект резцов. Отрицательные стороны – усложнение конструкции, и как следствие, необходимость повышения точности и увеличение перечня комплектующих, входящих в состав инструмента, что в свою очередь, усложняет и удорожает технологию его изготовления: увеличивает номенклатуру потребного оборудования, используемого при изготовлении, средств технологического оснащения, требует ужесточения допусков, более высокой квалификации рабочих.

Также, при формообразовании венцов шевера-прикатника в условиях инструментального производства, возможно использование универсальных инструментов – резцов летучек. Положительные стороны их применения: возможность широкой регулировки производящего радиуса профильного угла за счет изменения положения резца в корпусе, что позволяет формообразовать венец шевера-прикатника с геометрическими параметрами, изменяемыми в широких пределах, упрощая тем самым технологию изготовления инструмента. Отрицательные стороны: значительное увеличение времени обработки, снижение качества обрабатываемых поверхностей, в первую очередь, за счет меньшей жесткости по сравнению с рассмотренными ранее типами инструментов.

Цельные инструменты выполняются, как правило, из быстрорежущей стали, сборные – позволяют использовать режущих элементов из быстрорежущей стали или твердого сплава, в том числе имеющие износостойкие покрытия.

Черновая обработка впадины зубчатого венца может также успешно осуществляться твердосплавными концевыми фрезами. Они ориентируются во впадине зуба таким образом, чтобы производить максимальное срезающее металла вершиной лезвия [11]. Данный метод благоприятен тем, что на технологической операции используется стандартный осевой твердосплавный инструмент, имеющий, в т.ч. и многослойные износостойкие покрытия. Это, в свою очередь, позволяет снизить производственные затраты. Вместе с тем, после обработки впадины остается весьма неравномерный припуск по высоте зуба [10 – 13].

Также возможна черновая обработка впадин твердосплавными концевыми сферическими фрезами, которая будет рациональна при наличии обрабатываемого центра с развитыми программно-аппаратными возможностями СЧПУ, позволяющего производить построчную обработку криволинейных поверхностей круговых зубьев. Благодаря тому, что управляющая программа формируется исходя из принципов описания построчного движения инструмента второго порядка, можно добиться более равномерного удаления слоев металла с боковых поверхностей обрабатываемых зубьев по сравнению с обработкой зуборезными резцовыми головками, тем более – цилиндрическими концевыми фрезами. За счет последовательного ступенчатого уменьшения диаметра и изменения режима обработки, можно добиться получения качественной поверхности, в том числе и на дне впадин обрабатываемого венца.

Если черновая операция подразумевает максимально возможное удаление металла из впадин зубчатого венца, и на данном этапе, в основном, не является первостепенной задачей формообразования самого контура впадины, при этом, инструмент второго порядка должен обладать повышенной стойкостью, то на получистовой стадии зубообработки существенное внимание уделяется именно этому аспекту, т.е. по ее завершении профиль впадины, в том числе и, переходные кривые, должны быть мак-

симально сформированы. Желательно также, иметь подготовленный равномерный припуск, оставленный для последующей чистовой и/или отделочной обработки. Здесь можно выделить два возможных варианта построения маршрута зубообработки: фрезерование односторонними резцовыми головками, положительные стороны работы которых уже были отмечены выше, или фрезерование твердосплавными концевыми сферическими фрезами.

Уменьшение радиуса кривизны арки зуба ведет к заужению впадины шевера-прикатника, особенно в торцовых сечениях. В этом случае, толщины формообразующих элементов инструментов второго порядка должны также соответственно уменьшаться. Но, следует учесть, что чрезмерное уменьшение толщин зубьев резцовых головок на делительной прямой ведет к уменьшению толщин зубьев и по вершинам, а у концевых фрез - к уменьшению диаметра. Что, в целом, может значительно снизить стойкость инструмента [3].

После завершения получистовой стадии, для придания рабочим поверхностям зубьев инструмента соответствующих прочностных характеристик и необходимой твердости, а также повышения износостойкости, в соответствии с заявленными требованиями, обеспечивающими заданные эксплуатационные параметры, следует термическая обработка – закалка.

На чистовой стадии зубообработки окончательно формообразуется профиль закаленных зубьев инструмента. Здесь можно использовать односторонние чашечные шлифовальные круги для раздельного зубошлифования вогнутой и выпуклой поверхностей зуба. Процесс, при этом, характеризуется малым припуском на обработку. Для чистовой обработки возможно использовать также раздельное планетарное шлифование [14]. Но, при заужении впадины обрабатываемого инструмента, приходится уменьшать и толщину конуса круга на делительной прямой для исключения подрезания необрабатываемой стороны зуба. Это приводит, в отдельных случаях, к катастрофическому уменьшению толщины вершины круга, повышению его хрупкости и опасности разрушения.

Процесс шлифования представляет собой движение круга с планетарной подачей, которая совмещает в себе поступательное движение зауженного инструмента по дуге эквидистантной окружности, очерчивающей линию соответствующей стороны обрабатываемого зуба, и вращение вокруг своей оси. Процесс зубошлифования, при этом, малопроизводителен, требует частой правки и замены чашечных шлифовальных кругов, имеет высокий риск их разрушения в процессе работы и малый ресурс. Кроме того, следует отметить, что круги являются специальным инструментом и требуют построения отдельной технологии их производства. Поэтому шлифование, в условиях инструментального производства, можно заменить чистовым фрезерованием твердосплавными концевыми сферическими фрезами. Это позволит формообразовывать венцы с меньшими радиусами арок зубьев. Но, после зубообработки будут оставаться гребешки,

которые необходимо удалять на последующих стадиях обработки. На сферический инструмент также накладываются ограничения, обусловленные минимальной шириной впадины и радиусами переходных кривых.

Отделочная операция зубообработки ставит перед собой задачу не формообразования, а улучшения качества боковых поверхностей зубьев инструмента, уменьшение шероховатости, удаление гребешков, полученных на предыдущей стадии зубообработки, если чистовая зубообработка закаленного инструмента осуществлялась концевыми фрезами. Здесь возможно использование процессов полирования или комбинированной электрохимической обработки. При использовании зубошлифования, на чистовой операции формообразования венца инструмента, качество поверхностей его зубьев может быть достаточным и применение отделочной стадии становится не обязательным.

Список литературы

1. Маликов А.А., Сидоркин А.В., Ямников А.С. Технология обработки круговых зубьев шеверов-прикатников на станках с ЧПУ // Научные технологии в машиностроении, 2011. №6. С. 15-20.
2. Маликов А.А., Сидоркин А.В. Расчет параметров наладки станков с ЧПУ на обработку круговых зубьев шеверов-прикатников // Известия Тульского государственного университета. Технические науки, 2011. Вып. 1. С. 187-194.
3. Маликов А.А., Сидоркин А.В., Рахметов С.Л. К вопросу о технологических ограничениях, обусловленных конструкцией инструмента, используемого в процессе шевингования-прикатывания цилиндрических колес с круговыми зубьями // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2018. Вып. 1. С. 165-171.
4. Маликов А.А., Сидоркин А.В., Ямников А.С. Инновационные технологии обработки зубьев цилиндрических колес: монография. Тула: Изд-во ТулГУ, 2011. 335 с.
5. Технологические особенности изготовления шевера-прикатника для обработки цилиндрических колес с круговыми зубьями // Известия Тульского государственного университета. Технические науки, 2011. Вып. 1. С. 179-186.
6. Маликов А.А., Сидоркин А.В. Методы нарезания арочных зубьев комбинированного инструмента для обработки цилиндрических зубчатых колес // Известия Тульского государственного университета. Технические науки, 2008. Вып. 3. С. 129-134.
7. Сидоркин А.В. К вопросу об обеспечения размерного контроля шеверов-прикатников для обработки цилиндрических колес с круговыми зубьями // Известия Тульского государственного университета. Технические науки, 2009. Вып. 2. Ч. 2. С. 180-185.

8. Плахин В.Д., Панков И.Г., Давыдов А.П., Паршин А.Н. Анализ зацепления и технология изготовления цилиндрических колес с арочными зубьями с применением автоматизированного комплекса T-FLEX // САПР и графика. 2007. №8. С. 74-77.

9. Виноградов А.Н. [и др.]. Инновационная технология высокопроизводительного изготовления цилиндрических колес с арочными зубьями // Научно-технический журнал «МГОУ-XXI-Новые технологии», 2010. №5. С. 25-30.

10. Сидоркин А.В., Салимов Д.М. Технология предварительного формообразования круговых зубьев шевиров-прикатников на станках с ЧПУ // Научные технологии в машиностроении, 2013. №5. С. 29-34.

11. ГОСТ 25762-83. Обработка резанием. Термины, определения и обозначения общих понятий. Введ. 01.07.1984. М.: Изд-во стандартов, 1984. 45 с.

12. Сидоркин А.В., Салимов Д.М. Улучшенная методика расчета координат опорных точек для операции предварительного формообразования круговых зубьев шевиров-прикатников на станках с ЧПУ // Известия Тульского государственного университета. Технические науки, 2013. Вып. 6. Ч. 2. С. 253-264.

13. Сидоркин А.В., Салимов Д.М. Методика расчета координат опорных точек при сложном пространственном движении предварительного формообразования круговых зубьев шевиров-прикатников на обрабатывающих центрах // Научные технологии в машиностроении. 2014. №2. С. 24-29.

14. Ямников А.С., Шейнин Г.М., Бобков М.Н. Шлифование круговых зубьев цилиндрических колес с планетарным движением оси чашечного круга // СТИН. 2008. №2. С. 8-12.

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., alan-a@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Рахметов Станислав Львович, асп., rakhmetov_s@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

**ROUTING TECHNOLOGY GEAR TREATMENT CROWN SHAV-ROLLER
FOR PROCESSING OF CYLINDRICAL GEARS WITH CIRCULAR TEETH**

A. A. Malikov, A.V. Sidorkin, S. L. Rakhmetov

The article considers a number of key aspects of the choice of the strategy for constructing the optimal variant of the route technology of the crown gear combined tool shav-roller. Considerable attention is paid to the application of effective processes of forming tool crown with a steep tooth in relation to the conditions of modern tool production.

Key words: shav-roller, circular teeth, tool production, shaping, routing technology.

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

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

Rakhmetov Stanislav Lvovich, postgraduate, rakhmetov_s@mail.ru, Russia, Tula State University

УДК 621; 004

ПРИМЕНЕНИЕ РАДИОЧАСТОТНОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ В ЗАЩИЩЕННОЙ ПОЛИГРАФИИ

Я.Р. Голубничая, Н.Е. Проскуряков

Представлен принцип работы радиочастотной метки и рассмотрены варианты применения радиочастотной идентификации в защищенной полиграфической продукции.

Ключевые слова: радиочастотная идентификация, RFID, радиометка, транспондер, биометрический паспорт, контрольный идентификационный знак, КиЗ.

В последние годы в различных сферах активно используются технологии радиочастотной идентификации (RFID – Radio Frequency IDentification). Они особенно востребованы в складском учете, логистике, торговле, на производстве, транспорте (электронные средства регистрации проезда, проездные билеты, топливные карты). RFID-технология применяется в области услуг и социальной сфере, библиотеках (учет фонда и читательские билеты), медицинском обслуживании, фармацевтике, сельском хозяйстве (чипирование животных), организации спортивных соревнований и т.д. Область применения RFID достаточно широка и неуклонно распространяется, технология обладает большим потенциалом для оперативного учета и контроля доступа, автоматизации инвентаризации объектов и удостоверения их подлинности.

Идентификация осуществляется с помощью радиосигнального обмена информацией между считывателем (ридером) и радиочастотной меткой (транспондером), проставленной на объект и содержащей все необходимые данные на микрочипе. Анализ данных производится компьютером. Прием и передача данных от радиометки происходит посредством содержащейся в ней миниатюрной антенны (рис. 1). RFID-транспондер может состоять только из микросхемы и антенны (пассивная радиометка), а может снабжаться собственным источником питания (активная радиометка) и даже различными сенсорами для измерения влажности, температуры, давления и т.д.

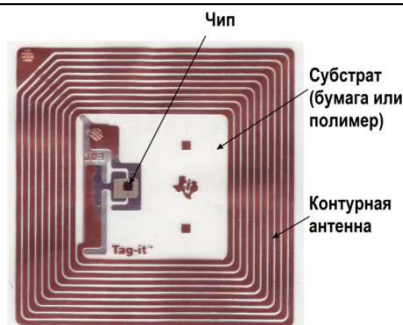


Рис. 1. Устройство простейшего RFID-транспондера

Расстояние, при котором производится считывание информации, варьируется от нескольких сантиметров до нескольких сот метров. При необходимости можно использовать радиочастотные метки, позволяющие изменять или перезаписывать содержащуюся на них информацию. Обеспечить проверку достоверности и целостности содержащейся в радиометке информации можно, к примеру, с помощью записанной электронно-цифровой подписи.

В защищенной полиграфии технология RFID успешно применяется во многих странах при производстве идентификационных документов - биометрических паспортов и удостоверений личности (рис. 2). Микросхемы таких документов могут содержать его основные реквизиты, цифровую фотографию владельца, традиционные сведения, необходимые для идентификации личности, а также различные биометрические данные (отпечатки пальцев, рисунок радужной оболочки глаза). Или же на чип может быть записана только ссылка на файл правительственного сервера, по которой работники паспортного контроля получают доступ к информации о владельце паспорта. Бесконтактный чип, как правило, встраивается в обложку паспорта или в поликарбонатную пластиковую страницу с персональными данными держателя документа, а информация на данную страницу наносится с помощью лазерного гравирования. Безопасность данных на чипе обеспечивается многоуровневой криптографической защитой (кроме того, пассивные радиометки, используемые в идентификационных документах, позволяют считывать информацию лишь на небольшом расстоянии).

Встроенные перезаписываемые RFID-метки ультравысокочастотного диапазона используются при изготовлении специальных защищенных документов строгой отчетности – контрольных идентификационных знаков (КиЗ). С 2016 года в соответствии с Соглашением, которое подписали государства – члены Евразийского экономического союза, КиЗ в обязательном порядке маркируется одежда из натурального меха. КиЗ содержат информацию об изделиях, предоставляют возможность быстро осуществлять таможенное оформление товаров, проверять их подлинность и противодействовать распространению контрафактной продукции. На КиЗ размещается визуальная и машиночитаемая (RFID-метка, штрих-код, QR-код) информация. Контрольные идентификационные знаки изготавливаются на материалах, обеспечивающих их целостность и читаемость информации, сохраняемых пригодность КиЗ при температуре не менее -40°. КиЗ выпус-

каются в различных вариантах крепления: накладные (на пластиковой основе с пломбирующим элементом), вшивные (на текстильной основе), клеевые (на самоклеящейся основе). Мехаовые изделия производителей государств – членов Евразийского экономического союза снабжаются КиЗ зеленого цвета, а ввозимых на таможенную территорию Союза – красного цвета.

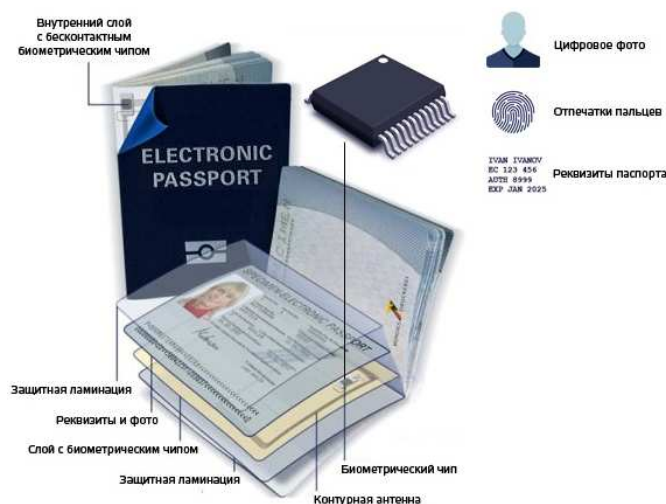


Рис. 2. Образец биометрического паспорта



Рис. 3. КиЗ для маркировки изделий из натурального меха от АО «Гознак»: а – вшивные; б – клеевые; в – накладные (навесные)

В соответствии с требованиями, предъявляемыми к защитному комплексу КиЗ, они печатаются на специальной защищенной бумаге, могут содержать скрытые и голографические изображения, графические ловушки, гильоширные элементы, микротекст, изображения, видимые в УФ-лучах. АО «Гознак» (эмитент КиЗ для маркировки меховых изделий в Российской Федерации) использует RFID-метки различных производителей и выпускает КиЗ двух размеров (53x80 мм и 25x160 мм) для нескольких вариантов креплений (рис. 3).

Стоимость КиЗ составляет, в среднем, от 15 до 22 рублей. [1]. Декоративные элементы дизайна КиЗ отпечатаны с применением металлизированной краски и выборочной лакировки. В защитный комплекс КиЗ включена защитная нить, на которой через поляризационный фильтр виден регулярный цветной рисунок [2]. Сама RFID-метка также усиливает защиту бланка КиЗ.

В зависимости от условий и целей применения RFID-транспондеры могут быть интегрированы в пластиковые или бумажные карты, инлеи, брелоки и т.д. Бумажные карты в производстве существенно проще и дешевле пластиковых, а также практически не уступают им в долговечности. Микропроцессор и антенна располагаются между слоями картона, на которых типографским способом нанесена необходимая текстовая и графическая информация. Дополнительный бумажный слой с отверстием в месте расположения микрочипа усиливает его защиту от внешних воздействий и выравнивает толщину карты (процессор по сравнению с антенной более рельефный и объемный) [3]. RFID-инлеи – это заготовки в виде листового пластика (на основе поливинилхлорида, полиэтилентерефталата с термоклеем или для прямой печати) с уже имеющимися RFID-транспондерами (рис. 4, а).

Ведущим производителем RFID-меток и инлеев в России (около 50 млн штук в месяц) является ПАО «Микрон», которое осуществляет полный производственный цикл от разработки и модификации до выпуска готового продукта (сухие и влажные инлеи, клеящиеся метки, бумажные и пластиковые смарт-карты, бирки) [4]. Предприятие производит радиочастотные метки (рис. 4, б) для маркировки меховых и ювелирных изделий, алкоголя, транспортные RFID-карты (в частности, проездные билеты для московского метрополитена и олимпийских поездов в г. Сочи, карту «Тройка») – более 100 различных продуктов, использующихся для систем логистики, аутентификации, автоматического контроля, учета доступа, оплаты проезда и социальных программ.



Рис. 4. Радиочастотные метки: а – RFID-инлеи РУП «Криптотех» Гознака (Беларусь); б – RFID-инлеи и метки ПАО «Микрон»

RFID-метки востребованы при хранении и перевозке денежных средств, ценностей, конфиденциальных документов с использованием специализированных сейф-пакетов, которые защищены от несанкционированного доступа (механического, химического, термического воздействия) и имеют несколько уровней безопасности (рис. 5). Радиочастотная метка хранит всю необходимую информацию о содержимом пакета и логистических операциях, позволяет отследить сейф-пакет, проконтролировать подлинность и сохранность вложения, упрощает идентификацию. При необходимости информацию можно считать с помощью смартфона, оборудованного соответствующим программным обеспечением.



Рис. 5. Защищенные сейф-пакеты с RFID-метками компании Adsure [5]

Как правило, чип и антенна находятся внутри документа, а визуальные защитные признаки располагаются на его поверхности. Компания OVD KINEGRAM (производитель защитных кинеграм) спроектировала антенну таким образом, что она демонстрирует специфическое изображение через прозрачное окно в поликарбонатном документе [6].



Рис. 6. Антенны от OVD KINEGRAM на обратной стороне поликарбонатного ID-документа

Антенна индивидуальной конфигурации (рис. 6, а) может сочетаться с наложением различных видов защитных кинеграмм (рис. 6, б, в) или дифракционным изображением, встроенным в материал антенны.

Настроенное изображение антенны служит дополнительной защитой документа от несанкционированного доступа (рис. 6, г). Так как дизайн (фотография, изображение антенны, защитные элементы) являются одновременно и частью электронной схемы, то попытки их изменения приводят к потере функциональности схемы, что может быть легко обнаружено [7].

RFID-технология обладает рядом неоспоримых преимуществ по сравнению с технологиями, использующими штрих-коды и QR-коды:

- возможность быстрого и многократного нанесения информации, а также (при необходимости) ее изменения;
- продолжительный срок службы;
- гораздо большая информационная емкость при значительно меньшей площади размещения на объекте;
- возможность скрытого размещения (не на поверхности объекта), что позволяет защитить метку от внешних воздействий;
- запись данных бесконтактным способом;
- точное и быстрое распознавание в любом положении объекта по отношению к считывающему устройству (отсутствие прямой видимости метки);
- использование на удаленном расстоянии;
- защита от несанкционированного доступа;
- значительное сокращение временных и трудовых затрат для автоматического получения большого массива данных и инвентаризации объектов;
- возможность группового считывания (антиколлизийный мульти-доступ);
- возможность считывания информации неспециализированными устройствами (любыми устройствами с NFC-модулем).

Из недостатков использования RFID-меток стоит отметить более высокую их стоимость, но развитие полиграфических технологий, в частности, нанопечати, позволяет удешевить их производство. Нанопечать RFID-меток осуществляется специальными чернилами с углеродными нанотрубками на полимерной пленке (предполагается, что в будущем можно будет осуществлять печать и на бумаге).

RFID-метку необходимо дополнять другими способами защиты (полиграфическими, криптографическими, физико-химическими). Технология RFID развивается быстрыми темпами, и ее использование в защищенной полиграфии позволит повысить степень защиты документов, а также автоматизировать и упростить процедуру их идентификации и аутентификации.

Список литературы

1. Контрольные идентификационные знаки (КиЗ) // Акционерное общество «Гознак» [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: <http://goznak.ru/products/4317> (дата обращения 06.03.2018).
2. Киселева Е. Высокая банкнотная мода // Водяной знак, 2016. № 6. С. 8-13.
3. RFid-продукция // РУП «Криптотех» Гознака [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: <http://cryptotech.by/catalog/rfid/> (дата обращения 19.03.2018).
4. RFID-чипы, метки и карты // Micron. Группа компаний «Микрон» [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: <http://www.mikron.ru/products/rfid-chip-inlays-maps/> (дата обращения 04.03.2018).
5. RFID Security Bags // Adsure [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: <http://www.adsurepackaging.com/product-item/rfid-security-bags/> (дата обращения 04.04.2018).
6. Meeting increasing demand for authentication – windows in identity documents // Reconnaissance [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: <https://www.reconnaissance.net/secure-document-news/issues/july-2016/> (дата обращения 11.03.2018).
7. [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: <https://www.kinegram.com/en/rfid/applications/customized-antenna/> (дата обращения 06.03.2018).

Голубничая Яна Романовна, магистрант, yana_tula@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Проскуряков Николай Евгеньевич, д-р техн. наук, проф., vippne@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

APPLICATION OF RADIO FREQUENCY IDENTIFICATION IN SECURE PRINTING

Y.R. Golubnichaya, N.E. Proskuriakov

It shows the principle of the radio frequency tag operation, and discussed options for the use of RFID in security printing.

Key words: Radio Frequency IDentification, RFID, radio tag, transponder, biometric passport, control identification mark, CiM.

Golubnichaya Yana Romanovna, post-graduate student, yana_tula@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Proskuriakov Nikolay Evgenevich, doctor of technical sciences, professor, vippne@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ДОЛИВОВ НА ТЕРМООКИСЛИТЕЛЬНУЮ СТАБИЛЬНОСТЬ СИНТЕТИЧЕСКИХ МОТОРНЫХ МАСЕЛ

Д.В. Агровиченко, Б.И. Ковальский, Ю.Н. Безбородов

Представлены результаты исследования термоокислительной стабильности синтетических моторных масел CastrolMagnatec 5W-40 SL/CF, Лукойл Синтетик 5W-40 SL/CF и MannolElite 5W-40 SL/CF при испытании без доливов и с доливами. Предложен показатель влияния доливов на термоокислительную стабильность масел, определяемый отношением скоростей изменения коэффициента термоокислительной стабильности при испытании масел без доливов и с доливами.

Ключевые слова: коэффициент термоокислительной стабильности, доливы, показатель влияния доливов, синтетическое моторное масло.

В настоящее время промышленностью выпускаются масла на нефтяной, синтетической и смешанной основах. Наибольшее распространение получили масла на нефтяной основе. Недостатками моторных масел на нефтяной основе являются плохие низкотемпературные свойства, неудовлетворительные термическая и окислительная стабильности. У синтетических масел эти показатели значительно выше. К синтетическим базовым маслам относятся полиальфаолефиновые масла, сложные эфиры дикарбоновых кислот, эфиры фосфорной кислоты, сложные эфиры неопентиловых спиртов и полиорганосилоксаны. Такие масла характеризуются пологой вязкостно-температурной кривой, малой испаряемостью, хорошими низкотемпературными свойствами, высокой огнестойкостью, хорошими смазывающими свойствами, высокими термической и термоокислительной стабильностями, химической инертностью, радиационной стойкостью [1, 2].

Одним из важнейших свойств как минеральных, так и синтетических моторных масел, определяющих возможность применения и сроки смены смазывающего материала, является их термоокислительная стабильность, требования к которой все более возрастают по мере совершенствования техники [3]. Именно значение термоокислительной стабильности, характеризующее количество тепловой энергии, поглощенной продуктами окисления и испарения, дает максимально точное представление о качестве моторного масла. Наибольшее влияние на скорость окисления оказывает температура. На механизм окисления также влияют доливы, необходимость которых обосновывается негерметичностью масляной системы и угаром смазочного материала. Однако степень и характер влияния доливов на термоокислительную стабильность моторных масел изучены недостаточно.

Целью настоящих экспериментальных исследований является определение влияния доливов на термоокислительную стабильность синтетических масел.

Для исследования выбраны синтетические всесезонные универсальные моторные масла, CastrolMagnatec 5W-40 SL/CF, Лукойл Синтетик 5W-40 SL/CF и MannolElite 5W-40 SL/CF применяемые в бензиновых и дизельных двигателях. Класс вязкости – 5W-40, группа эксплуатационных свойств по классификации API – SL/CF.

Исследования проводились на следующих средствах контроля и испытания: прибор для термостатирования, фотометрическое устройство, электронные весы и малообъемный вискозиметр, техническая характеристика которых приведена в работе [2].

Методика исследования заключалась в испытании исследуемых масел последовательно при температурах 190, 180, 170 и 160 °С для масла CastrolMagnatec 5W-40 SL/CF и при температурах 180 и 170 °С для масел Лукойл Синтетик 5W-40 SL/CF и MannolElite 5W-40 SL/CF без доливов и с доливками, причем масса доливаемого масла соответствовала массе испарившегося. Масса пробы масла при испытании с доливками составляла $100 \pm 0,1$ г.

Проба масла массой $100 \pm 0,1$ г заливалась в стеклянный стакан прибора для термостатирования и окислялась при заданной температуре в течение определенного времени с перемешиванием механической стеклянной мешалкой с частотой вращения 300 об/мин. В процессе термостатирования температура и частота вращения мешалки поддерживались автоматически. После каждого промежутка времени проба окисленного масла взвешивалась и определялась масса испарившегося масла G , далее отбирались части пробы (2 г) для прямого фотометрирования и определения коэффициента поглощения светового потока K_{Π} при толщине фотометрируемого слоя 2 мм и определения кинематической вязкости:

$$K_{\Pi} = \frac{300 - \Pi}{300}, \quad (1)$$

где 300 – показания фотометра при настройке и отсутствии масла в кювете, мкА; Π – показания фотометра при заполненной маслом кювете, мкА.

После измерения масло с кюветы и вискозиметра сливалось в стеклянный стакан прибора для термостатирования, который повторно взвешивался. В случае испытания с доливками проба масла в стакане доливалась товарным маслом до массы $100 \pm 0,1$ г. Испытания исследуемого масла прекращались по достижению коэффициентом поглощения светового потока значения, равного 0,6.

В процессе окисления изменяются коэффициент K_{Π} и испаряемость G , поэтому коэффициент термоокислительной стабильности $K_{\text{ТОС}}$ определялся как сумма [4]:

$$K_{\text{ТОС}} = K_{\Pi} + K_G, \quad (2)$$

где K_G – коэффициент испаряемости исследуемого масла, определяемый отношением:

$$K_G = \frac{m}{M}, \quad (3)$$

где m – масса испарившегося масла за время испытания t , г; M – масса пробы до испытания, г.

Коэффициент термоокислительной стабильности является безразмерным и характеризует количество тепловой энергии, поглощенной продуктами окисления и испарения.

Результаты исследования и их обсуждение. На рис. 1 представлены зависимости коэффициента термоокислительной стабильности $K_{ТОС}$, учитывающего характер процессов окисления и испарения, от времени испытания t моторного масла CastrolMagnatec 5W-40 SL/CF без доливов и с доливками.

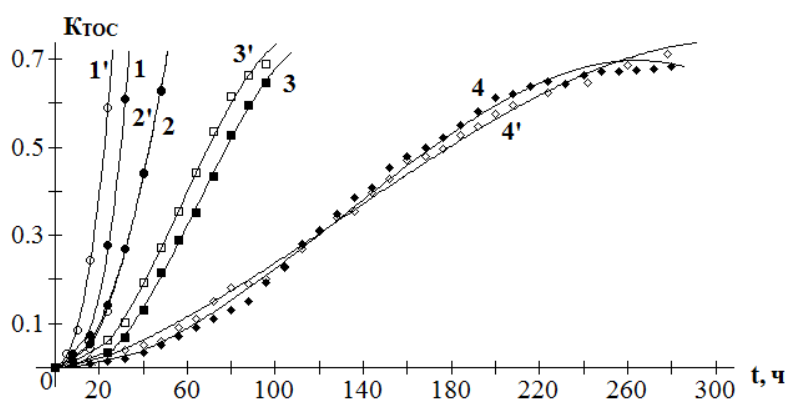


Рис. 1. Зависимости коэффициента термоокислительной стабильности от времени испытания синтетического моторного масла CastrolMagnatec 5W-40 SL/CF: 1, 1' – 190 °С; 2, 2' – 180 °С; 3, 3' – 170 °С; 4, 4' – 160 °С; 1, 2, 3, 4 – без доливов; 1', 2', 3', 4' – с доливками

Установлено, что доливки неоднозначно влияют на окислительные процессы. Так, при температуре испытания 180° С доливки не оказывают воздействия на процессы окисления и испарения в масле (кривая 2'), при температурах 190 и 170 °С – ускоряют их за один и тот же период времени (кривые 1' и 3'), а при температуре 160 °С – проявляют свойства то ингибитора, то катализатора в зависимости от времени испытания (кривая 4').

С понижением температуры испытания до 160 °С наблюдается область стабилизации значения коэффициента $K_{ТОС}$ на уровне от 0,65 до 0,7, которая характеризуется уменьшением скоростей процессов окисления и испарения. Это можно объяснить недостаточным количеством тепловой энергии для дальнейшего преобразования продуктов окисления.

Зависимость коэффициента термоокислительной стабильности от времени испытания масла CastrolMagnatec 5W-40 SL/CF (рис. 1) можно представить в виде алгебраического уравнения третьей степени. Регрессионные уравнения масел, испытанных без доливов, имеют вид для температур:

$$190\text{ }^{\circ}\text{C} \quad K_{\text{ТОС}} = 1,855 \cdot 10^{-5} t^3 - 4,0179 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,00135t + 0,00246, \quad (4)$$

$$180\text{ }^{\circ}\text{C} \quad K_{\text{ТОС}} = -3,798 \cdot 10^{-7} t^3 + 3,283 \cdot 10^{-4} t^2 - 0,00179t + 0,0029, \quad (5)$$

$$170\text{ }^{\circ}\text{C} \quad K_{\text{ТОС}} = -1,0690 \cdot 10^{-6} t^3 + 2,0631 \cdot 10^{-4} t^2 - 0,00318t + 0,00076, \quad (6)$$

$$160\text{ }^{\circ}\text{C} \quad K_{\text{ТОС}} = -7,403 \cdot 10^{-8} t^3 + 2,897 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,00019t - 0,0105. \quad (7)$$

При испытаниях масла с доливами регрессионные уравнения составили при температурах:

$$190\text{ }^{\circ}\text{C} \quad K_{\text{ТОС}} = 1,395 \cdot 10^{-5} t^3 + 6,339 \cdot 10^{-4} t^2 + 0,00130t + 0,00148, \quad (8)$$

$$180\text{ }^{\circ}\text{C} \quad K_{\text{ТОС}} = -1,519 \cdot 10^{-6} t^3 + 4,226 \cdot 10^{-4} t^2 - 0,00375t + 0,00505, \quad (9)$$

$$170\text{ }^{\circ}\text{C} \quad K_{\text{ТОС}} = -1,298 \cdot 10^{-6} t^3 + 2,240 \cdot 10^{-4} t^2 - 0,00208t - 0,00257. \quad (10)$$

$$160\text{ }^{\circ}\text{C} \quad K_{\text{ТОС}} = -3,639 \cdot 10^{-8} t^3 + 1,447 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,00146t - 0,0170. \quad (11)$$

На рис. 2 представлены зависимости коэффициента термоокислительной стабильности $K_{\text{ТОС}}$ от времени испытания t моторного масла Лукойл Синтетик 5W-40 SL/CF без доливов и с доливами.

Выявлено, что доливы масла увеличивают интенсивность процессов окисления и испарения на всем временном интервале испытания. Общей закономерностью при изменении коэффициента $K_{\text{ТОС}}$ является наличие участка резкого его возрастания после 200 ч при температуре испытания 180 °C (кривые 1 и 1') и после 300 ч при температуре испытания 170 °C (кривые 2 и 2'). Стремительное увеличение значения коэффициента $K_{\text{ТОС}}$ вызвано ускорением окислительных процессов. Участку резкого возрастания предшествует область стабилизации, как и в случае испытания синтетического моторного масла CastrolMagnetec 5W-40 SL/CF. Однако при испытании синтетического масла Лукойл Синтетик 5W-40 SL/CF замедление термоокислительных процессов происходит уже при значении коэффициента $K_{\text{ТОС}}$ от 0,25 до 0,35, что соответствует 70 ч испытания при 180 °C (кривые 1 и 1') и 170 ч и 100 ч при испытании масла без доливов (кривая 2) и с доливами (кривая 2') соответственно.

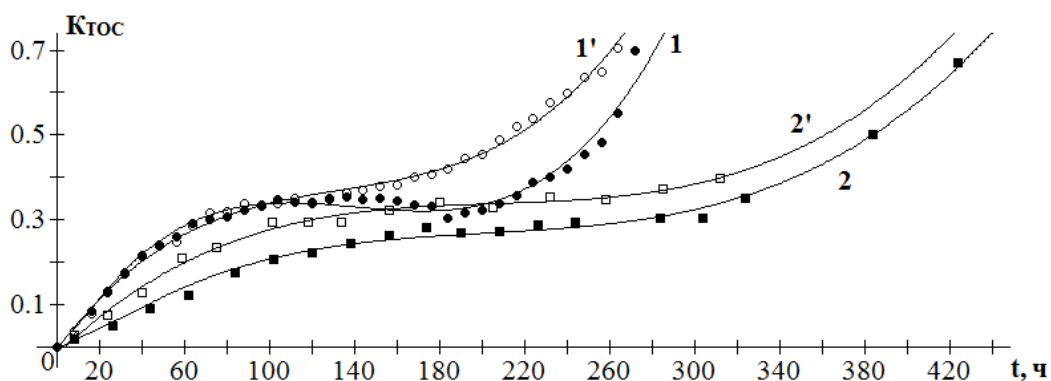


Рис. 2. Зависимости коэффициента термоокислительной стабильности от времени испытания синтетического моторного масла Лукойл Синтетик 5W-40 SL/CF: 1, 1' – 180 °C; 2, 2' – 170 °C; 1, 2 – без доливов; 1', 2' – с доливами

В случае испытаний масла без доливов регрессионные уравнения зависимостей (рис. 2) составили при температурах:

$$180\text{ }^{\circ}\text{C} \quad K_{\text{ТОС}} = 1,558 \cdot 10^{-7} t^3 - 6,566 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,00877 t - 0,0372, \quad (12)$$

$$170\text{ }^{\circ}\text{C} \quad K_{\text{ТОС}} = 3,0375 \cdot 10^{-8} t^3 - 1,846 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,00402 t - 0,0399. \quad (13)$$

При испытаниях масла с доливками регрессионные уравнения составили при температурах:

$$180\text{ }^{\circ}\text{C} \quad K_{\text{ТОС}} = 1,117 \cdot 10^{-7} t^3 - 4,491 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,00683 t - 0,00650, \quad (14)$$

$$170\text{ }^{\circ}\text{C} \quad K_{\text{ТОС}} = 3,652 \cdot 10^{-8} t^3 - 2,261 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,00484 t - 0,0176. \quad (15)$$

На рис. 3 представлены зависимости коэффициента термоокислительной стабильности $K_{\text{ТОС}}$ от времени испытания t моторного масла MannolElite 5W-40 SL/CF без доливов и с доливками.

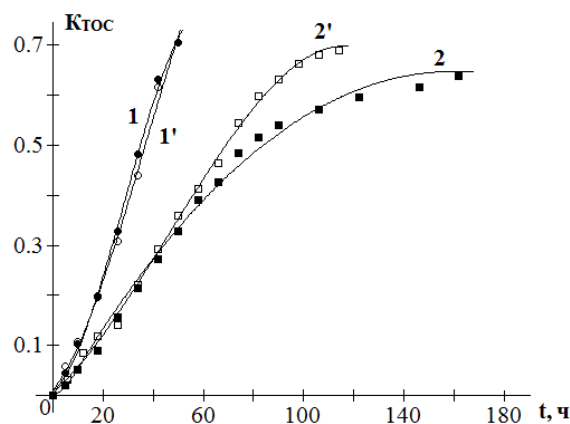


Рис. 3. Зависимости коэффициента термоокислительной стабильности от времени испытания синтетического моторного масла MannolElite 5W-40 SL/CF: 1, 1' – 180 °C; 2, 2' – 170 °C; 1, 2 – без доливов; 1', 2' – с доливками

Графическое представление процесса термоокисления масла MannolElite 5W-40 SL/CF схоже с графическими зависимостями коэффициентов термоокислительной стабильности от времени испытания синтетических моторных масел CastrolMagnatec 5W-40 SL/CF и Лукойл Синтетик 5W-40 SL/CF. Однако в отличие от масла Лукойл Синтетик 5W-40 SL/CF в исследуемом масле отсутствует участок резкого увеличения коэффициента $K_{\text{ТОС}}$. Область стабилизации значения коэффициента $K_{\text{ТОС}}$ наблюдается при температуре 170 °C после 100 ч испытания (кривые 2 и 2'). Отмечено, что доливы увеличивают интенсивность процессов окисления и испарения после 50 ч испытания при температуре 170 °C. При температуре 180 °C влияние доливов не обнаружено.

В случае испытаний масла без доливов регрессионные уравнения зависимостей (рис. 3) составили при температурах:

$$180\text{ }^{\circ}\text{C} \quad K_{\text{ТОС}} = -5,885 \cdot 10^{-6} t^3 + 5,0148 \cdot 10^{-4} t^2 + 0,00375 t + 0,00827, \quad (16)$$

$$170\text{ }^{\circ}\text{C} \quad K_{\text{ТОС}} = 1,169 \cdot 10^{-8} t^3 - 3,0283 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,00878 t - 0,0307. \quad (17)$$

При испытаниях масла с доливами регрессионные уравнения составили при температурах:

$$180\text{ }^{\circ}\text{C} \quad K_{\text{ТОС}} = -2,615 \cdot 10^{-6} t^3 + 2,920 \cdot 10^{-4} t^2 + 0,00608 t - 0,0103, \quad (18)$$

$$170\text{ }^{\circ}\text{C} \quad K_{\text{ТОС}} = -5,593 \cdot 10^{-7} t^3 + 7,802 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,00445 t + 0,0050. \quad (19)$$

Величина влияния доливов на термоокислительную стабильность синтетических моторных масел CastrolMagnatec 5W-40 SL/CF, Лукойл Синтетик 5W-40 SL/CF и MannolElite 5W-40 SL/CF оценивалась показателем влияния доливов $\Pi_{\text{Д}}$ при времени испытания, равном 40 ч. Показатель влияния доливов на коэффициент термоокислительной стабильности $K_{\text{ТОС}}$ определялся отношением:

$$\Pi_{\text{Д}} = \frac{V_{K_{\text{ТОС}}}}{V_{K_{\text{ТОСД}}}}, \quad (20)$$

где $V_{K_{\text{ТОС}}}$ и $V_{K_{\text{ТОСД}}}$ – скорости изменения коэффициента термоокислительной стабильности $K_{\text{ТОС}}$ при испытании масла без доливов и с доливами соответственно, ч^{-1} .

Скорости изменения коэффициента термоокислительной стабильности были определены путем нахождения производных регрессионных уравнений 5, 6, 9, 10, 12 – 19 и сведены в таблицу. Значения показателей влияния доливов на коэффициент термоокислительной стабильности $K_{\text{ТОС}}$ так же представлены в таблице.

Результаты вычисления скоростей изменения коэффициента термоокислительной стабильности и скоростных показателей влияния доливов на коэффициент термоокислительной стабильности синтетических моторных масел

Марка моторного масла	Температура испытания, $^{\circ}\text{C}$	Скорость изменения коэффициента термоокислительной стабильности масла (время испытания $t = 40$ ч)		Скоростной показатель влияния доливов на коэффициент термоокислительной стабильности масла $\Pi_{\text{Д}}$
		без доливов, $V_{K_{\text{ТОС}}}, \text{ч}^{-1}$	с доливами, $V_{K_{\text{ТОСД}}}, \text{ч}^{-1}$	
Castrol Magnatec 5W-40 SL/CF	180	0,0227	0,0228	0,996
	170	0,00819	0,00961	0,852
Лукойл Синтетик 5W-40 SL/CF	180	0,00426	0,00377	1,130
	170	0,00269	0,00321	0,838
Mannol Elite 5W-40 SL/CF	180	0,0156	0,0169	0,923
	170	0,00641	0,00801	0,800

Значение показателя влияния доливов P_d меньше единицы свидетельствует об ускорении термоокислительных процессов в масле в результате доливов, значение больше единицы – об их замедлении.

Исходя из представленных данных (таблица), можно сделать вывод о том, что за время испытания $t = 40$ ч доливы повышают интенсивность процессов окисления и испарения в синтетических маслах на всем исследуемом температурном интервале. Так, при температуре 170 °С скорость термоокислительных процессов в случае испытания масла с доливками увеличилась в сравнении со скоростью термоокислительных процессов в случае испытания масла без доливов для исследуемых синтетических моторных масел в процентном отношении: CastrolMagnatec 5W-40 SL/CF – на 14,8 %, Лукойл Синтетик 5W-40 SL/CF – 16,2 %, MannolElite 5W-40 SL/CF – 20,0 %. При температуре испытания 180 °С в случае испытания масла с доливками наблюдается небольшое повышение интенсивности процессов окисления и испарения. В процентном эквиваленте увеличение составило для масел CastrolMagnatec 5W-40 SL/CF и MannolElite 5W-40 SL/CF соответственно 0,4 и 7,7 %. Исключение составляет испытание синтетического моторного масла Лукойл Синтетик 5W-40 SL/CF при 180 °С. Здесь наблюдается снижение скорости процессов на 11,5 %.

Выводы. На основе проведенных исследований установлено, что влияние доливов на коэффициент термоокислительной стабильности синтетических моторных масел зависит от температуры и времени термостагирования, однако сохраняется общая тенденция ускорения процессов окисления.

Список литературы

1. Гришин Н.Н., Середа В.В. Энциклопедия химмотологии. М.: Издательство «Перо», 2016. 960 с.
2. Ковальский Б.И. Методы и средства повышения эффективности использования смазочных материалов. Новосибирск: Наука, 2005. 341 с.
3. Гулин Е.И., Горенков А.Ф., Зайцев С.Н., Бузин В.Н., Якубо Д.П., Токарь И.Я., Партей В.И., Гордейко М.М. Применение горючего в военной технике / под ред. А.М. Сиренко. М.: Военное изд-во, 1989. 432 с.
4. Пат. № 2371706 РФ. МПК G01N 25/00. Способ определения термоокислительной стабильности смазочных материалов / Б.И. Ковальский, Е.А. Вишневская, Ю.Н. Безбородов, Н.Н. Малышева: опубл. 27.10.2009. Бюл. № 30.

Агровиченко Дарья Валентиновна, асп., ст. преподаватель dagrovichenko@sfu-kras.ru, Россия, Красноярск, Сибирский федеральный университет, Институт нефти и газа,

Ковальский Болеслав Иванович, д-р техн. наук, проф., Labsm@mail.ru, Россия, Красноярск, Сибирский федеральный университет, Институт нефти и газа,

Безбородов Юрий Николаевич, д-р техн. наук, проф., Labsm@mail.ru, Россия, Красноярск, Сибирский федеральный университет, Институт нефти и газа

**RESEARCH RESULTS OF MAKEUP INFLUENCE ON SYNTHETIC MOTOR OILS
THERMAL OXIDATION STABILITY**

D. V. Agrovichenko, B.I. Kowalski, Bezborodov Yuri N.

Research results of thermal oxidation stability of synthetic motor oils Castrol Magnatec 5W-40 SL/CF, Lukoil Sintetik 5W-40 SL/CF and Mannol Elite 5W-40 are presented in cases of research with makeup and without it. The indicator of makeup influence on motor oils thermal oxidation stability determined by the relation of change speed of thermal oxidation stability coefficient in cases of research with makeup and without it is offered.

Key words: thermal oxidation stability coefficient, makeup, indicator of makeup influence, synthetic motor oil.

Agrovichenko Darya Valentinovna, postgraduate, senior lecturer, dagrovichenko@sfu-kras.ru, Russia, Krasnoyarsk, Siberian Federal University, Institute of Oil and Gas,

Kowalski Boleslav Ivanovich, doctor of technical sciences, professor, Labsm@mail.ru, Russia, Krasnoyarsk, Siberian Federal University, Institute of Oil and Gas

Bezborodov Yuri Nilolaevich, doctor of technical sciences, professor, Labsm@mail.ru, Russia, Krasnoyarsk, Siberian Federal University, Institute of Oil and Gas

РОБАСТНАЯ ПРОЦЕДУРА АКТИВНОЙ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ СТОХАСТИЧЕСКИХ ЛИНЕЙНЫХ ДИСКРЕТНЫХ СИСТЕМ

В. М. Чубич, А. Э. Прокофьева

На основе фильтра Изанлу – Фейкуриана – Джазди – Саймона предложена робастная процедура активной параметрической идентификации стохастических линейных дискретных систем, включающая в себя робастное оценивание параметров и планирование входных сигналов. Разработано соответствующее программно-математическое обеспечение. Эффективность применения процедуры продемонстрирована на примере модели системы управления положением двигателя постоянного тока при группированном характере расположения аномальных наблюдений.

Ключевые слова: активная параметрическая идентификация, аномальные наблюдения, критерий квазиправдоподобия, информационная матрица Фишера, планирование эксперимента, робастное оценивание, фильтр Изанлу – Фейкуриана – Джазди – Саймона, стохастическая линейная дискретная система.

Проблема идентификации, связанная с построением математических моделей динамических систем по экспериментальным данным, относится к одной из основных проблем теории и практики автоматического управления. Ее качественное решение способствует эффективному применению на практике современных математических методов и наукоемких технологий, например, при расчете и проектировании систем управления подвижными (в том числе авиационно-космическими) и технологическими объектами, построении прогнозирующих моделей (например, в экономике и бизнес-процессах), конструировании следящих и измерительных систем.

Первоначально методология построения динамических моделей развивалась в рамках пассивного подхода, при котором идентификация проводится в режиме нормальной эксплуатации исследуемой системы. Современная теория включает в себя также методы активной идентификации, предполагающие подачу на вход исследуемой системы определенным образом синтезированных управляющих сигналов. При этом трудности, связанные с необходимостью нарушения технологического режима, окупаются за счет повышения эффективности и корректности проводимых исследований, что вытекает из самой идеологии активной идентификации, базирующейся на сочетании приемов параметрического оценивания и концепции планирования эксперимента.

При предварительно выбранной модельной структуре процедура активной идентификации систем предполагает выполнение следующих этапов:

- 1) вычисление оценок неизвестных параметров по экспериментальным данным, соответствующим пробному входному сигналу;

2) синтез оптимального входного сигнала на основе полученных оценок и по некоторому выбранному критерию;

3) пересчет оценок неизвестных параметров по экспериментальным данным, соответствующим синтезированному сигналу.

Применительно к моделям в пространстве состояний можно отметить, что среди публикаций по активной параметрической идентификации стохастических систем заметно преобладают работы, в которых используются детерминированные уравнения состояний (в качестве примера приведем [1-6]). Исследований, в которых используются стохастические модели состояний, выполнено заметно меньше (выделим [7-11]). По-видимому, данное обстоятельство связано с заметной сложностью вычисления информационной матрицы Фишера, лежащей в основе процедур численного построения оптимальных планов эксперимента. Косвенным подтверждением сказанному является то, что некоторые исследователи вместо непосредственного вычисления информационной матрицы предпочитают работать с ее приближенным аналогом [12-15]. В настоящий момент сложилась определенная диспропорция между относительно недавно полученными теоретическими результатами в области планирования эксперимента (имеются в виду выражения для информационных матриц Фишера применительно к различным модельным структурам из [16-19]) и их прикладным применением.

При решении практических задач довольно часто возникают ситуации, связанные с наличием аномальных наблюдений в измерительных данных, что может быть обусловлено отклонением распределения шума измерений от гауссовского. Использование алгоритмов, не позволяющих учесть появление таких наблюдений, может привести к смещению оценок и/или некорректному решению задачи оценивания. В связи с этим становится актуальной разработка робастных процедур активной параметрической идентификации стохастических динамических систем, в которых применяется тот или иной метод робастного оценивания неизвестных параметров. В настоящей статье авторы предпринимают попытку разработать подобную процедуру применительно к моделям стохастических линейных дискретных систем, взяв за основу коррентропийный фильтр Изанлу – Фейкуриана – Джазди – Саймона (один из наиболее эффективных робастных фильтров в настоящее время [20]), материалы по планированию эксперимента из [10, 11] и по робастному оцениванию из [21].

Постановка задачи. Рассмотрим следующую управляемую, наблюдаемую и идентифицируемую модель стохастической линейной дискретной системы в пространстве состояний:

$$x(t_{k+1}) = \Phi(t_k)x(t_k) + \Psi(t_k)u(t_k) + \Gamma(t_k)w(t_k), \quad (1)$$

$$y(t_{k+1}) = H(t_{k+1})x(t_{k+1}) + v(t_{k+1}), \quad k = 0, 1, \dots, N-1, \quad (2)$$

где $x(t_k)$ – n -вектор состояния; $u(t_k)$ – детерминированный r -вектор управления (входа); $w(t_k)$ – p -вектор шума системы; $y(t_{k+1})$ – m -вектор измерения (выхода); $v(t_{k+1})$ – m -вектор шума измерений.

Предположим, что:

– случайные векторы $w(t_k)$, $v(t_{k+1})$ образуют белые гауссовские последовательности, причем

$$\begin{aligned} E[w(t_k)] &= 0, \quad E[w(t_k)w^T(t_i)] = Q(t_k)\delta_{ki}, \\ E[v(t_{k+1})] &= 0, \quad E[v(t_{k+1})v^T(t_{i+1})] = R(t_{k+1})\delta_{ki}, \\ E[w(t_k)v^T(t_i)] &= 0, \quad k, i = 0, \dots, N-1 \end{aligned}$$

(здесь и далее $E[\bullet]$ – оператор математического ожидания, δ_{ki} – символ Кронекера);

– начальное состояние $x(t_0)$ имеет нормальное распределение с параметрами

$$\begin{aligned} E[x(t_0)] &= \bar{x}(t_0), \\ E[(x(t_0) - \bar{x}(t_0))(x(t_0) - \bar{x}(t_0))^T] &= P(t_0) \end{aligned}$$

и не коррелирует с $w(t_k)$, $v(t_{k+1})$ при любых значениях переменной k ;

– в выходных данных могут присутствовать аномальные наблюдения;

– неизвестные параметры сведены в вектор $\Theta = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_s) \in \Omega_\Theta$ и могут входить в элементы матриц $\Phi(t_k)$, $\Psi(t_k)$, $\Gamma(t_k)$, $H(t_{k+1})$, $Q(t_k)$, $R(t_{k+1})$, $P(t_0)$ и в вектор $\bar{x}(t_0)$ в различных комбинациях.

Необходимо для математической модели (1), (2) с учетом высказанных априорных предположений разработать на базе робастного фильтра Изанлу – Фейкуриана – Джазди – Саймона процедуру активной параметрической идентификации стохастических динамических системы и провести численное исследование эффективности ее применения.

Оценивание неизвестных параметров. Оценивание неизвестных параметров математической модели, описываемой уравнениями (1), (2), будем осуществлять по данным наблюдений Ξ в соответствии с некоторым критерием идентификации χ . Сбор данных происходит в процессе проведения идентификационных экспериментов, выполняющихся по некоторому плану ξ_V .

Предположим, что можно произвести ν запусков системы, причем сигнал U_1 подается на вход системы d_1 раз, сигнал U_2 – d_2 раз и т. д., наконец, сигнал U_q – d_q раз. В этом случае дискретный (точный) нормированный план эксперимента ξ_V имеет вид:

$$\xi_v = \left\{ \begin{matrix} U_1 & U_2 & \dots & U_q \\ \frac{d_1}{v} & \frac{d_2}{v} & \dots & \frac{d_q}{v} \end{matrix} \right\}, \quad U_i \in \Omega_U, i=1,2,\dots,q,$$

где $\Omega_U \subset \mathbb{R}^{Nr}$ – область допустимых входных сигналов.

Обозначим через $Y_{ij}^T = \left[\left[y^{ij}(t_1) \right]^T, \dots, \left[y^{ij}(t_N) \right]^T \right]$ j -ю реализацию выходного сигнала ($j=1,2,\dots,d_i$), соответствующую i -му входному сигналу $U_i^T = \left[\left[u^i(t_0) \right]^T, \dots, \left[u^i(t_{N-1}) \right]^T \right]$, $i=1,2,\dots,q$. Тогда в результате проведения экспериментов по плану ξ_v будет сформировано множество

$$\Xi = \left\{ (U_i, Y_{ij}), j=1,2,\dots,d_i, i=1,2,\dots,q \right\}, \sum_{i=1}^q d_i = v.$$

В качестве метода оценивания выберем метод максимального правдоподобия, обладающий такими важными для практики асимптотическими свойствами как несмещенность, состоятельность и эффективность [22, 23]. В силу того, что измерительные данные содержат аномальные наблюдения (распределение шума измерений может отличаться от нормального), будем вычислять квазиправдоподобные оценки [24], т.е. найдем такие значения $\hat{\Theta}$ из области допустимых значений Ω_Θ , для которых

$$\hat{\Theta} = \arg \min_{\Theta \in \Omega_\Theta} [\chi(\Theta; \Xi)] = \arg \min_{\Theta \in \Omega_\Theta} [-\ln L(\Theta; \Xi)]. \quad (3)$$

Здесь

$$\begin{aligned} \chi(\Theta; \Xi) = & \frac{Nm v}{2} \ln 2\pi + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^q \sum_{j=1}^{d_i} \sum_{k=0}^{N-1} \ln \det B^{ij}(t_{k+1}) + \\ & + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^q \sum_{j=1}^{d_i} \sum_{k=0}^{N-1} \left[\varepsilon^{ij}(t_{k+1}) \right]^T \left[B^{ij}(t_{k+1}) \right]^{-1} \varepsilon^{ij}(t_{k+1}), \end{aligned}$$

где $\varepsilon^{ij}(t_{k+1})$ и $B^{ij}(t_{k+1})$ определим по следующим рекуррентным уравнениям фильтра Изанлу – Фейкуриана – Джазди – Саймона из [25]:

$$\begin{aligned} \hat{x}^{ij}(t_{k+1} | t_k) &= \Phi(t_k) \hat{x}^{ij}(t_k | t_k) + \Psi(t_k) u^i(t_k); \\ P^{ij}(t_{k+1} | t_k) &= \Phi(t_k) P^{ij}(t_k | t_k) \Phi^T(t_k) + \Gamma(t_k) Q(t_k) \Gamma^T(t_k); \\ \varepsilon^{ij}(t_{k+1}) &= y^{ij}(t_{k+1}) - H(t_{k+1}) \hat{x}^{ij}(t_{k+1} | t_k); \end{aligned}$$

$$L^{ij}(t_{k+1}) = \exp \left(- \frac{\left[\varepsilon^{ij}(t_{k+1}) \right]^T R^{-1}(t_{k+1}) \varepsilon^{ij}(t_{k+1})}{2\sigma^2} \right);$$

$$\begin{aligned} B^{ij}(t_{k+1}) &= H(t_{k+1})P^{ij}(t_{k+1}|t_k)L^{ij}(t_{k+1})H^T(t_{k+1}) + R(t_{k+1}); \\ K^{ij}(t_{k+1}) &= P^{ij}(t_{k+1}|t_k)L^{ij}(t_{k+1})H^T(t_{k+1})\left[B^{ij}(t_{k+1})\right]^{-1}; \\ \hat{x}^{ij}(t_{k+1}|t_{k+1}) &= \hat{x}^{ij}(t_{k+1}|t_k) + K^{ij}(t_{k+1})\varepsilon^{ij}(t_{k+1}); \\ P^{ij}(t_{k+1}|t_{k+1}) &= \left[I - K^{ij}(t_{k+1})H(t_{k+1})\right]P^{ij}(t_{k+1}|t_k). \end{aligned}$$

Начальные условия для приведенных уравнений выбираются с учетом высказанных при постановке задачи априорных предположений ($\hat{x}^{ij}(t_0|t_0) = \bar{x}(t_0)$, $P^{ij}(t_0|t_0) = P(t_0)$), а параметр σ – в соответствии с материалами [20].

При решении задачи нелинейного программирования (3) воспользуемся методом последовательного квадратичного программирования [26, 27]. Данный метод относится к методам первого порядка, реализован в рамках пакета Optimization Toolbox программной системы MATLAB, и в настоящее время является одним из самых передовых и эффективных.

Планирование входных сигналов. Применение теории оптимального управления при оценивании неизвестных параметров позволяет повысить точность оценивания параметров за счет сбора наиболее информативных данных.

Под непрерывным нормированным планом ξ будем понимать совокупность величин

$$\xi = \begin{Bmatrix} U_1 & U_2 & \cdots & U_q \\ p_1 & p_2 & \cdots & p_q \end{Bmatrix}, \quad p_i \geq 0, \sum_{i=1}^q p_i = 1, U_i \in \Omega_U, i = 1, 2, \dots, q. \quad (4)$$

В отличие от дискретного плана ξ_v в непрерывном плане ξ веса p_i могут принимать любые значения, в том числе и иррациональные.

Информационная матрица $M(\xi)$ плана (4) определяется соотношением

$$M(\xi) = \sum_{i=1}^q p_i M(U_i, \hat{\Theta}),$$

в котором информационные матрицы Фишера одноточечных планов $M(U_i, \hat{\Theta})$ зависят от вектора оценок неизвестных параметров $\hat{\Theta}$ (что позволяет говорить о локально-оптимальном планировании) и вычисляются в соответствии с [18].

Оптимальный план эксперимента находится для некоторого выпуклого функционала X от информационной матрицы $M(\xi)$ путем решения следующей экстремальной задачи

$$\xi^* = \arg \min_{\xi \in \Omega_\xi} X[M(\xi)]. \quad (5)$$

Воспользуемся критерием D-оптимальности, для которого $X[M(\xi)] = -\ln \det M(\xi)$. Применение этого критерия способствует минимизации объема эллипсоида рассеяния оценок неизвестных параметров.

Возможны два подхода к решению экстремальной задачи (5): прямой и двойственный [1, 28-30]. Первый из них предполагает поиск минимума функционала $X[M(\xi)]$ непосредственно (при этом рекомендуется

выбирать $q = \frac{s(s+1)}{2} + 1$), второй – решение двойственной задачи. При

решении практических задач целесообразно применение так называемого комбинированного подхода, при котором для улучшения начального приближения плана сначала используют прямую процедуру, а затем – для получения окончательного результата – двойственную.

Представим, основываясь на методе последовательного квадратичного программирования, комбинированную процедуру построения непрерывных оптимальных планов при предварительно вычисленных оценках параметров $\hat{\Theta}$.

Шаг 1. Зададим начальный невырожденный план

$$\xi_0 = \left\{ \begin{matrix} U_1^0 & U_2^0 & \dots & U_q^0 \\ p_1^0 & p_2^0 & \dots & p_q^0 \end{matrix} \right\}, U_i^0 \in \Omega_U, p_i^0 = \frac{1}{q}, \quad i = 1, \dots, q.$$

Вычислим информационные матрицы одноточечных планов $M(U_i^0, \hat{\Theta})$ для $i = 1, \dots, q$ и положим $k = 0$.

Шаг 2. Считая веса плана $p_1^k, \dots, p_q^k$ фиксированными, найдем план

$$\bar{\xi}_{k+1} = \arg \min_{U_1^k, \dots, U_q^k \in \Omega_U} X[M(\xi_k)].$$

Вычислим информационный матрицы одноточечных планов $M(U_i^{k+1}, \hat{\Theta}), i = 1, \dots, q$.

Шаг 3. Зафиксировав точки спектра плана $\bar{\xi}_{k+1}$, найдем план

$$\xi_{k+1} = \arg \min_{p_1^k, p_2^k, \dots, p_q^k} X[M(\bar{\xi}_{k+1})], \quad p_i^k \geq 0, \quad \sum_{i=1}^q p_i^k = 1, \quad i = 1, \dots, q.$$

Шаг 4. Если для малого положительного δ_1 выполняется неравенство

$$\sum_{i=1}^q \left[\|U_i^{k+1} - U_i^k\|^2 + (p_i^{k+1} - p_i^k)^2 \right] \leq \delta_1,$$

то положим $\xi_0 = \xi_{k+1}$ (выполнение прямой процедуры закончено), $k = 0$ и перейдем на шаг 5. В противном случае примем $k = k + 1$ и перейдем на шаг 2.

Шаг 5. Вычислим информационную матрицу $M(\xi_k)$.

Шаг 6. Найдем локальный максимум

$$U^k = \arg \max_{U \in \Omega_U} Sp \left[M^{-1}(\xi_k) M(U) \right],$$

где под $Sp[\bullet]$ понимается след соответствующей матрицы. Если выполняется условие $\left| Sp \left[M^{-1}(\xi_k) M(U^k) \right] - s \right| \leq \delta_2$, то закончим процесс. Если $Sp \left[M^{-1}(\xi_k) M(U^k) \right] > s$, перейдем на шаг 7, в противном случае будем искать новый локальный максимум.

Шаг 7. Найдем τ_k

$$\tau_k = \arg \min_{0 \leq \tau \leq 1} X \left[M(\xi_{k+1}^\tau) \right].$$

Здесь $\xi_{k+1}^\tau = (1 - \tau) \xi_k + \tau \xi(U^k)$, где $\xi(U^k)$ – однотоочечный план, размещенный в точке U^k .

Шаг 8. Составим план

$$\xi_{k+1} = (1 - \tau_k) \xi_k + \tau_k \xi(U^k),$$

произведем его «очистку» плана, следуя [28], положим $k = k + 1$ и перейдем на шаг 5.

Приведенный алгоритм требует вычисление производных от информационной матрицы однотоочечных планов по компонентам входного сигнала (аналитическое выражение производной и алгоритм ее вычисления представлен в [11]).

Практическое применение синтезированного оптимального плана затруднительно, поскольку веса представляют собой произвольные вещественные числа, заключенные в интервале от нуля до единицы. В случае заданного числа ν возможных запусков системы необходимо провести «округление» непрерывного плана до дискретного [29], провести идентификационные эксперименты и пересчитать оценки неизвестных параметров.

Численные результаты эксперимента и их обсуждение. Реализуем описанную процедуру активной параметрической идентификации в рамках программной среды MATLAB и апробируем ее на модели системы управления положением, состоящей из антенны и двигателя постоянного тока [31].

Пусть первая компонента вектора состояния отвечает за угловое положение антенны, вторая – за ее угловую скорость; входным сигналом является напряжение на входе усилителя постоянного тока, управляющего двигателем; с помощью потенциометра измеряется угловое положение, и выполняются все априорные предположения, высказанные при постановке задачи. Тогда модели состояния и наблюдения в дискретные моменты времени определяются соотношениями:

$$x(t_{k+1}) = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{\theta_1}(1 - e^{-\theta_1 T}) \\ 0 & e^{-\theta_1 T} \end{bmatrix} x(t_k) + \begin{bmatrix} \frac{\theta_2}{\theta_1}(T - \frac{1}{\theta_1} + \frac{1}{\theta_1}e^{-\theta_1 T}) \\ \frac{\theta_2}{\theta_1}(1 - e^{-\theta_1 T}) \end{bmatrix} u(t_k) + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} w(t_k);$$

$$y(t_{k+1}) = [1 \ 0] x(t_{k+1}) + v(t_{k+1}), \quad k = 0, 1, \dots, N - 1,$$

где θ_1, θ_2 – неизвестные параметры и $\Omega_\Theta = \{1 < \theta_1 < 6, 0 < \theta_2 < 1\}$.

Положим $T = 0.1$, $N = 30$, $Q(t_k) = Q = 0.01$, $R(t_{k+1}) = R = 0.1$,

$\bar{x}(t_0) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$, $P(t_0) = \begin{bmatrix} 0.01 & 0 \\ 0 & 0.01 \end{bmatrix}$ и зададим значение параметра фильтра

Исанлу – Фейкуриана – Джазди – Саймона $\sigma = 1$.

В качестве области допустимых входных сигналов выберем

$$\Omega_U = \left\{ U \in \square^N \mid 2 \leq u(t_k) \leq 20, k = 0, 1, \dots, N - 1 \right\}.$$

Для ослабления зависимости результатов оценивания от выборочных данных проведем пять независимых запусков системы, а полученные оценки неизвестных параметров усредним. Реализации выходных сигналов получим компьютерным моделированием при истинных значениях параметров $\theta_1^* = 4.600$, $\theta_2^* = 0.787$ [31], расположив подряд три аномальных наблюдения с дисперсией шума $R_A = 100R$ в середине выборки.

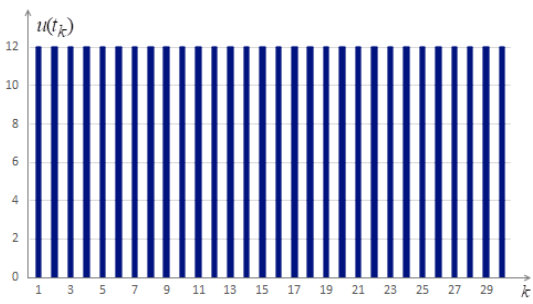
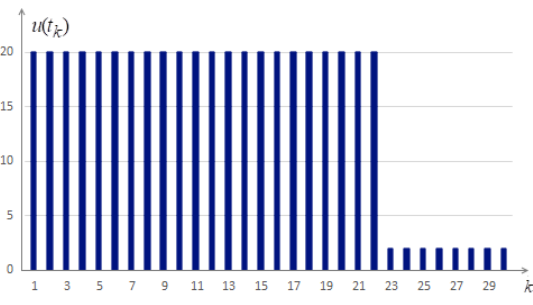
О качестве параметрической идентификации будем судить по значению относительной ошибки оценивания δ_θ , вычисляемой по формуле:

$$\delta_\theta = \sqrt{\frac{(\theta_1^* - \hat{\theta}_1)^2 + (\theta_2^* - \hat{\theta}_2)^2}{(\theta_1^*)^2 + (\theta_2^*)^2}},$$

где $\hat{\Theta} = (\hat{\theta}_1, \hat{\theta}_2)$ – вектор оценок неизвестных параметров.

Результаты выполнения робастной процедуры активной параметрической идентификации представлены в таблице (оптимальный план получился одноточечным).

Результаты выполнения робастной процедуры активной параметрической идентификации

Исходный и синтезированный входные сигналы вместе со значениями критерия оптимальности	Номер запуска системы	Оценки и ошибка оценивания		
		$\hat{\theta}_1$	$\hat{\theta}_2$	δ_θ
 $X[M(\xi)] = -7.6551$	1	4.2188	0.6707	0.084
	2	4.2263	0.7204	0.081
	3	4.0909	0.6724	0.112
	4	4.9774	0.9003	0.084
	5	4.2188	0.6707	0.085
	Среднее значение по запускам	4.3464	0.7269	0.089
 $X[M(\xi)] = -10.1402$	1	4.7761	0.8134	0.038
	2	4.3398	0.7388	0.057
	3	4.7784	0.8330	0.039
	4	4.8019	0.8661	0.046
	5	4.4058	0.7642	0.042
	Среднее значение по запускам	4.6204	0.8031	0.045

Анализ содержимого таблицы показывает, что планирование входных сигналов с использованием комбинированной процедуры позволяет повысить качество оценивания на 4.4% процента

Заключение. Для моделей стохастических линейных дискретных систем на основе фильтра Изанлу – Фейкуруиана – Джазди – Саймона разработана робастная процедура активной параметрической идентификации, включающая в себя робастное оценивание параметров и планирование входных сигналов. Рассмотрен случай вхождения неизвестных параметров в уравнения состояния, наблюдения, начальное условие и ковариационные матрицы шума системы и измерений. Эффективность разработанной робастной процедуры активной параметрической идентификации продемонстрирована на примере модели системы управления положением двигателя постоянного тока при группированном характере расположения аномальных наблюдений.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ по государственному заданию (проект № 2.7996.2017/8.9).

Список литературы

1. Денисов В.И., Попов А.А. Пакет программ оптимального планирования эксперимента. М.: Финансы и статистика, 1986. 159 с.
2. Morelli E.A. Flight test of optimal inputs and comparison with Conventional Inputs // Journal of aircraft, 1999. Vol. 36. №2. P. 389-397.
3. Овчаренко В.Н. Планирование идентифицирующих входных сигналов в линейных динамических системах // Автоматика и телемеханика, 2001. № 2. С. 75-87.
4. Jauberthie C, Bournonville F., Coton P., Rendell F. Optimal input design for aircraft parameter // Aerospace science and technology, 2006. №10. P.331-337.
5. Jakowluk W. Design of an optimal input signal for plant-friendly identification of inertial systems // Przegląd Elektrotechniczny, 2009. R. 85 (10). P. 123-128.
6. Galvanin F., Marchesini R., Barolo M., Bezzi F., Fidaleo Optimal design of experiments for parameter identification in electrolysis models // Chemical engineering research and design, 2016. № 105. P. 107-119.
7. Mehra R.K. Synthesis of optimal inputs for multiinput – multioutput (MIMO) systems with process noise. Part II: time domain synthesis // System identification – advances and case studies. New York: Academic press, 1976. P. 230-249.
8. Goodwin G.C., Payne R.L Dynamic system identification: experiment design and data analysis. New York: Academic Press, 1977. 302 P.
9. Денисов В.И., Чубич В.М., Черникова О.С., Бобылева Д.И. Активная параметрическая идентификация стохастических линейных систем: монография. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009. 192 с.
10. Чубич В.М. Оптимальная идентификация дискретных систем на основе метода статистической линеаризации // Информационные технологии и вычислительные системы, 2010. № 4. С. 47-56.
11. Чубич В.М. Информационная технология активной параметрической идентификации стохастических квазилинейных дискретных систем // Информатика и ее применения, 2011. Т. 5. №1. С.46-57.
12. Gupta N.K., Mehra R.K. Computational aspects of maximum likelihood estimation and reduction in sensitivity function calculations // IEEE Transactions on automatic control, 1974. Vol. 19. № 6. P. 774-783.
13. Zadrozny P.A., Mittnik S. Kalman-Filtering methods for computing information matrices for Time-Invariant, periodic, and generally time-varying VARMA models and samples // Computer Math. Applic, 1994. Vol. 28. P. 107-119.

14. Еланцева И.Л., Денисов В.И., Полетаева И.А. Активная идентификация авторегрессионных моделей со скользящим средним // Научный вестник НГТУ, 2006. №3(24). С.27-34.
15. Kok M., Dahlin J., Schon T.B., Wills A. Newton-based maximum likelihood estimation in nonlinear state models // IFAC-PapersOnLine, 2015. Vol. 48. P. 398-403.
16. Klein A., Melard G., Zahaf T. Construction of the exact Fisher information matrix of Gaussian time series models by means of matrix differential rules // Linear Algebra and its Applications, 2000. Vol. 321. P. 209-232.
17. Klein A., Melard G., An algorithm for the exact Fisher information matrix of vector ARMAX time series // Linear Algebra and its Applications, 2014. Vol. 446. P. 1-24.
18. Чубич В.М. Вычисление информационной матрицы Фишера в задаче активной параметрической идентификации стохастических нелинейных дискретных систем // Научный вестник НГТУ, 2009. №1. С.23-40.
19. Чубич В.М. Особенности вычисления информационной матрицы Фишера в задаче активной параметрической идентификации стохастических нелинейных непрерывно-дискретных систем // Научный вестник НГТУ, 2009. №1. С.41-54.
20. Чубич В.М., Прокофьева А.Э. Сравнительный анализ некоторых робастных фильтров для нестационарных линейных дискретных систем // Вестник Иркутского государственного технического университета, 2017. Т. 21. № 12. С. 123–137.
21. Чубич В.М., Прокофьева А.Э. Параметрическая идентификация стохастических линейных дискретных систем на основе робастной фильтрации // Вестник Иркутского государственного технического университета, 2018. Т. 22. № 2. С. 84-94.
22. Боровков А.А. Математическая статистика. Новосибирск: Наука, 1997. 772 с.
23. Ивченко Г.И., Медведев Ю.И. Введение в математическую статистику. М.: Изд-во ЛКИ, 2010. 600 с.
24. Мудров В.И., Кушко В.Л. Методы обработки измерений. Квази-правдоподобные оценки. М.: Радио и связь, 1983. 304 с.
25. Kulikova M.V. Square-root algorithms for maximum correntropy estimation of linear discrete-time systems in presence of non-Gaussian noise // Systems & Control Letters, 2017. Vol. 108. P. 8–15.
26. Antoniou A., Lu W.-S. Practical optimization: algorithms and engineering applications. New York: Springer, 2007. 669 p.
27. Измаилов А.Ф., Солодов М.В. Численные методы оптимизации. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. 320 с.
28. Федоров В.В. Теория оптимального эксперимента. М.: Наука, 1971. 312 с.

29. Ермаков С.М., Жиглявский А.А. Математическая теория оптимального эксперимента. М.: Наука, 1987. 320 с.

30. Pronzato L., Pazman A. Design of experiments in nonlinear models. Asymptotic normality, optimality criteria and small-sample properties. New York: Springer, 2013. 399p.

31. Квакернаак Х., Сиван Р. Линейные оптимальные системы управления / пер. с англ. М.: Мир, 1977. 650 с.

Чубич Владимир Михайлович, д-р техн. наук, доц., заведующий кафедрой, chubich@ami.nstu.ru, Россия, Новосибирск, Новосибирский государственный технический университет,

Прокофьева Алина Эдуардовна, магистрант, pae.1994@yandex.ru, Россия, Новосибирск, Новосибирский государственный технический университет

ROBUST PROCEDURE OF ACTIVE PARAMETER IDENTIFICATION OF STOCHASTIC LINEAR DISCRETE SYSTEMS

V.M. Chubich, A.E. Prokofeva

On the basis of Izanloo – Fakoorian – Yazdi – Simon filter we proposed a robust procedure for the active parametric identification of stochastic linear discrete systems, including robust estimation of parameters and input signal design. We have developed the relevant software. The effectiveness of the procedure is demonstrated by the example of a DC motor control system for the grouped location of outliers.

Key words: active parametric identification, outliers, quasi-likelihood criterion, Fisher information matrix, design of experiments, robust estimation, Izanloo – Fakoorian – Yazdi – Simon filter, stochastic linear discrete system.

Chubich Vladimir Mikhailovich, doctor of technical science, docent, department head, chubich@ami.nstu.ru, Russia, Novosibirsk, Novosibirsk State Technical University,

Prokofeva Alina Eduardovna, master's, pae.1994@yandex.ru, Russia, Novosibirsk, Novosibirsk State Technical University

МНОГОПОТОЧНОСТЬ В ПЛАНЕТАРНЫХ ПЕРЕДАЧАХ 2К-Н, 3К и 3К-2Г-Н

В.А. Крюков, А.В. Плясов

В данной статье рассматриваются основные аспекты обоснования параллельной передачи потоков энергии при преобразовании движения в силовых трансмиссиях транспортных и технологических машин с лимитированными габаритами.

Ключевые слова: многопоточность, планетарная передача, сателлит, ремень, коэффициент распределения силы вдоль зуба и между зубьями, водило и ступень.

Понятие многопоточность уходит своими корнями глубоко в прошлое. И в истории не перечесть примеров многопоточности, особенно это касается и механических передач. Если взять фрикционные передачи с гибкой связью это ремённые с несколькими клиновыми или поликлиновыми ремнями, то это уменьшает диаметральные размеры шкива и скорость движения ремней, которые с веками возрастали для увеличения передаваемой мощности и производительности технологических и транспортных машин соответственно [1]. Через каждый ремень проходил поток механической энергии. Равномерность распределения нагрузки между ремнями гарантировалось за счёт постоянства ряда параметров: длины ремня, коэффициента трения и др., что не всегда можно было обеспечить не по причине ограничений технологии изготовления деталей передачи, а из-за деформации деталей (валов, подшипников и шкивов) при нагружении в процессе работы. В связи с этим некоторые ремни со временем могли проскальзывать и совершать колебания не только на ведомой, но и на ведущей ветви. Т.к. менялась роль каждого ремня для входного шкива, либо ведомое звено входным шкивом, либо ведущее звено. Равномерность распределения нагрузки в этих передачах лучше в отличии от многих других передач за счёт упругих свойств материала ремня, которые обеспечивают прилегание ремня при натяжении ремня. Но это уменьшает ресурс некоторых ремней из-за возрастающих напряжений растяжения. Это ограничивает количество используемых ремней до 6 (8) шт. В цепных передачах аналогично каждая цепь – это поток, и, как правило, в практике их количество не превышает 4 (6) цепей. На ряду с поликлиновыми ремнями применяются также и цепи.

В механических передачах зацеплением: цилиндрических, конических, винтовых, червячных, гипоидных, спироидные и др. под многопоточностью понимают многопарное зацепление колёс или винтовых поверхностей звеньев передачи. Каждая контактная пара находится на расстоянии равном шагу зацепления. Податливость зубьев, а соответственно равномерность распределения потоков энергии зависит от жесткости зубьев и обода колеса. При этом каждая контактная пара сопряженных колёс

находиться в один момент времени при разных условиях нагружения [2, 3]. Например, первая пара в начале зацепления, вторая в середине зацепления (полнос зацепления), а третья, если она присутствует (имеется) в конце зацепления. Количество потоков – контактных пар в зацеплении будет зависеть от следующих параметров: высоты зуба, шага зацепления, углов профиля и зацепления в прямозубой передаче. В косозубой передаче наряду с перечисленными выше параметрами на количество потоков (многопоточность) влияет также угол наклона зубьев к оси вращения. В итоге вместо двух пар зубьев в контакте у колёс мы можем получить до 4 пар зубьев. Угол наклона рабочей винтовой поверхности звеньев в пространственных передачах, как правило называют углом подъема винтовой поверхности в винтовой, червячной, спироидной передачах, т.к. оси валов в отличии от цилиндрической расположены не параллельно, а под углом (в основном 90 градусов). При построении твердотельной модели, как червяка, так и колеса фигурирует угол подъема спирали. В червячных и спироидных передачах, используя ведущие звенья: глобоидный червяк и винтовую шестерню сложного профиля можно увеличить количество контактных пар (многопоточность) до 5 и 10 соответственно, но сложность технологии получения шлифованного профиля зубьев сдерживает применение. Несомненно, вывод, что с ростом числа зубьев обоих колёс зубчатой передачи будет увеличиваться многопоточность. Но существует ограничение по числу в связи с «вырождением» эвольвенты в прямой отрезок. Это не гарантирует высокий к.п.д. при культуре производства в общем машиностроении (до 120 зубьев при 7-8 квалитете или до 200 при 5 квалитете). Также с уменьшением разности чисел зубьев колёс, особенно во внутреннем зацеплении, растёт многопарность (многопоточность), но она ограничена условиями геометрического синтеза, особенно интерференцией [4, 5, 7 и 13].

Наращивание количества потоков необходимо, конечно не только для уменьшения габаритов и массы передач, но и для увеличения работоспособности, надежности, плавности и бесшумности передачи, работающей особенно при ударных или переменных нагрузках. Уменьшение радиальных габаритов колёс, как и шкивов ременной передачи можно осуществлять, увеличивая ширину зубчатых венцов (длину зубьев). Предельное значение ширины колеса будет зависеть от межосевого расстояния, расположения опор вала по отношению к ведомому колесу, отклонений и допусков на размеры деталей передачи. Для дальнейшего наращивания осевых габаритов деталей передачи следует использовать очень широкое колесо, необходимо разделить его на несколько частей, сопряженных между собой через общий обод (рис. 1а), вал (соединение вал-ступица) (рис. 1б) или зубчатый кардан. При этом вал или обод с окнами работают как торсион [3]. Такое разделение широкого колеса благоприятно сказывается для двойной косозубой передачи (разделенной шевронной) для исключения действия осевой силы в зацеплении на подшипники в опоре вала.

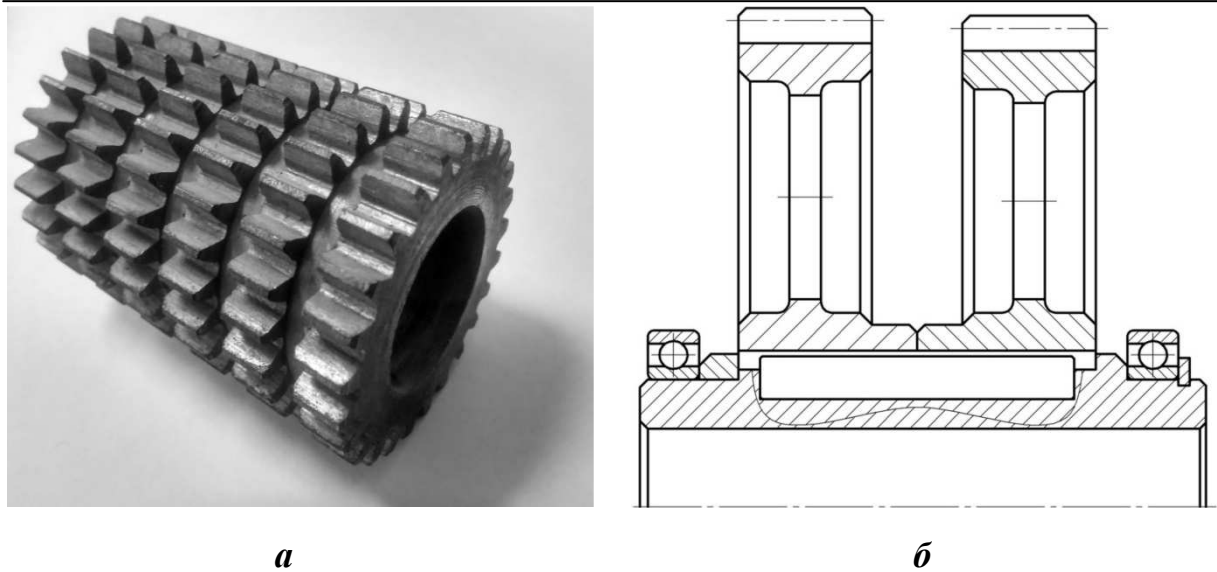


Рис. 1. Схема: а – многовенцовое колесо с единым ободом; б – вал и зубчатые колеса через соединение вал-ступица

Перспективными механическими передачами являются многопочтовые передачи, которые обладают рядом свойств [9, 10, 13]:

- входной и выходной валы сосны;
- высокий коэффициент заполнения пространства в корпусе;
- свёрнутая схема передачи;
- передача с выпукло-вогнутым контактом зубьев;
- валы и звенья передачи имеют заданную податливость;
- большинство опор валов разгружены от сил в зацеплении колёс.

Вышеперечисленными свойствами обладают планетарные передачи по большинству кинематических схем (рис. 2а и 2б) [4, 6, 8]. Отличия в двух схемах планетарных передач очевидны, и выражаются в расположении сателлитов g_{11} , g_{12} и g_{123} между малым a и a_{123} и большим b и b_{123} колесами, либо на одной оси, либо на параллельных осях в несколько рядов. В итоге количество потоков определяется произведением числа рядов на число сателлитов в нём и на число пар контакта зубьев одновременно. Теоретически 50 – 100 потоков суммируются на водиле h , что, несомненно, при современных требованиях к технологии изготовления, делает их перспективными высоконагруженными многозвенными устройствами.

Хотя, в практике есть случаи, когда от зубчатых передач с подвижной осью вращения (планетарных передач) отказываются в ответственных приводах с большой мощностью. Например, главный редуктор для вращения несущего винта Ми-26 – самого большого вертолёта в мире [4] с правым или левым двигателями с валом отбора мощности на рулевой винт. Редуктор по соосной схеме и имеет 16 колёс в зацеплении двух рядовых зубчатых механизмов с центральными колесами (рис. 3а) вместо планетарного и традиционного редуктора Р-7 вертолетов (рис. 3б).

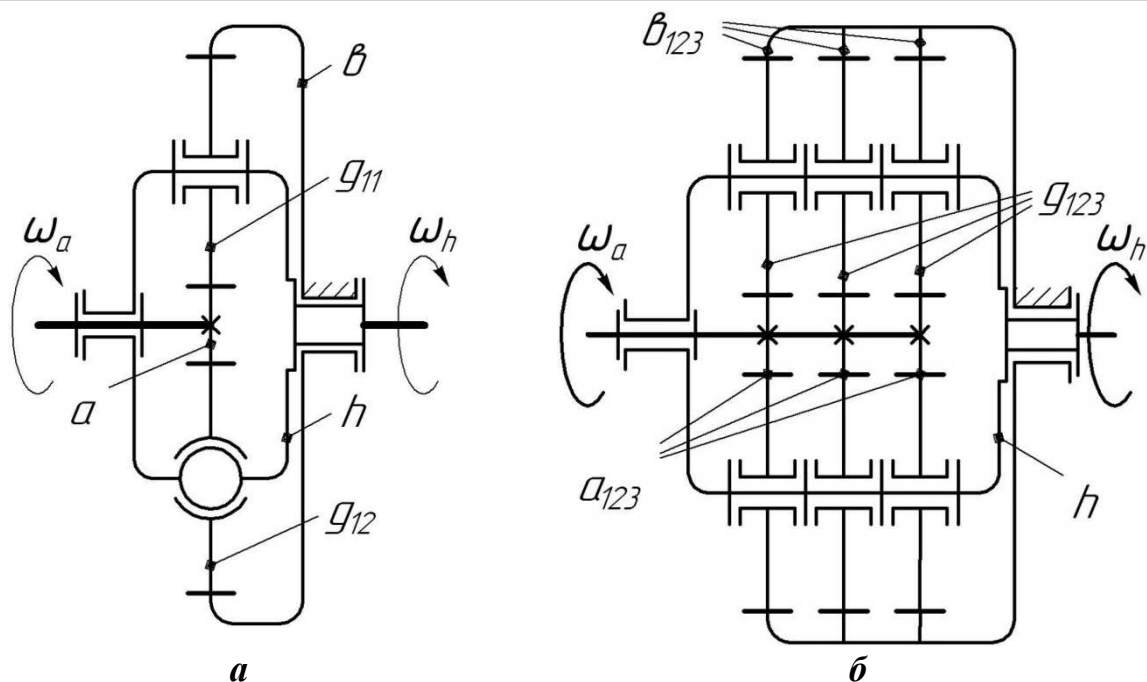


Рис. 2. Схема планетарных передач: а – схема с одновенцовым сателлитом во внешнем и внутреннем зацеплениях; б – схема многорядной планетарной передачи 2k-h (Патент РФ № 2115610, 2149813, 2175943)

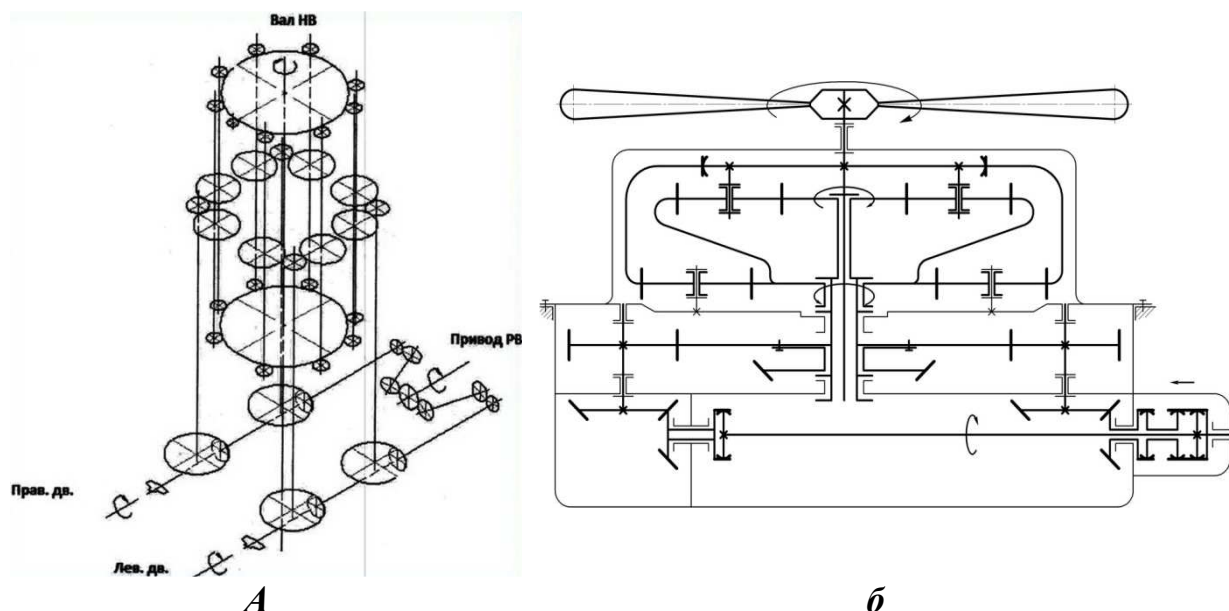


Рис. 3. Схема редуктора: а – схема главного редуктора вертолета Ми-26; б – схема главного редуктора Р-7 вертолетов Ми-6, Ми-8, Ми-14

При выявлении важности многопоточности в современных передачах для сопоставления возьмём некоторые планетарные передачи рис. 4 – 7 [3 - 10]. Во всех представленных планетарных передачах применение от

трёх и более сателлитов g и f , обусловлено разгрузкой опор валов от радиальных и тангенциальных сил в зацеплении, т.к. их сумма с учётом равномерного распределения сателлитов по кругу равна нулю. В передаче $2k-h$ с внутренними зацеплениями колёс b_1 и b_2 , $3k$ и $3k-2g-h$ выходным звеном является колесо b_2 , а входными являются колеса a , a_1 и a_2 .

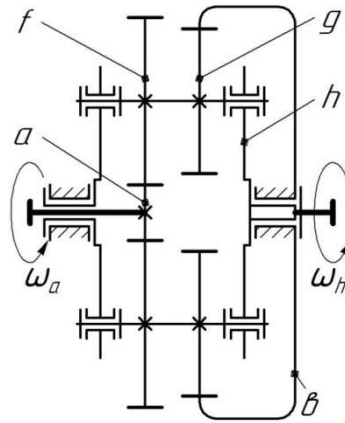


Рис. 4. Схема передачи $2k-h$ с двухвенцовым сателлитом

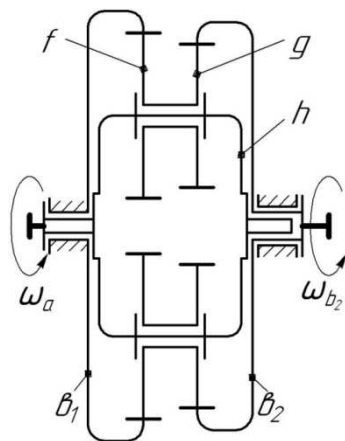


Рис. 5. Схема передачи $2k-h$ с двумя внутренними зацеплениями

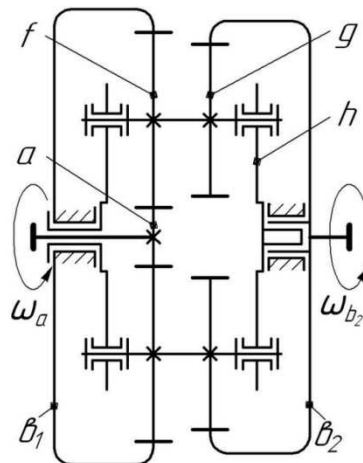


Рис. 6. Схема передачи $3k$

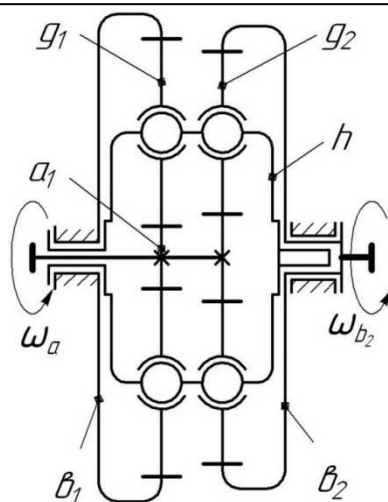


Рис. 7. Схема передачи 3к-2g-h. Патент РФ № 2402707, 2457385

Для увеличения числа рядов сателлитов (см. рис. 2б) или двух-, трёхвенцовых колёс и сателлитов требуется повысить подвижность зубчатых венцов для получения многосателлитных рациональных планетарных механизмов (без избыточных связей) за счёт использования зубчатых карданов (см. рис. 3б) или сферических подшипников (см. рис. 7) [3, 4, 12, 13].

С ростом количества используемых сателлитов в одном ряду уменьшается пространство между ними, что ограничивает их количество и требует серьезного подхода при проектировании конструкции водила и возможного уменьшения передаточного числа. Поэтому использование 5 и более сателлитов в одном ряду обусловлено в многоступенчатых приводах, например в турбине самолёта, где центральный вал имеет большое отверстие. Или в приводах, где вал имеет отверстие для пропуска через него жидкости, электрических проводов системы управления, шпинделя запорного органа клиновой задвижки трубопроводной магистрали [8 – 10, 14]. Эти факторы, перечисляемые заказчиком в техническом задании на проектирование обосновывают применение таких планетарных передач с малым передаточным числом от 3 и ниже в одной ступени.

Но встаёт снова вопрос, а сколько, например, взять 5 или 7, 6 или 8, 9 или 11. Т.к. условие соседства не главный фактор при выборе максимально числа сателлитов. Стоит заметить, что при прочностном расчёте планетарной передачи с передаточным числом от 3 и выше слабым звеном среди трёх зубчатых звеньев по контактной и изгибной выносливости являлось малое (солнечное) центральное колесо (см. рис. 4). У него маленький начальный диаметр, частое зацепление с сателлитами, высокий коэффициент формы зуба и выпукло-выпуклый контакт по зубьям с сателлитами. В схеме (см. рис. 7) наоборот представляется слабым сателлит по многим вышеперечисленным факторам, кроме контакта он у сателлита с большим центральным колесом выпукло-вогнутый [12, 15]. Так, поэтому увеличивается количество сателлитов не только поскольку для увеличения

многопоточности передачи и снижения габаритов, а для уравнивания ресурсов всех колёс в передаче. Можно возразить в этом случае применением колёс из разных материалов и с разной термообработкой. Но этот путь, как и в жизни не единственный и имеет технологические ограничения.

Слабым звеном в планетарной передаче представляются не только малые центральные колеса или сателлиты, а и подшипники качения, которые либо встраиваются в щеки водила (см. рис. 4, 6) или ступицу сателлита (см. рис. 5 и 7). При использовании относительно малого числа сателлитов 3...4, нагрузка, приходящаяся на один подшипник, окажется столько высокой, что ресурс будет его ниже чем у передач в несколько раз. Это требует суммарную нагрузку на оси сателлитов распределять между большим количеством сателлитов [3, 14]. Тут возникает вопрос, что понятие многопоточность относиться не только к зацеплениям, но и к осям сателлитов.

Не следует забывать, что как на тела качения в подшипниках, так и на сателлиты в планетарных передачах действуют силы инерции, которые ограничивают частоту вращения тел качения и сателлитов даже при отсутствии нагрузки на выходном валу привода. Вызывая в случае с сателлитами уменьшение зазора между зубьями во внутреннем зацеплении с большим центральным колесом. Для увеличения (повышения) ресурса подшипников в опоре сателлита следует уменьшать размеры сателлитов до тех пор, пока запас прочности зубьев сателлитов не сравняется с запасом прочности зубьев малого центрального колеса с учётом его частоты вращения, многопарного контакта с сателлитами за один оборот и др. факторов. В авиастроении борются за ресурс подшипника путём его размещения в каждой щеке водила. Габаритный размер подшипника в этом случае ограничен только диаметром вершин зубьев колеса или межосевым расстоянием в зацеплении колёс [3, 4, 10].

Поэтому следует сделать вывод, который является промежуточным, т.е. предварительным на стадии эскизного проектирования. На эффективное число сателлитов и количество зацеплений их с центральными колесами влияет множество технологических и конструкторских факторов, которые неразрывно взаимосвязаны в замкнутую цепь, в том числе из-за использования нормальных размеров, стандартных деталей и режущего инструмента [5, 7 и 13]. Поэтому для ответа на вопрос необходимо провести структурный, кинематический, кинематический, силовой, динамический анализ [10-15] после проектирования двух...пяти вариантов планетарной передачи с разным количеством сателлитов с сохранением габаритных размеров основных деталей. Сделать сравнение параметров в зависимости от технических требований задания для окончательного выбора.

Список литературы

1. Иосилевич Г.Б. Детали машин: учебник для студентов машиностроител. спец. вузов. М.: Машиностроение, 1988. 368 с.

2. Планетарные передачи: справочник / В.Н. Кудрявцев и др. М.: Машиностроение, 1977. 536 с.

3. Силовые зубчатые трансмиссии угольных комбайнов. Теория и проектирование / Сидоров П.Г., Козлов С.В., Крюков В.А., Полосатов Л.П. М.: Машиностроение, 1995. 296 с.

4. Сидоров П.Г. Многопоточные зубчатые трансмиссии. Теория и методология проектирования / П.Г. Сидоров, А.А. Пашин, А.В. Плясов // под общ. ред. П.Г. Сидорова. М.: Машиностроение, 2011. 340 с.

5. Сидоров П.Г., Пашин А.А., Плясов А.В и др. Алгоритм анализа и синтеза и формирование внутренних эвольвентных зубчатых зацеплений с гарантированными характеристиками // Известия ТулГУ. Машиноведение, система приводов и деталей машин. Изд-во ТулГУ, 2004, Вып. 1. С. 51-60.

6. Колесников К.С., Сидоров П.Г. и др. Асинхронные электроприводы нового технического уровня и приоритетные направления их развития // Известия ТулГУ. Машиноведение, система приводов и деталей машин. Тула: Изд-во ТулГУ, 2004. Вып.1. С. 3-8.

7. Сидоров П.Г., Плясов А.В. и др. Обоснование параметров внутренних зацеплений плюсовых планетарных приводов запорной арматуры трубопроводного транспорта // Известия ТулГУ. Машиноведение, система приводов и деталей машин. Тула: Изд-во ТулГУ, 2004. Вып. 1. С. 41-51.

8. Электропривод трубопроводной арматуры / Р.В. Алалуев, В.И. Гольфарб, М.В. Грязев, А.В. Дмитриев, Ю.В. Иванов, Р.А. Киржнер, В.Д. Кухарь, А.А. Маликов, Д.М. Малютин, В.Я. Распопов, В.И. Родионов, С.В. Рогов, С.Л. Самсонович, П.Г. Сидоров, И.Т. Тер-Матеосянц // под ред. В.Я. Распопова. М.: Машиностроение, 2012. 386 с.

9. Sidorov P.G. Forming of modern multi-turn electric drive for pipeline gate valve of wedge and slide types / A.A. Pashin, P.G. Sidorov, V.Y. Raspopov, A.V. Plyasov, Y.I. Sabo // GER. 2012. № 6. С. 82-85.

10. Сидоров П.Г. Новое построение габаритного ряда многооборотных многопоточных электроприводов запорной арматуры с выдвижным шпинделем // П.Г. Сидоров, А.В. Дмитриев, А.А. Пашин, А.В. Плясов / Арматуростроение. 2012. № 3. С. 53-61.

11. Крюков В.А., Савельева Л.В. Снижение динамических нагрузок в многопоточных передачах / Вибрационные технологии, мехатроника и управляемые машины: сб. науч. ст.: в 2 ч. – Ч. 1 // редкол. С.Ф. Яцун (отв. ред.) [и др.] Курск: Юго-Зап. гос. ун-т, 2016. С. 205-215.

12. Крюков В.А., Савельева Л.В. Выбор закона изменения жесткости зацепления при моделировании динамики зубчатых передач / Известия ТулГУ. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2015. Вып. 11-1. С. 65-70.

13. Сидоров П.Г., Крюков В.А., Плясов А.В. Новое поколение многопоточных рычажно-зубчатых передач в высокоэнерговооруженных приводах машин воздушного, водного, наземного и подземного базирования / Теория и практика зубчатых передач // Сборник трудов международного симпозиума. Научный редактор В.И. Гольдфарб. 2014. Ижевск: Изд-во ИжГТУ им. М.Т. Калашникова, 2014. С. 468-477.

14. Крюков В.А., Прейс В.В. Построение привода исполнительных органов роторной технологической машины с учетом уравнивания мощности / Машиностроение и техносфера XXI века // Сборник МНТК. Донецк: Донецкий НТУ, 2004. С. 121-124.

15. Крюков В.А., Корнюхин И.Ф. Приводы автоматических роторных и роторно-конвейерных линий // СТИИ, 2000. № 11. С. 6-10.

Плясов Алексей Валентинович, канд. техн. наук, plyasov-a@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Крюков Владимир Алексеевич, д-р техн. наук, проф., va.krukov@gmail.com, Россия, Тула, Тульский государственный университет

MULTITHREADING IN PLANETARY GEAR 2K - H, 3K and 3K-2G-H

V.A. Krukov, A.V. Plyasov

This article discusses the main aspects of the justification of the parallel transmission of energy flows in the transformation of motion in power transmissions of transport and technological machines with limited dimensions.

Key words: multithreading, planetary gear, pinion, belt, ratio of the force distribution along the tooth and between the teeth, and drove stage.

Plyasov Alexey Valentinovich, candidate of technical sciences, plyasov-a@yandex.ru, Russia, Tula, Tula state University,

Krukov Vladimir Alekseevich, doctor of technical sciences, professor, va.krukov@gmail.com, Russia, Tula, Tula state University

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОДОРОДНЫХ ЛОВУШЕК ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПРОЦЕССА ВОДОРОДНОГО РАСТРЕСКИВАНИЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ВЫСОКОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ

Н.Н. Сергеев, А.Н. Сергеев, С.Н. Кутепов, А.Е. Гвоздев, Н.Е. Стариков,
О.В. Пантюхин

В статье рассмотрено взаимодействие водорода с дефектами кристаллического строения в металлах и сплавах. Рассмотрены современные методы повышения стойкости металлов и сплавов к водородному растрескиванию, основанные на создании в металле равномерно распределенных необратимых водородных ловушек, позволяющих снизить восприимчивость металла к водородному растрескиванию.

Ключевые слова: водородные ловушки, границы зерен, включения, атомы внедрения, энергия связи, сварные соединения.

1. Введение. Водородное растрескивание (ВР), также известное как холодное растрескивание или замедленное разрушение является одной из наиболее распространенных проблем, возникающих при сварке ферритных сталей. Известно, что ВР заметно снижает механические свойства, такие как пластичность, прочность на разрыв и вязкость разрушения при сварке [1, 2]. Эта проблема имеет два аспекта. Во-первых, вероятность ВР в сварном соединении максимальна при температурах в диапазоне от -50 до 150 °С, что включает температуру окружающей среды [3, 4]. Во-вторых, ВР сварного шва часто происходит в течение нескольких часов или через несколько дней после сварки, и, хотя оно достаточно обширно, трещины очень трудно обнаружить без применения специализированных методов диагностирования. Поэтому ВР создает опасность причинения катастрофического разрушения сварного соединения во время его эксплуатации.

Обычные методы предотвращения ВР в стальных сварных соединениях включают в себя предварительную или последующую термообработку, использование нецеллюлозных электродов с надлежащим отжигом и подготовку свариваемой кромки. Эти методы применяются для обеспечения того, чтобы концентрация водорода была ниже критической концентрации для протекания процесса ВР, особенно при температурах ниже 100 °С. Однако, предварительная термическая обработка и неправильная послесварочная термообработка усиливают развитие локализации водорода в высокопрочных стальных сварных соединениях. В связи с этим новые решения для ВР при сварке высокопрочных сталей должны включать замену существующих методов термообработки и обеспечивать снижение количества водорода в атмосфере дуги.

Современные подходы, с использованием метода конечных элементов и метода конечных разностей, позволяют предсказать правильную термическую обработку, которая может предотвратить нежелательное рас-

пределение водорода в сварных соединениях. Однако для их применения необходимо использовать комплексные программы испытаний и жестко контролировать параметры температуры и сварки. Такой контроль часто оказывается непрактичным и сложным. Поэтому необходимо исследовать новые подходы к управлению водородом при сварке стали, основанные на более фундаментальном металлургическом понимании и прогнозировании.

Данные вопросы являются также весьма актуальными и ценными при разработке процессов изготовления изделий из порошковых композиций методом селективного лазерного спекания с использованием аддитивных технологий и необходимы для установления закономерностей изменения механических свойств таких изделий в тепловых, механических и других физико-химических полях и средах.

2. Результаты и их обсуждение. Поскольку в стали водород распределен неоднородно, он будет располагаться не только в междоузлиях решетки, но также будет сегрегирован на атомных и микроструктурных несовершенствах, таких как вакансии, атомы примесей, дислокации, границы зерен, микропоры и частицы второй фазы [5-7]. В этих локализованных областях среднее время пребывания атома водорода значительно больше, чем в обычном междоузлии решетки. Эти дефекты и неоднородности принято называть водородными ловушками [8, 9].

Цель введения в материал водородных ловушек заключается в том, чтобы заставить перераспределить поглощенный водород, разделить его между узлами решетки и местами скопления ловушек, так чтобы критическая концентрация водорода (c_K), необходимая для зарождения трещин, не могла быть легко достигнута.

Поскольку ВР зависит от диффузии водорода, присутствие водородных ловушек влияет на кинетику процесса растрескивания и может сыграть полезную роль в препятствии механизму охрупчивания. Основным преимуществом введения в материал водородных ловушек является то, что концентрация диффузионно-подвижного водорода (c_L) может быть уменьшена без необходимости проведения обширной термообработки. Сильные и тонко распределенные водородные ловушки будут захватывать атомы водорода во время цикла охлаждения сварного шва, что дает гораздо меньше шансов для миграции водорода и его накопления в области концентраций напряжений. При наличии сильных ловушек номинальное содержание остаточного водорода может быть выше, чем содержание без ловушек. При этом концентрация водорода будет намного более равномерно распределена и все еще ниже критической концентрации диффузионного водорода для ВР.

Заметным эффектом взаимодействия водород-ловушка является уменьшение коэффициента кажущейся диффузии водорода [10] в стали при температурах ниже 200 °С. Способность ловушки удерживать атом водорода связана с энергией связи (E_B) водород-ловушка. Захваченный

атом водорода должен получить энергию, существенно большую, чем энергия миграции решетки, чтобы вырваться из ловушки и внести вклад в измеренную диффузию. Ниже предела насыщения ловушки могут оказывать некоторое сопротивление водородному охрупчиванию (ВО) за счет уменьшения количества диффундирующего водорода. Однако при перенасыщении ловушки могут оказаться вредными из-за локализованного охрупчивания. Кроме того, перенасыщенные ловушки могут выделять атомы водорода во время деформации, что, в свою очередь, повышает концентрацию диффузионно-подвижного водорода. В процессе сварки атомы водорода абсорбируются, а металл шва становится перенасыщенным водородом в течение цикла охлаждения. Если присутствует достаточно большое количество ловушек, избыток водорода будет заполнять эти участки до уровня, значительно меньшего предела их насыщения. В этой ситуации места скопления ловушек выгодны и должны обеспечивать устойчивость к ВО, при условии, что их размер и распределение в других отношениях не способствуют разрушению.

Вклад в энергию связи ловушек включает три конкретных типа взаимодействий: электронное, напряженное и межфазное взаимодействие. Ловушки, обладающие энергией связи выше, чем 60 кДж/моль определяются как необратимые ловушки, в то время как ловушки с энергией ниже, чем 60 кДж/моль определяются как обратимые ловушки [2].

Как правило, водородная ловушка имеет два или более типов взаимодействий. Ряд исследователей [9, 11] считают, что большая часть энергии ловушек возникает из-за сопряженного поведения физических и химических взаимодействий, поскольку каждое физическое искажение решетки всегда сопровождается электронным возмущением.

Прессшур [11], в своей ловушковой теории ВО, обсудил влияние использования как обратимых, так и необратимых ловушек на устойчивость к ВО. Поскольку энергия взаимодействия между решеткой и ловушкой ΔE_{LT} всегда будет положительной, доля водорода в обратимых (ϕ^R) или необратимых ловушках (ϕ^I) всегда будет больше, чем в узле решетки (ϕ^L), в результате чего концентрации диффундирующего водорода (c_L) уменьшаются. При условии, что ловушки мелкие и однородно распределены по всей решетке, эти ловушки полезны для устойчивости к ВО. Чтобы достичь такой стойкости, требуется однородное распределение ловушек, чтобы уменьшить вероятность того, что любая конкретная ловушка достигнет насыщения и/или критической концентрации, которая может инициировать растрескивание.

Микроструктурная зависимость ВР в высокопрочной стали включает характер металлической фазы; форму, размер и распределение дефектов; размер зерна; степень включения – когерентной металлической матрицы; а также степень сегрегации примесей. Эти аспекты подробно рассмотрены Бернштейном и Прессшуром [9], Юрикой и Сузуки [12].

Использование ловушек с высокой энергией связи явно недостаточно, чтобы можно было спроектировать микроструктуру сварного шва, которая обладает высокой устойчивостью к ВР. Также необходима оценка критической концентрации водорода (c_K) соответствующего участка ловушки, которая зависит от свойств матрицы и типа ловушки.

Для достижения этой задачи необходимо оценить влияние затвердевания и фазовых превращений на структуру, размер и распределение ловушек, которые обычно существуют как включения.

Включения имеют потенциал для снижения ВР в высокопрочной стали двумя способами: (1) путем содействия образованию более жесткой микроструктуры и (2) путем захвата водорода в течение цикла охлаждения после сварочного процесса. Олсон и др. [13] показали, что сильно необратимые ловушки могут препятствовать ВР, способствуя ускоренному уменьшению диффундирующего водорода в течение цикла охлаждения после сварки. Таким образом, количество диффундирующего водорода при температурах ВР ниже 100 °С может быть гарантировано ниже допустимого предела. Эффективность включений при предотвращении ВР зависит не только от их энергий связи, но и от многих других факторов, таких как начальная температура мартенситного превращения и напряженное состояние на границе раздела включение-матрица.

Считается, что форма включения может играть существенную роль в ВР, поскольку она часто определяет давление водорода, которое может быть достигнуто на границе раздела [14]. Форма включения также изменяет локальное напряженное состояние [15] и транспортировку водорода к потенциальным местам зарождения трещин, включая саму ловушку [16]. Прессшур в ловушковой теории ВО [8] показал, что удлиненные включения MnS способствовали зарождению трещины при более низкой критической концентрации водорода (c_K), чем округлые, и что эффект был более выражен в структуре бейнит-мартенсит, чем в структурах феррит-перлит. Следовательно, желательны мелкие сферические частицы второй фазы, особенно те частицы, которые имеют когерентные интерфейсы. Большие включения вредны из-за их большей вероятности пересечения границ зерен и повышения чувствительности к растрескиванию.

В то время как тонкие включения могут быть получены путем обеспечения большего числа центров зародышеобразования в жидком расплаве [17], предпочтительные небольшие сферические включения могут быть достигнуты путем уменьшения содержания примесей металлоидов [18], включая серу. Тем не менее, существует предел для уменьшения содержания серы из-за повышенного риска формирования структуры мартенсита. Применение редкоземельных металлов или обработка кальцием считаются эффективными решениями для проблемы включения сульфидов в сталь при ВР. Эти обработки сфероидизируют включения сульфидов, сохраняя размер менее одного микрометра и увеличивая общее количество

включений. Поэтому обработка редкоземельными элементами позволяет свести к минимуму содержание серы, но все же получить достаточные участки зародышеобразования внутризеренного феррита.

В литературе имеются противоречивые данные о влиянии размера зерна на водородную хрупкость. Сообщалось, что мелкие размеры зерен, а также размеры мелкого карбида оказывают благотворное влияние [19]. Поскольку границы зерен являются зонами захвата водорода, утонение зерна должно иметь благоприятный эффект, потому что водород более равномерно распределен [18]. Более того, сегрегирующие элементы, которые снижают когезионную прочность границ зерен, также будут более равномерно распределены. Такие благоприятные эффекты утонения зерна наблюдались как для ферритных, так и для аустенитных сталей [20-22]. Исследования Проктора и Пакстона [20] на стали AISI 4340, обработанной методами термоциклирования, показали, что измельчение зерна привело к увеличению времени разрушения во время коррозионного растрескивания под напряжением.

Противоположные выводы были сделаны Картером [23], использовавшим сталь AISI 4340 с добавлением кремния, и Лессаром и Герберичем [24], использующим закаленную сталь AISI 4340, которая получила более длительное время до разрушения, поскольку размер зерна стал более грубым. Герберич предположил, что кинетика роста трещин в основном зависит от контроля процесса диффузии, который может быть связан или с областью границы зерен или количеством остаточного аустенита на границе. Райдер и др. [25] также сообщали о сходных результатах для стали AISI 4340 и предположили, что крупный размер зерна аустенита обеспечивает интерфейсы, которые способствуют разветвлению трещин, что улучшает ударную вязкость стали.

Во многих случаях невозможно предотвратить образование дефектов с низкой критической концентрацией водорода (c_K) для значений ВР. Поэтому необходимо снизить количество водорода, захватываемого такими дефектами. Когда поглощение водорода сталью не может быть устранено, как и в случае сварочных процессов, введение водородных ловушек в сталь рассматривается как возможное решение. Чтобы быть эффективными, сами водородные ловушки должны иметь высокое значение (c_K). К таким ловушкам относят элементы замещения, такие как скандий, лантан, кальций, тантал, неодим, гафний и иттрий или карбонитриды с такими элементами, как ванадий, цирконий, титан, ниобий и бор [9, 18].

Добавление блокирующих элементов к стали также считается возможным решением, поскольку они эффективно уменьшают растворимость водорода и его диффузию. К ним относят палладий, кобальт, алюминий, кремний, золото, платину, серебро и иногда медь. Никель как важный легирующий элемент в высокопрочной стали не может рассматриваться как блокирующий элемент, поскольку он проявляет слегка отрицательное зна-

чение коэффициента взаимодействия ϵ_H^{Ni} [26]. Другие блокирующие элементы, такие как сера, фосфор, мышьяк и сурьма, особенно в присутствии никеля и хрома, признаны вредными, поскольку они сегрегируют на внутренних границах [9].

Механизм влияния окисления растворенного металла на содержание диффундирующего водорода может быть описан на основе термодинамического равновесия металл-кислород, предполагая, что водяной пар является источником водорода и кислорода в металле сварного шва. В реакции водород-кислород, которая является последней реакцией окисления в металле сварного шва, концентрация диффундирующего водорода находится в равновесии с растворенным кислородом, и увеличивается до тех пор, пока все еще имеются атомы металлов для образования оксидов. С другой стороны, сами образующиеся оксиды являются перспективными необратимыми зонами водородной ловушки, которые захватывают часть водорода и эффективно уменьшают содержание диффундирующего водорода в металле шва. Оптимальное содержание кислорода требуется для достижения наименьшей концентрации диффузного водорода в металле шва [27].

Ли и Норт [28] рассмотрели влияние примесных элементов на поверхностную активность. Считается, что эти элементы изменяют баланс между растворимостью водорода и скоростью выделения на поверхности сварочной ванны. Сериу [29] показал, что добавки теллура, селена и серы в композициях покрытий для сварочных электродов заметно понижают содержание диффундирующего водорода в металле сварного шва из низколегированной стали. Ду и др. [30] предположили, что некоторые редкоземельные элементы, будучи поверхностно активными в расплавленной ванне, уменьшают поверхностное натяжение жидкого металла, что, в свою очередь, уменьшает абсорбцию водорода в расплавленной ванне. Их эксперименты с использованием добавок иттрия и теллура к металлу шва подтвердили уменьшение количества диффундирующего водорода.

3. Выводы:

1. Введение водородных ловушек в металл сварного шва имеет два потенциальных преимущества, которые помогут снизить восприимчивость сварных соединений к ВР. Во-первых, это возможность свести к минимуму содержание диффундирующего водорода быстрее, чем дегазация водорода. Во-вторых, способность этих ловушек помочь предотвратить локализованное скопление водорода в металле сварного шва во время термических циклов, без осуществления обширной термической обработки.

2. Выбор водородных ловушек для предотвращения ВР требует дополнительной информации, а не только анализа характеристик их захвата водородом. Поэтому необходимо комплексно рассматривать их влияние и концентрацию на механическую целостность сварного шва.

3. Наличие в металле сварного шва высокоэнергетических водородных ловушек приводит к снижению диффузионной подвижности водорода, который тем самым исключается из процесса охрупчивания сварных соединений высокопрочных сталей.

4. Дальнейшее развитие теории водородных ловушек является перспективным направлением для создания новых материалов и их использования в реальных условиях при комплексном воздействии термомеханических и коррозионных факторов, что позволит диагностировать изменение физико-механических свойств различных материалов при работе в агрессивных средах и применять результаты для создания ресурсосберегающих технологий обработки материалов и при создании изделий из порошковых композиций селективным лазерным спеканием [31-59].

Работа выполнена по Федеральной целевой программе по проекту «Разработка прототипа инженерного программного обеспечения (ИПО) на основе высокопроизводительных вычислений для оценки механических характеристик изделия, изготовленного с использованием аддитивных технологий (методом селективного лазерного спекания) с учетом стратегии изготовления изделия» (уникальный идентификатор проекта RFMEF157717X0271).

Список литературы

1. Колачев Б.А. Водородная хрупкость металлов. М.: Металлургия, 1985. 216 с.
2. Hirth J.P. Effects of hydrogen on the properties of iron and steel // Metall. Trans. A. 1980. V. 11A. P. 861-890.
3. Yurioka N., Suzuki H. Hydrogen-assisted cracking in C-Mn and low-alloy steel weldments // Inter. Mat. Rev. 1990. № 35(4). P. 217-249.
4. Шоршоров М.Х. Металловедение сварки стали и сплавов титана. М.: Изд-во Наука, 1965. 336 с.
5. Dayal R.K. Parvathavarthini N. Hydrogen embrittlement in power plant steels // Sadhana. 2003. V. 28. P. 431-451.
6. Развитие повреждаемости и обезуглероживание высокопрочных низколегированных сталей в условиях водородного охрупчивания / Н.Н. Сергеев, А.Н. Чуканов, В.П. Баранов, А.А. Яковенко // Металловедение и термическая обработка металлов. 2015. № 2. С. 4-9.
7. Накопление и транспорт водорода в ферритно-мартенситной стали РУСФЕР-ЭК-181 / Е.А. Денисов, Т.Н. Компаниец, М.А. Мурзинова, А.А. Юхимчук (мл.) // ЖТФ. 2013. Т. 83. № 6. С. 38-44.
8. Pressouyre G.M., Bernstein I.M. An example of the effect of hydrogen trapping on hydrogen embrittlement // Metall. Trans. A. 1981. V. 12A. P. 835-844.

9. Bernstein I.M. Pressouyre G.M. The role of traps in the microstructural control of hydrogen embrittlement of steels. // Hydrogen degradation of ferrous alloys; Editors R.A. Oriani, J.P. Hirth and M. Smialowski. Noyes Publications. New Jersey. 1985. P. 641-685.
10. Johnson H.H. Hydrogen in iron // Metall. Trans. B. 1988. V. 19B. P. 691-707.
11. Pressouyre G.M. Trap theory of hydrogen embrittlement // Acta Metall. 1980. V. 28. P. 895-911.
12. Yurioka N., Suzuki H. Hydrogen assisted cracking in C-Mn and low alloy steel weldments // Inter. Mater. Rev. 1990. V. 35. № 4. P. 217-249.
13. Olson D.L., Maroef I., Lensing C., Smith D., Wildeman T., Eberhart M. // Hydrogen Management in Steel Weldments; ed. J.L. Davidson and D.L. Olson. Melbourne, Australia, DSTO and WTIA. 1996. 1-19.
14. Yu H.Y., Li J.C.M. Hydrogen embrittlement due to hydrogen-inclusion interactions // Journal Nucl. Met. 1976. V. 20. P. 872.
15. Iino M. The extension of hydrogen blister-crack array in linepipe steels // Metall. Trans. A. 1978. V. 9A. P. 1581-1590.
16. J.C.M. Li. Physical chemistry of some microstructural phenomena // Metall. Trans. A. 1978. 9A. P. 1353-1380.
17. Iino M., Nomura N., Takezawa H., Takeda T. Engineering solutions to the H₂S problem in linepipes // Current Solutions to Hydrogen Problems in Steels.; Proc. of Int. Conf. on Current Solutions to Hydrogen Problems in Steels, ASM Int., 1982. P.159-167.
18. Pressouyre G.M. // Current Solutions to Hydrogen Problems in Steels, (ed. C.G. Interrante and G.M. Pressouyre), Metals Park, Ohio, ASM, 1982. P. 18-34.
19. Thompson A.W., Bernstein I.M. The role of metallurgical variables in hydrogen-assisted environmental fracture // Adv. Corros. Sei. Technol. Plenum Press, New York, 1980. P. 53-175.
20. Proctor R.P.M., Paxton H.W. The effect of prior-austenite grain-size on the stress-corrosion cracking susceptibility of AISI 4340 steel. // Trans. ASM. 1969. V. 62. P. 989-999.
21. Rath B.B., Bernstein I.M. The relation between grain-boundary orientation and intergranular cracking // Metall. Trans. 1971. V. 2. P. 2845-2851.
22. Louthan M.R., Donovan J.A., Rawl D.E. Effect of high dislocation density on stress corrosion cracking and hydrogen embrittlement of type 304L stainless steel // Corrosion. 1973. V. 29. № 3. P. 108-111.
23. Carter C.S. The effect of silicon on the stress corrosion resistance of low alloy high strength steels // Corrosion. 1969. V. 25. № 10. P. 423-431.
24. Lessar J.F., Gerberich W.W. Grain Size Effects in Hydrogen-Assisted Cracking // Metall. Trans. A. 1976. V. 7A. P. 953-960.

25. Ryder D.A., Grundy T., Davies T.J. // Current Solutions to Hydrogen Problems in Steels, (ed. C.G. Interrante and G.M. Pressouyre). Metals Park, Ohio, ASM, 1982, P. 272-274.

26. Sigworth G.K., Elliot J.F. The thermodynamics of liquid dilute iron alloys // Met. Sci. 1974. V. 8. P. 298-310.

27. Liu S., Olson D.L., The effect of altitude on welding // Materials Park, OH, ASM, 1996. P. 347-352.

28. Li H., North T.H., Hydrogen absorption and hydrogen cracking in high strength weld metal // Key Engineering Materials. 1992. V. 69-70. P. 95-112.

29. Seriu N., Kanazawa S., Gondo H., Yamato K., Otsubo T. The prevention of weld cracking by addition of special elements // 61th AWS Annual Meeting. April 1980, paper 3D, published Abstracts, AWS, Miami, Florida.

30. Du. Z. et. Al // China Welding. 1996 V. 5 № 2. P. 125-131.

31. Влияние разнотекстурности аустенита на кинетику перлитного превращения в мало- и среднеуглеродистых низколегированных сталях / А.Е. Гвоздев, А.Г. Колмаков, Д.А. Провоторов, И.В. Минаев, Н.Н. Сергеев, И.В. Тихонова // Материаловедение. 2014. № 7. С. 23-26.

32. Особенности протекания процессов разупрочнения при горячей деформации алюминия, меди и их сплавов / А.Е. Гвоздев, А.Г. Колмаков, Д.Н. Боголюбова, Н.Н. Сергеев, И.В. Тихонова, Д.А. Провоторов // Материаловедение. 2014. № 6. С. 48-55.

33. Роль процесса зародышеобразования в развитии некоторых фазовых переходов второго рода / А.Е. Гвоздев, Н.Н. Сергеев, И.В. Минаев, И.В. Тихонова, А.Г. Колмаков // Материаловедение. 2015. № 1. С. 15-21.

34. Влияние деформационной повреждаемости на формирование механических свойств малоуглеродистых сталей / Г.М. Журавлев, А.Е. Гвоздев, Н.Н. Сергеев, Д.А. Провоторов // Производство проката. 2015. № 12. С. 9-13.

35. Формирование механических свойств углеродистых сталей в процессах вытяжки с утонением / А.Е. Гвоздев, Г.М. Журавлев, А.Г. Колмаков // Технология металлов. 2015. № 11. С. 17-29.

36. Теория пластичности дилатирующих сред: монография / Э.С. Макаров, А.Е. Гвоздев, Г.М. Журавлев; под. ред. проф. А.Е. Гвоздева. 2-е изд. перераб. и доп. Тула: Изд-во ТулГУ, 2015. 337 с.

37. Распределение температур и структура в зоне термического влияния для стальных листов после лазерной резки / А.Е. Гвоздев, Н.Н. Сергеев, И.В. Минаев, А.Г. Колмаков, И.В. Тихонова, А.Н. Сергеев, Д.А. Провоторов, Д.М. Хонелидзе, Д.В. Малий, И.В. Голышев // Материаловедение. 2016. № 9. С. 3-7.

38. Сопряженные поля в упругих, пластических, сыпучих средах и металлических труднодеформируемых системах: монография / Э.С. Макаров, В.Э. Ульченкова, А.Е. Гвоздев, Н.Н. Сергеев, А.Н. Сергеев; под ред. проф. А.Е. Гвоздева. Тула: Изд-во ТулГУ, 2016. 526 с.

39. Механизмы водородного растрескивания металлов и сплавов, связанные с усилением дислокационной активности / Н.Н. Сергеев, С.Н. Кутепов, А.Е. Гвоздев, Е.В. Агеев // Известия Юго-Западного государственного университета. 2017. Т. 21, № 2(71). С. 32-47.

40. Анализ теоретических представлений о механизмах водородного растрескивания металлов и сплавов / Н.Н. Сергеев, А.Н. Сергеев, С.Н. Кутепов, А.Е. Гвоздев, Е.В. Агеев // Известия Юго-Западного государственного университета. 2017. Т. 21, № 3(72). С. 6-33.

41. Перспективные стали для кожухов доменных агрегатов / Н.Н. Сергеев, А.Е. Гвоздев, А.Н. Сергеев, И.В. Тихонова, С.Н. Кутепов, О.В. Кузовлева, Е.В. Агеев // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2017. Т. 7, № 2(23). С. 6-15.

42. Temperature distribution and structure in the heat-affected zone for steel sheets after laser cutting / A.E. Gvozdev, N.N. Sergeyev, I.V. Minayev, I.V. Tikhonova, A.N. Sergeyev, D.M. Khonelidze, D.V. Maliy, I.V. Golyshev, A.G. Kolmakov, D.A. Provotorov // Inorganic Materials: Applied Research. 2017 Т. 8. № 1. С. 148-152.

43. Вариант определения максимального пластического упрочнения в инструментальных сталях / Г.М. Журавлев, А.Е. Гвоздев, А.Е. Чеглов, Н.Н. Сергеев, О.М. Губанов // Сталь. 2017. № 6. С. 26-39.

44. Бреки А.Д., Гвоздев А.Е. О влиянии масел с наночастицами твёрдых смазочных материалов на потери мощности в зубчатых передачах // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2017. № 4. С. 171-180.

45. Бреки А.Д., Гвоздев А.Е. О зависимости вязкости масел от наличия в них наночастиц твердых смазочных материалов и взвешенных частиц износа при использовании эмпирического уравнения Вальтера // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2017. № 3. С. 90-98.

46. Исследование и расчет температурного поля в баллонах шинно-пневматических муфт нефтебуровых и газобуровых установок / Б.Д. Кукаленко, Е.В. Заборский, А.Д. Бреки, А.Е. Гвоздев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2017. № 1. С. 207-217.

47. On friction of metallic materials with consideration for superplasticity phenomenon / A.D. Breki, A.E. Gvozdev, A.G. Kolmakov, N.E. Starikov, D.A. Provotorov, N.N. Sergeyev, D.M. Khonelidze // Inorganic Materials: Applied Research. 2017. Т. 8. № 1. С. 126-129.

48. Synthesis and dry sliding behavior of composite coating with (R-OOO)FT polyimide matrix and tungsten disulfide nanoparticle filler / A.D. Breki, A.L. Didenko, V.V. Kudryavtsev, E.S. Vasilyeva, O.V. Tolochko, A.G. Kolmakov, A.E. Gvozdev, D.A. Provotorov, N.E. Starikov, Yu.A. Fadin // Inorganic Materials: Applied Research. 2017. Т. 8. № 1. С. 32-36.

49. Composite coatings based on A-OOO polyimide and WS₂ nanoparticles with enhanced dry sliding characteristics / A.D. Breki, A.L. Didenko, V.V. Kudryavtsev, E.S. Vasilyeva, O.V. Tolochko, A.E. Gvozdev, N.N. Sergeyev, D.A. Provotorov, N.E. Starikov, Yu.A. Fadin, A.G. Kolmakov // *Inorganic Materials: Applied Research*. 2017. Т. 8. № 1. С. 56-59.

50. Противоизносные свойства пластичных смазочных композиционных материалов «ЛИТОЛ 24 - частицы гидросиликатов магния» / А.Д. Бреки, В.В. Медведева, Н.А. Крылов, А.Г. Колмаков, Ю.А. Фадин, А.Е. Гвоздев, Н.Н. Сергеев, С.Е. Александров, Д.А. Провоторов // *Материаловедение*. 2017. № 3. С. 38-42.

51. Maximum plastic strengthening in tool steels / G.M. Zhuravlev, A.E. Gvozdev, A.E. Cheglov, N.N. Sergeyev, O.M. Gubanov // *Steel in Translation*. 2017. Vol. 47. № 6. P 399-411.

52. Многоуровневый подход к проблеме замедленного разрушения высокопрочных конструкционных сталей под действием водорода / В.П. Баранов, А.Е. Гвоздев, А.Г. Колмаков, Н.Н. Сергеев, А.Н. Чуканов // *Материаловедение*. 2017. № 7. С. 11-22.

53. Атлас микроструктур неметаллических и металлических материалов: учебное пособие / Н.Н. Сергеев, А.Е. Гвоздев, О.В. Кузовлева, А.Н. Сергеев, Н.Е. Стариков, В.Ю. Кузовлев, А.Д. Бреки, А.А. Калинин, П.Н. Медведев, Ю.С. Дорохин, Д.В. Малий, В.И. Абрамова, К.Н. Старикова, И.Д. Зайцев, С.Н. Кутепов Тула: Изд-во ТулГУ, 2017. 96 с.: ISBN 978-5-7679-3811-7.

54. Новые конструкционные материалы: учебное пособие / Н.Е. Стариков, В.К. Зеленко, О.В. Кузовлева, А.Н. Сергеев, В.Ю. Кузовлев, А.А. Калинин, А.В. Маляров; под. общ. ред. проф. А.Е. Гвоздева. Тула: Изд-во ТулГУ, 2017. 296 с.: ISBN 978-5-7679-3845-2.

55. *Материаловедение: учебник для вузов* / Н.Н. Сергеев, А.Е. Гвоздев., В.К. Зеленко, А.Н. Сергеев, О.В. Кузовлева, Н.Е. Стариков, В.И. Золотухин, А.Д. Бреки; под ред. проф. А.Е. Гвоздева. Изд. 2-е доп. и испр. Тула: Изд-во ТулГУ, 2017. 469 с.: ISBN 978-5-7679-3776-9.

56. *Технология металлов и сплавов: учебник* / Н.Н. Сергеев, А.Е. Гвоздев, Н.Е. Стариков, В.И. Золотухин, А.Н. Сергеев, А.Д. Бреки, О.В. Кузовлева, Г.М. Журавлёв, Д.А. Провоторов.; Под ред. проф. Н.Н. Сергеева. Тула: Изд-во ТулГУ, 2017. – 490 с.: ISBN 978-5-7679-3777-6.

57. *Спецглавы математики и их применение в технике: учебник* / А.С. Пустовгар, Г.М. Журавлёв, А.Е. Гвоздев. Тула: Изд-во ТулГУ, 2017. 112 с.: ISBN 978-5-7679-3808-7.

58. Патент на полезную модель 2016142134 (170385) Образец для определения адгезионной прочности покрытий / Н.Н. Сергеев, А.Н. Сергеев, Д.А. Провоторов, Д.М. Хонелидзе, И.В. Тихонова, А.Д. Бреки, И.В. Минаев, О.В. Кузовлева, Д.В. Малий, А.А. Калинин,

С.Н. Кутепов, А.Е. Гвоздев, А.И. Кузнецова, А.В. Казакова, Д.Н. Романенко, Е.Ф. Романенко, В.Э. Лисицина; заявитель и патентообладатель Гвоздев Александр Евгеньевич. – № 2016142134 (17385) заявл. 26.10.16; опубл. 24.04.17, Бюл. № 12. 6 с.

59. Свидетельство РФ №2017616180 о государственной регистрации программы на ЭВМ «Программный комплекс для моделирования ресурсосберегающих производств обработки и фрикционного взаимодействия металлических систем» / А.Д. Бреки, А.Е. Гвоздев, Ю.С. Дорохин, Д.С. Клементьев, С.Н. Кутепов, О.В. Кузовлева, Д.В. Малий, П.Н. Медведев, И.В. Минаев, Д.В. Провоторов, Н.Е. Проскуряков, А.Н. Сергеев, Д.М. Хонелидзе. Заявка № 2017613672. Дата государственной регистрации в реестре программ для ЭВМ в Роспатенте 02.06.2017.

Сергеев Николай Николаевич, д-р техн. наук, проф., technology@tspu.tula.ru, Россия, Тула, Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого,

Сергеев Александр Николаевич, д-р пед. наук, проф., anserqueev@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого,

Кутепов Сергей Николаевич, канд. пед. наук., kutepov.sergei@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого,

Гвоздев Александр Евгеньевич д-р техн. наук, проф., gwozdew.alexandr2013@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого,

Стариков Николай Евгеньевич, д-р техн. наук, проф., starikov_taii@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Пантюхин Олег Викторович, канд. техн. наук, доц., gwozdew.alexandr2013@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

THE USE OF HYDROGEN TRAPS TO CONTROL THE PROCESS OF HYDROGEN CRACKING OF WELDED JOINTS OF HIGH STRENGTH STEELS

N.N. Sergeev, A.N. Sergeev, S.N. Kutepov, A.E. Gvozdev,
N.E. Starikov, O.V. Pantyukhin

The article considers the interaction of hydrogen with defects of crystal structure in metals and alloys. The article considers the modern methods of hardening metals and alloys to hydrogen induced cracking, based on the creation of metal uniformly distributed irreversible hydrogen traps, which reduce the susceptibility of the metal to hydrogen cracking.

Key words: hydrogen traps, grain boundaries, inclusions, interstitial atoms, binding energy, welded joints.

Sergeev Nikolay Nikolaevich, doctor of technical science, professor, technology@tspu.tula.ru, Russia, Tula, Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University,

Sergeev Aleksandr Nikolaevich, doctor of pedagogical science, professor, technology@tspu.tula.ru, Russia, Tula, Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University,

Kutepov Sergey Nikolaevich, candidate of pedagogical science, kutepov.sergei@mail.ru, Russia, Tula, Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University

Gvozdev Aleksandr Evgen'yevich, doctor of technical science, professor, gvozdew.alexandr2013@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University,

Starikov Nikolay Evgenievich, doctor of technical sciences, professor, starikov_taii@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Pantjuhin Oleg Viktorovich, candidate of technical sciences, docent, gwozdew.alexandr2013@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 535.345.1

ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРОФОТОМЕТРА УЛЬТРАФИОЛЕТОВОЙ ОБЛАСТИ ДЛИН ВОЛН ДЛЯ АНАЛИЗА СПЕКТРОВ ПРОПУСКАНИЯ ДИСПЕРСНЫХ СРЕД

Е.Е. Майоров, А.Ч. Машек, Г.А. Цыганкова, Е.А. Писарева

В представленной статье проведено исследование спектрофотометра ультрафиолетовой области длин волн для определения спектров пропускания дисперсных сред. Отработана технология юстировки и настройки прибора. Получены данные отношения уровней «сигнал»/«шум» (уровень 100 %/уровень 0%), которые вполне соответствует метрологическим требованиям для поставленной задачи исследования ультрафиолетовых спектров пропускания в дисперсных средах. Представлена калибровочная зависимость по длинам волн и показано, что погрешность калибровки во всем рабочем спектральном диапазоне была не хуже 2 нм. Проведена оценка спектрального разрешения прибора по дуплетным линиям на $\lambda = 302,2$ нм и составила порядка $\delta\lambda = 5$ нм. Получены фотометрические погрешности для шкалы пропускания: ультрафиолетового стекла $\delta T = 5$ % и белого стекла $\delta T = 7$ %. Приведены основные технико-эксплуатационные характеристики спектрофотометра ультрафиолетовой области длин волн.

Ключевые слова: юстировка, спектр пропускания, спектральное разрешение, длина волны, полихроматор, спектрофотометр.

Развитие высокотехнологичных способов производства с необходимостью обуславливает совершенствование методов и средств научной базы экспериментальных исследований. Важное место в решении указанной задачи занимают методы оптического контроля. Эти методы отличает, прежде всего, отсутствие материальных контактов с предметом исследования, а, следовательно – возможность достижения наиболее достоверных результатов эксперимента.

В этой области наиболее универсальными методами исследований являются спектральные методы. Эти методы позволяют решать такую задачу как исследование твердофазных и жидкофазных сред (дисперсных сред). Спектроскопия является высокоинформативным и высокоточным

инструментом получения данных. Уникальность спектральных методов обусловлена их возможностями [1 - 4]. Эти методы позволяют проводить исследования:

- статических и динамических процессов;
- не предъявляют требований к качеству контролируемой среды;
- позволяют производить сравнительный анализ спектров различных сред;
- позволяют получать информацию об исследуемом процессе как в количественном, так и качественном аспектах.

Спектральные методы и средства контроля дисперсных сред и работа соответствующих приборов основаны на анализе светового излучения, прошедшего через среду или поглощенного в этой среде (спектры пропускания, спектры поглощения) [5 - 7]. Анализ литературных данных показал, что наиболее перспективными в этом классе приборов являются спектральные приборы и системы, в которых используются ультрафиолетовые источники излучения [9 - 13]. Это направление в оптическом приборостроении представляет огромный интерес и интенсивно развивается.

Поэтому исследование спектрофотометра ультрафиолетовой области длин волн для анализа спектров пропускания дисперсных сред является актуальной задачей.

Описание спектрофотометра ультрафиолетовой области длин волн. Для контроля спектров пропускания дисперсных сред в ультрафиолетовой области спектра был исследован спектрофотометр, работающий в диапазоне длин волн $\lambda = 200...410$ нм. Внешний вид этого прибора показан на рис. 1 .



Рис. 1. Внешний вид прибора

В состав спектрофотометра входят (рис. 1) осветитель, включающий кюветную камеру, узел спектроанализатора, на основе полихроматора, электронная система сбора, обработки и вывода данных измерений.

В составе осветителя используется дейтериевая лампа ДДС – 30 со стандартным блоком питания (или ртутно-гелиевая лампа ДРГС – 12 при калибровке шкалы длин волн), излучение от которой через двухлинзовый кварцевый конденсор (кварцевое стекло КУ – 1) и кварцевую жидкостную кювету с исследуемой пробой передается на входную щель полихроматора. Входная щель полихроматора представляет собой отверстие диаметром 0,3 мм. Использовались стандартные кюветы с длиной прохода 2 или 10 мм, или же специально разработанная кювета с длиной прохода 0,5 мм с оптическими окнами из лейкосапфира. Последняя кювета устанавливалась непосредственно после излучателя в "широком" пучке излучения, что позволяло снизить систематическую погрешность измерений пропускания из-за рефракции света в заполненной кювете, которая располагается в сходящихся пучках вблизи входной щели полихроматора.

Помимо кювет для исследования прозрачности дисперсных сред прибор обеспечивал возможность измерения коэффициента пропускания также и в твердотельных образцах с геометрическими размерами рабочей поверхности до 30х30 мм или ее диаметром в круглых образцах до 42 мм и толщиной до 4 мм. В полихроматоре спектрометра использовалась классическая вогнутая нарезная дифракционная решетка с радиусом кривизны $r = 62,5$ мм и постоянной 600 шт./мм. Спектр формировался на круге Роуланда (диаметр 130 мм) и регистрировался прибором с зарядовой связью (ПЗС – линейкой). Электронная система сбора и обработки данных, а также прилагаемое программное обеспечение позволяло выводить результаты измерений в виде графиков, числовых массивов, производить хранение и распечатку данных.

В ходе проводимого исследования предполагалась отработка технологии юстировки и настройки прибора, а также лабораторной проверки его технико-эксплуатационных характеристик (калибровки по шкале длин волн; спектрального разрешения, линейности шкалы пропускания).

Юстировка оптической системы спектрофотометра. Юстировка оптической системы спектрофотометра осуществлялась в два этапа. На первом этапе использовалась ртутно-гелиевая лампа ДРГС – 12; на этом этапе была обеспечена наблюдаемая визуально наилучшая резкость характерной фиолетовой линии излучения ртутного спектра на $\lambda = 405$ нм с ее установкой вблизи длинноволнового края диапазона измерений на фоточувствительном слое ПЗС – линейки. На втором этапе юстировки применялась дейтериевая лампа ДДС – 30 на предмет обеспечения наибольшего уровня выходного сигнала при свободном оптическом тракте в осветителе.

Уровень этого сигнала в шестнадцатиразрядном аналого-цифровом преобразователе (АЦП) практически наложен на ось абсцисс графика и приведен на рис. 2.

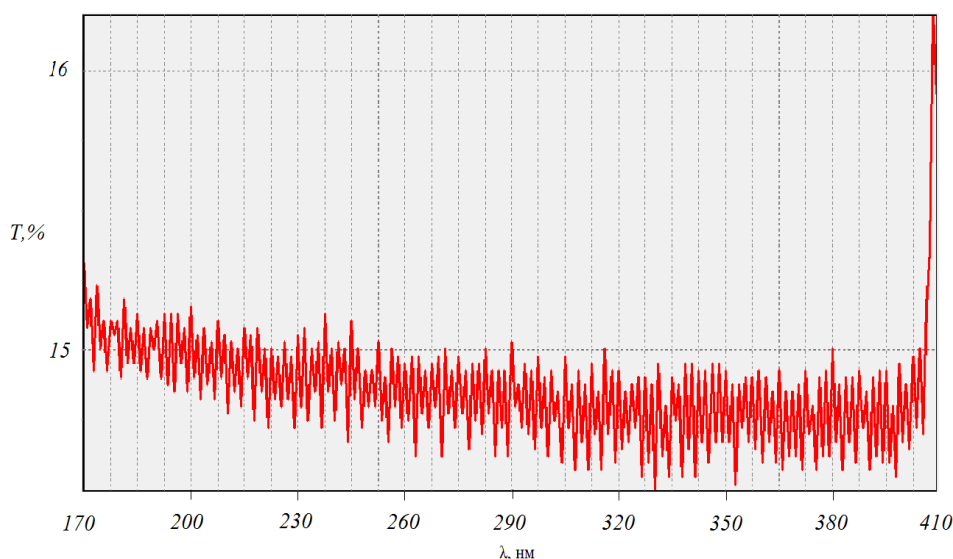


Рис. 2. Сигнал АЦП по уровню темнового тока ПЗС – линейки

Как видно из рис. 2 на коротковолновой границе рабочего спектрального диапазона имеет место более чем четырехкратное снижение сигнала АЦП для уровня 100%, связано это как с уменьшением светоотдачи излучателя (ДДС – 30), так и со снижением чувствительности используемой ПЗС – линейки. В той же области имеет место возрастание "темнового" уровня сигнала АЦП. Это может быть сопоставлено с влиянием "внешних" засветок, выявляемых при высокой чувствительности ПЗС – фотодетектора даже при использовании двойного корпусирования полихроматора прибора.

Определить уровень рассеянного света в открытом оптическом канале измерений здесь не представлялось возможным.

Тем не менее, исходя из данных рис. 2, можно считать, что имеющееся отношение уровней "сигнал" / "шум" (уровень 100 % / уровень 0 %) вполне соответствует метрологическим требованиям для поставленной задачи исследования ультрафиолетовой области длин волн для анализа спектров пропускания дисперсных сред.

Калибровка шкалы длин волн спектрофотометра. По завершении второго этапа юстировки с использованием лампы ДДС – 30 производилось уточнение калибровки шкалы длин волн спектрофотометра по характеристическим линиям излучения лампы ДРГС – 12, устанавливаемой повторно в осветитель прибора. Результаты измерений ртутно-гелиевого спектра представлены на рис. 3, на поле которого даны положения наблюдаемых соответствующими нормируемыми значениями длин волн.

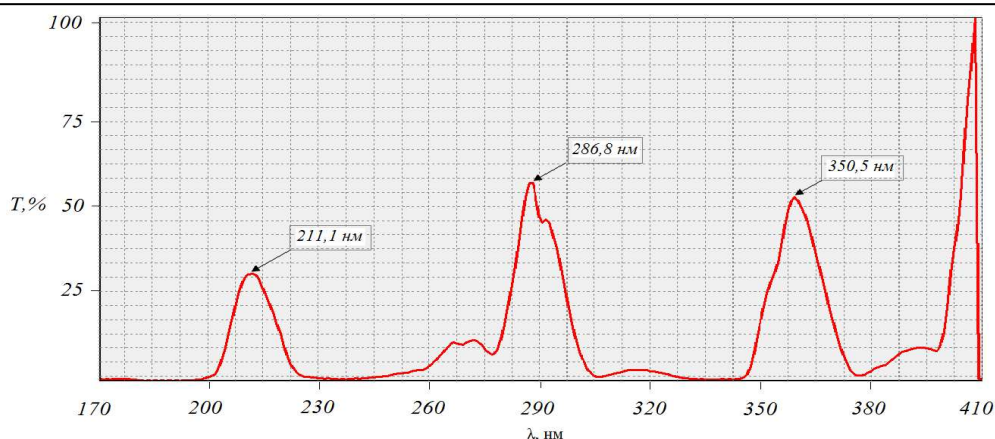


Рис. 3. Спектры излучения ртутно-гелиевой лампы ДРГС-12

Как видно шкала длин волн имеет систематический сдвиг в коротковолновую часть спектра приблизительно на 15 нм, который можно скорректировать специализированной программой обработки спектров [10 - 13]. Откорректированная калибровочная зависимость по длинам волн имеет линейный характер, использованное для вывода данных по шкале длин волн выражение приведено на поле рис. 4. Погрешность калибровки по длинам волн была не хуже 2 нм во всем рабочем спектральном диапазоне (рис. 5), что вполне удовлетворяло требованиям данного исследования.

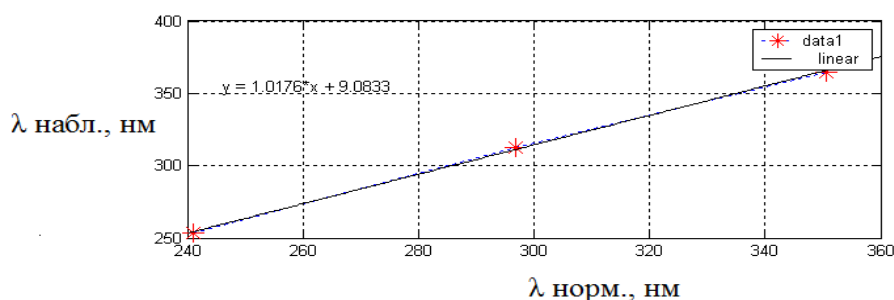


Рис. 4. Сопоставление спектрального положения нормируемых и наблюдаемых линий спектра излучения лампы ДРГС – 12: точки – эксперимент, сплошная линия – результат линейной аппроксимации

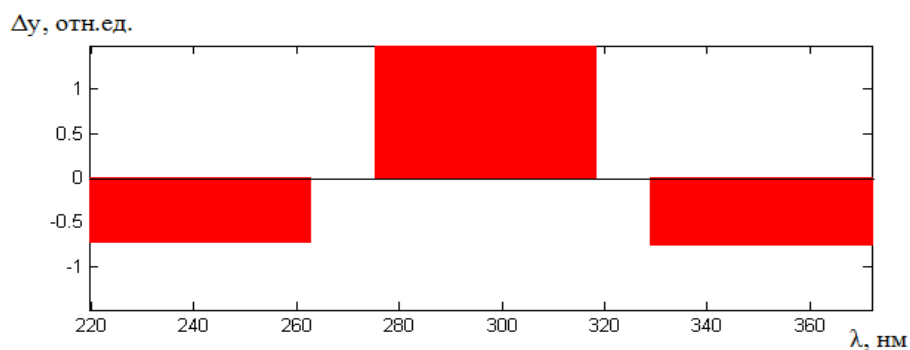


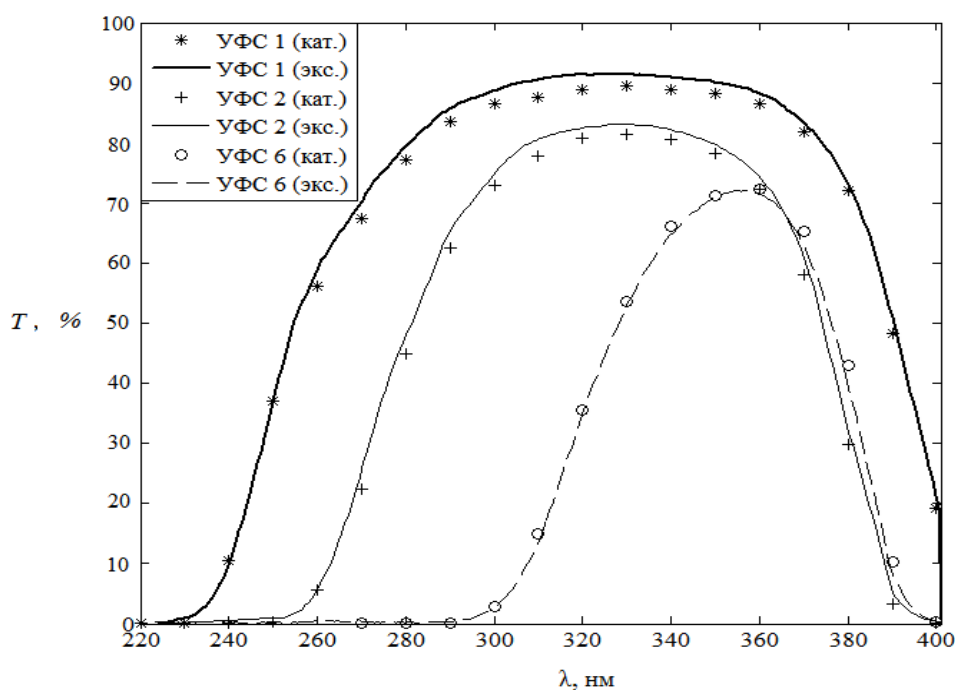
Рис. 5. Погрешность линейной аппроксимации калибровки шкалы длин волн

Спектральное разрешение прибора оценивалось по дуплетным линиям на $\lambda = 302,2$ нм и составило на уровне $\delta\lambda \leq 5$ нм, что также оценивалось как удовлетворительный результат для ожидаемого монотонного характера ультрафиолетового спектрального пропускания в исследуемых дисперсных средах [11 - 13].

Фотометрическая погрешность шкалы пропускания. Для определения фотометрической погрешности шкалы пропускания были сопоставлены результаты измерений спектров пропускания ультрафиолетовых стёкол серии УФС и белых стёкол серии БС, охватывающие диапазон по коэффициенту пропускания $T = 0...90$ % с результатами расчетов тех же спектров по правилам [13].

Результаты этого сопоставления приведены на рис. 6.

Анализ приведенных данных (рис. 6) показал, что фотометрическая погрешность для шкалы пропускания составляла до $\delta T = 5\%$ для стекол серии УФС и до $\delta T = 7$ % для стекол серии БС, что для последних может отчасти быть вызвано их старением. Использованные образцы стекол БС были каталогизированы в 1961 г. с применением доступных в то время спектрофотометрических методов и средств [8, 13]. На поверхности всех использованных образцов стекла БС отчетливо наблюдался визуально поверхностный рассеивающий слой, который снижает прозрачность объекта в сравнении с расчетными величинами на рис. 6 б.



а

Рис. 6. Спектральное пропускание (начало):
а – ультрафиолетовых стекол серий УФС

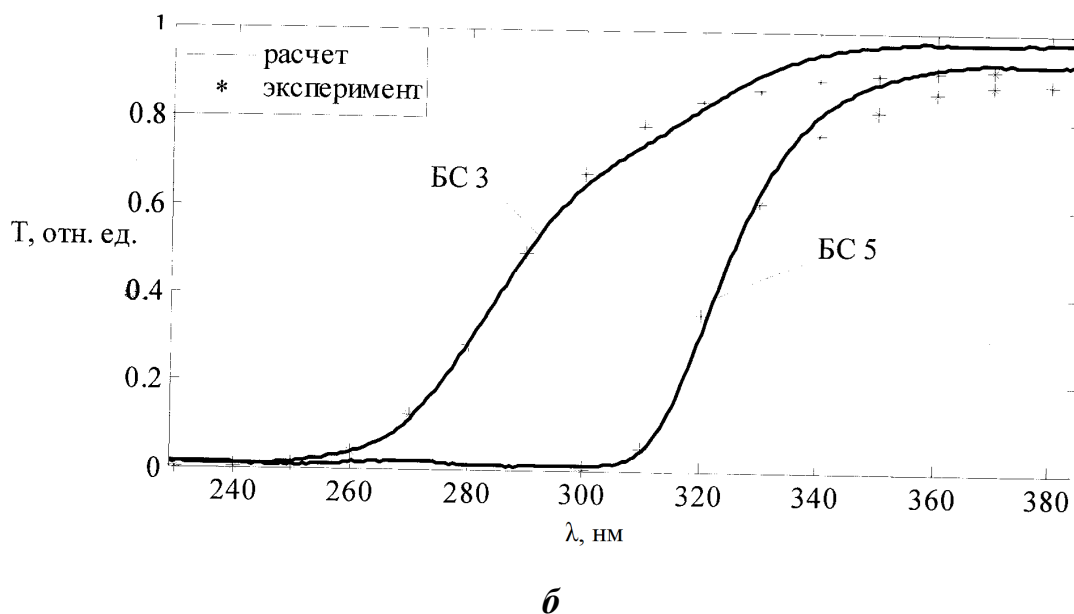


**Рис. 6. Спектральное пропускание (окончание):
б – белых стекол серий БС**

В заключение, обобщая представленные выше результаты, приведем основные технико-эксплуатационные характеристики ультрафиолетового спектрофотометра:

- рабочий спектральный диапазон 200...400 нм;
- предел спектрального разрешения не хуже 5 нм;
- погрешность калибровки шкалы длин волн не хуже 2 нм;
- погрешность измерения коэффициента пропускания не хуже 5 %;
- время регистрации одного спектра 25 мс;
- питание от сети 220 В, 50 Гц;
- передача данных через порт RS 232;
- габаритные размеры 700х250х180 мм.

Список литературы

1. Малышев В.И. Исследование водородной связи спектроскопическими методами. // Успехи физических наук. 1957. Т. 63. Вып. №2. С. 323 – 353.
2. Альперович Л.И., Бахшиев Н.Г., Забиякин Ю.Е., Либов В.С. Соотношения Крамерса – Кронига для молекулярных спектров жидкостей и растворов. // Оптика и спектроскопия. 1968. Т. 24. С. 60 – 63.
3. Pawan K. Agrawal. NMR Spectroscopy in the structural elucidation of oligosaccharides and glycosides. // The International Journal of Plant Biochemistry. 1992 Vol. 31. Iss. 10. P. 3307 – 3330.
4. Пентин Ю.А., Вилков Л.В. Физические методы исследования в химии. М.: Мир. 2006. 683 с.

5. Brik M.G., Kuznik W., Gondek E., Kityk I.V., Uchacz, Szlachcic T.P., Jarosz B., Plucinski K.J. Optical absorption measurements and quantum-chemical simulations of optical properties of novel fluoro derivatives of pyrazoloquinoline. // Chemical Physics. 2010. Vol. 370. Iss. 1 – 3. P. 194 – 200.

6. Junqueira G.M.A., Faria M.S., Da Silva Jr.A.M., Dos Santos H.F. Theoretical study of nonlinear optical properties of oxocarbon derivatives. // International Journal of Quantum Chemistry. 2010. Vol. 110. Iss. 3. P. 489 – 497.

7. Jan Řezáč, Pavel Hobza. Advanced corrections of hydrogen bonding and dispersion for semiempirical quantum mechanical methods. // Journal of Chemical Theory and Computation. 2011. Vol. 8. Iss. 1. P. 141 – 151.

8. Петровский Г.Т. Цветное оптическое стекло и особые стекла: каталог. М.: Дом оптики. 1990. 228 с.

9. Белов Н.П., Лапшов С.Н., Майоров Е.Е., Шерстобитова А.С., Яськов А.Д. Оптические свойства растворов черных щелоков и рефрактометрические средства контроля концентрации сухого остатка в сульфатном производстве целлюлозы // Журнал Прикладной Спектроскопии. 2012. Т. 79. № 3. С. 514 – 516.

10. Майоров Е.Е. Исследование оптических свойств жидкофазных сред на основе гликолей. // Научное обозрение. 2013. №4. С.166 – 176.

11. Белов Н.П., Лапшов С.Н., Майоров Е.Е., Шерстобитова А.С., Яськов А.Д. Оптические свойства зеленых щелоков и применение промышленной рефрактометрии для контроля их состава при производстве сульфатной целлюлозы // Оптический журнал. 2014. Т. 81. № 1. С. 60 – 65.

12. Майоров Е.Е., Прокопенко В.Т., Ушверидзе Л.А. Исследование ультрафиолетового спектрофотометра ($\lambda = 200...400$ нм) и его компонентов // Приборы. 2014. №2 (164). С.10 – 15.

13. Майоров Е.Е., Машек А.Ч., Цыганкова Г.А., Хайдаров А.Г., Абрамян В.К., Зайцев Ю.Е. Разработка лабораторного спектрофотометра видимой области спектра для контроля жидкофазных сред // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2016. №8. С. 42 – 46.

Майоров Евгений Евгеньевич, канд. тех. наук, доц., зав. кафедрой, majorov_ee@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Университет при Межпарламентской Ассамблее ЕвразЭС,

Машек Александр Чеславович, преподаватель, mashek50@mail.ru, Россия, Пушкин, Военно-морской политехнический институт,

Цыганкова Галина Александровна, канд. физ.-мат. наук, доц., galusinka@mail.ru, Россия, Пушкин, Военно-морской политехнический институт,

Писарева Елена Алексеевна, старший преподаватель, episareva@icloud.com, Россия, Санкт-Петербург, Михайловская военная артиллерийская академия.

THE STUDY SPECTROPHOTOMETER THE ULTRAVIOLET REGION
OF WAVELENGTHS FOR THE ANALYSIS OF TRANSMISSION SPECTRUM
OF DISPERSION MEDIUM

E. E. Maiorov, A. C. Mashek, G. A. Tsygankova, E. A. Pisareva

In the present article a study of spectrophotometer the ultraviolet region of wavelengths to determine the transmission spectrum of dispersion medium was conducted. Technology alignment and device settings were worked. The data the ratio of the levels of "signal"/"noise" (100 % / 0%), which is consistent with the metrological requirements for the tasks of the study of ultraviolet spectra in dispersive media were obtained. The calibration dependence of the wavelength and it is shown that the accuracy of calibration over the entire operating spectral range was better than 2 nm were presented. The estimation of the spectral resolution of the instrument at doublenum lines at $\lambda = 302,2$ nm was of the order of $\delta\lambda = 5$ nm was conducted. The obtained photometric error for scale transmittance: ultraviolet glass $\delta T = 5$ % and white glass $\delta T = 7$ % were obtained. The main technical and operational characteristics of the spectrophotometer the ultraviolet region of wavelengths were presented.

Key words: adjustment, transmittance spectrum, spectral resolution, wavelength, polarimeter, spectrophotometer.

Maiorov Evgeny Evgenievich, candidate. of technical sciences, docent, head of chair, maiorov_ee@mail.ru, Russia, Saint-Petersburg, University at the inter-parliamentary Assembly of EurAsEC,

Mashek Alexander Cheslavovich, teacher, mashek50@mail.ru, Russia, Pushkin, Naval Polytechnic Institute,

Tsygankova Galina Aleksandrovna, candidate of physical and mathematical sciences, docent, galusinka@mail.ru, Russia, Pushkin, Naval Polytechnic Institute,

Pisareva Elena Alekseevna, senior teacher, episareva@icloud.com, Russia, Saint-Petersburg, Mikhailovskaya artillery military academy.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И АЛГОРИТМ КАЛИБРОВКИ ДАТЧИКА MPU6000

С.И. Зыкин, Н.В. Ивахно

В статье рассмотрен алгоритм калибровки микромеханических акселерометров в составе датчика MPU-6000, который позволяет существенно уменьшить влияние смещения нуля и температурного дрейфа.

Ключевые слова: датчик угла, температурные поправки, калибровка, точность, смещение, корректирующие коэффициенты.

В последнее время широкое распространение получили датчики, построенные на микроэлектромеханических элементах. Популярность обусловлена простотой их использования, относительно низкой ценой, малыми габаритами, высокой надежностью и работоспособностью в достаточно жестких условиях окружающей среды [1,2].

В одном из исследуемых макетов использована микросхема MPU-6000, представляющая собой 6-осевой датчик, состоящий из трехосевого гироскопа и трехосевого акселерометра [2]. Данные микроэлектромеханические датчики обладают малыми габаритами, весом и энергопотреблением, высокой надежностью, невысокой стоимостью [1].

В ходе испытаний при изменении рабочей температуры от -40°C до $+50^{\circ}\text{C}$ выявлены существенные температурные уходы сигналов с датчиков.

В результате проведенных экспериментальных исследований разработан алгоритм калибровки и расчета коэффициентов передачи, коэффициентов перекрытия связей и нахождения аппроксимирующих функций температурного дрейфа для MPU6000.

Данный алгоритм включает в себя [3,4]:

- обработку результатов измерений в 6 положениях макета при 20 различных температурах с шагом изменения температуры 5°C при нагреве макета в камере от -40°C до $+50^{\circ}\text{C}$;
- расчет 9 коэффициентов передачи и трех значений смещения нуля для каждой температуры калибровки;
- построение зависимостей изменения корректирующих коэффициентов от температуры;
- получение аппроксимирующей функции, определяющей зависимость каждого из коэффициентов передачи и смещения нуля от температуры.

С помощью специальной программы для считывания показаний получены файлы, включающие в себя данные трехосевого акселерометра и датчика температуры (рис. 1).

Файл	Правка	Формат	Вид	Справка
-16226	362	-148	-721	
-16236	358	-140	-722	
-16236	364	-142	-721	
-16234	362	-138	-720	
-16222	348	-100	-722	
-16232	340	-102	-723	
-16220	348	-128	-722	
-16204	350	-130	-722	

Рис. 1. Формат записи данных в .txt файл

Первые три столбца данных соответствуют значениям акселерометра по осям x , y , z . Четвертый столбец – значения датчика температуры.

Калибровка акселерометров макета производилась с помощью приспособления для калибровки, которое представляет собой полый каркас прямоугольной формы с закрепленным макетом внутри.

Макет устанавливался на платформу, отгоризонтированную с помощью квадранта с точностью не менее одной угловой минуты. Для получения более точных данных калибровки макет должен быть выставлен в нулевое положение по показаниям специальной программы и закреплен в этом положении на указанном приспособлении.

С помощью программы произведено снятие показаний и запись их в файлы в 6 положениях, проиллюстрированных на рис. 2.

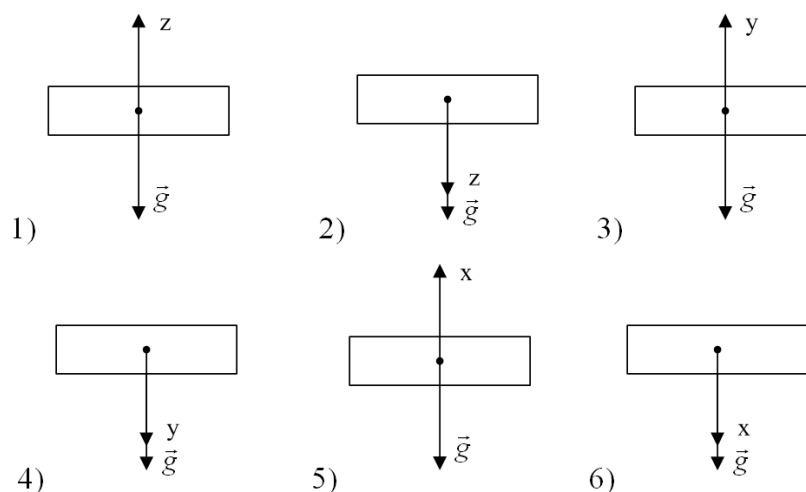


Рис. 2. Положения макета для калибровки

Далее измеренные данные обрабатываются для получения 12 корректирующих значений b_{xa} , b_{ya} , b_{za} , S_{xa} , S_{ya} , S_{za} , m_{xy} , m_{xz} , m_{yz} , m_{yx} , m_{zx} , m_{zy} , участвующих в расчете угла, крена, тангажа макета.

Скорректированный сигнал акселерометра рассчитывается из матриц, представленных формулами [3,4]:

$$\begin{bmatrix} l_{xa} \\ l_{ya} \\ l_{za} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{00} & m_{01} & m_{02} \\ m_{10} & m_{11} & m_{12} \\ m_{20} & m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} \cdot \left(\begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{xa} \\ b_{ya} \\ b_{za} \end{bmatrix} \right),$$

где: l_{xa} , l_{ya} , l_{za} - выходные сигналы акселерометров по осям x, y, z; b_{xa} , b_{ya} , b_{za} - погрешности смещения нуля акселерометров по осям x, y, z; S_{xa} , S_{ya} , S_{za} - коэффициент передачи акселерометров по осям x, y, z; a_x , a_y , a_z - действительные значения ускорений по осям x, y, z; m_{xy} , m_{xz} , m_{yz} , m_{yx} , m_{zx} , m_{zy} - коэффициенты передачи акселерометров по пересеченным осям.

Алгоритм расчета корректирующих коэффициентов.

На первом этапе измеряется ускорение свободного падения в каждом из шести положений [5]. Для исключения влияния шумов, результаты измерений усреднялись на интервале времени 100 секунд с шагом измерения 50 мс.

Рассчитаем среднее значение полученных данных с акселерометров:

1) для положения 1-2 на рис. 2:

$$L_{za1} = \frac{\sum l_{za_i} \cdot \Delta t}{t_{ycp}}, \quad L_{za2} = \frac{\sum l_{za_i} \cdot \Delta t}{t_{ycp}};$$

2) для положения 3-4 на рис. 2:

$$L_{za3} = \frac{\sum l_{ya_i} \cdot \Delta t}{t_{ycp}}, \quad L_{za4} = \frac{\sum l_{ya_i} \cdot \Delta t}{t_{ycp}};$$

3) для положения 5-6 на рис. 2:

$$L_{za5} = \frac{\sum l_{xa_i} \cdot \Delta t}{t_{ycp}}, \quad L_{za6} = \frac{\sum l_{xa_i} \cdot \Delta t}{t_{ycp}};$$

где Δt - интервал времени между измерениями; t_{ycp} - время усреднения.

Составим матрицу со значениями калибровки в 6 положениях:

$$W = \begin{bmatrix} L_{xa1} & L_{ya1} & L_{za1} \\ \dots & \dots & \dots \\ L_{xa6} & L_{ya6} & L_{za6} \end{bmatrix}$$

Рассчитаем смещение нуля акселерометров для рабочего положения по формулам [3,4]:

$$b_{xa} = \frac{L_{xa1} + L_{xa2} + L_{xa3} + L_{xa4} + L_{xa5} + L_{xa6}}{6},$$

$$b_{ya} = \frac{L_{ya1} + L_{ya2} + L_{ya3} + L_{ya4} + L_{ya5} + L_{ya6}}{6},$$

$$b_{za} = \frac{L_{za1} + L_{za2} + L_{za3} + L_{za4} + L_{za5} + L_{za6}}{6}.$$

Коэффициенты передачи:

$$S_{xa} = (L_{xa3} - L_{xa4}) \cdot 0,5,$$

$$S_{ya} = (L_{za5} - L_{za6}) \cdot 0,5,$$

$$S_{za} = (L_{ya1} - L_{ya2}) \cdot 0,5,$$

Коэффициенты передачи акселерометров по пересеченным осям:

$$m_{yx} = (L_{xa1} - L_{xa2}) \cdot 0,5,$$

$$m_{zx} = (L_{ya5} - L_{ya6}) \cdot 0,5,$$

$$m_{xy} = (L_{ya1} - L_{ya2}) \cdot 0,5,$$

$$m_{zy} = (L_{za3} - L_{za4}) \cdot 0,5,$$

$$m_{xz} = (L_{xa5} - L_{xa6}) \cdot 0,5,$$

$$m_{yz} = (L_{ya3} - L_{ya4}) \cdot 0,5.$$

Для уменьшения температурной погрешности проведена обработка полученных значений калибровки макета в 6 положениях при 20 различных температурах. Рассчитаны погрешности смещения нуля акселерометров, коэффициент передачи акселерометров, коэффициенты передачи акселерометров по пересеченным осям (12 корректирующих коэффициентов) для каждой температуры калибровки. Для каждого из коэффициентов построены графики зависимости изменения коэффициента от температуры. Проведена аппроксимация данных графиков, в результате которой получены формулы зависимости коэффициента от температуры.

На рис. 3 представлен график зависимости погрешности смещения нуля по осям x, y от температуры.

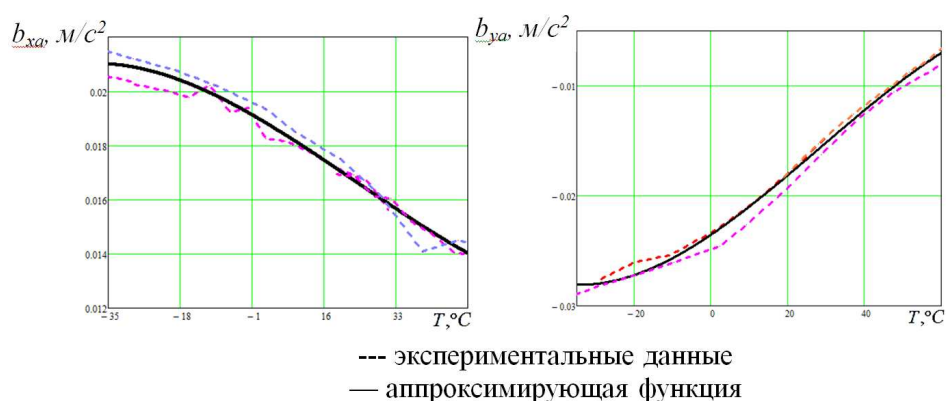


Рис. 3. Результаты анализа полученных данных

Формула зависимости погрешности смещения нуля акселерометров по осям x имеет вид:

$$b_{xa} = k_{bx0} + k_{bx1} \cdot T + k_{bx2} \cdot T^2 + k_{bx3} \cdot T^3,$$

где k_{bx0} , k_{bx1} , k_{bx2} , k_{bx3} – коэффициенты полинома; T – температура. Значения коэффициентов: $k_{bx0} = 0.019$, $k_{bx1} = -9.045 \cdot 10^{-5}$, $k_{bx2} = -6.605 \cdot 10^{-7}$, $k_{bx3} = 9.265 \cdot 10^{-9}$.

Получены формулы зависимости 12 коэффициентов от температуры. Коэффициенты полинома имеют значения с плавающей запятой, что увеличивает время, затрачиваемое микроконтроллером на обработку данных. Использование таблицы рассчитанных значений 12 корректирующих коэффициентов в памяти микроконтроллера позволяет уменьшить время вычисления угла на 30%.

Полученные коэффициенты, рассчитанные при температурном шаге – один градус, записываются в матрицу и память микроконтроллера:

$$\begin{bmatrix} b_{xa1} & b_{ya1} & b_{za1} & S_{xa1} & S_{ya1} & S_{za1} & m_{yx} & m_{zx} & m_{xy} & m_{zy} & m_{xz} & m_{yz} \\ b_{xa2} & b_{ya2} & b_{za2} & S_{xa2} & S_{ya2} & S_{za2} & m_{yx2} & m_{zx2} & m_{xy2} & m_{zy2} & m_{xz2} & m_{yz2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ b_{xan} & b_{yan} & b_{zan} & S_{xan} & S_{yan} & S_{zan} & m_{yxn} & m_{zxn} & m_{xyn} & m_{zyn} & m_{xzn} & m_{yzn} \end{bmatrix},$$

где b_{xa1} – коэффициент, рассчитанный при минимальной температуре; b_{xan} – коэффициент, рассчитанный при максимальной температуре.

После внесения в алгоритм работы макета корректирующих коэффициентов получены значения смещения угла крена, тангажа при разной температуре, представленные в таблице.

Значения смещения угла крена, тангажа

Температура	Крен	Тангаж
50	0.09	0.05
40	0.02	0.03
30	-0.01	0.01
27	0.02	0
20	0.03	-0.03
10	0.18	-0.09
0	0.08	0.06
-10	-0.06	-0.04
-20	0.03	0.03
-30	-0.12	0.08
-40	0.01	-0.02

Полученные результаты экспериментальных исследований датчика MPU6000 обеспечили реализацию в алгоритме работы макета корректирующих коэффициентов, позволяющих уменьшить погрешность измерения углов до ± 0.5 градусов в диапазоне температур от -40°C до $+50^{\circ}\text{C}$. Данные могут быть использованы как при построении информационно-измерительных биотехнических систем, так и комплексов военного назначения в сложных условиях эксплуатации.

Список литературы

1. Н.В. Ивахно, С.А. Войтицкий, В.С. Ивахно Цифровая система обработки сигналов вращающегося трансформатора на основе DSP-микроконтроллера в составе электропривода // Известия Тульского государственного университета. Технические науки, 2012. Вып. 8. С. 184-189.
2. Н.В. Ивахно, А.В. Прохорцов, Е.Н. Сенина, С.С. Федоров Способ регистрации движения грудной клетки при диагностике состояния сонного апноэ. // Вестник новых медицинских технологий. 2014. Т.21. №4. С.133 – 136.
3. В.В. Шаврин, А.С. Конаков, В.И. Тисленко. Калибровка микро-электромеханических датчиков ускорений и угловых скоростей в бесплатформенных инерциальных навигационных системах // Доклады ТУСУРа, № 1 (25), часть 2, июнь 2012.
4. Брандт З. Статистические методы анализа наблюдений // под ред. В.Ф. Писаренко. М.: Мир, 1975.
5. Syed Z. Design and implementation issues of a portable navigation system: PHD Thesis. // Calgary, Canada: The University of Calgary, 2009.

Зыкин Сергей Игоревич, асп., sergius.klasis@gmail.com, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Ивахно Наталия Валериевна, д-р техн. наук, проф., natalia_iv@list.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

RESULTS OF EXPERIMENTAL STUDIES AND THE MPU6000 SENSOR CALIBRATION ALGORITHM

S.I. Zykin, N.V. Ivakhno

The algorithm of calibration of micromechanical accelerometers in the MPU-6000 sensor is considered, which allows to significantly reduce the effect of zero displacement and temperature drift.

Key words: angle sensor, temperature corrections, calibration, accuracy, offset, correction coefficients.

Zykin Sergey Igorevich, postgraduate, sergius.klasis@gmail.com, Russia, Tula, Tula State University,

Ivakhno Natalia Valerievna, doctor of technical sciences, professor, natalia_iv@list.ru, Russia, Tula, Tula State University

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ ДЛЯ ОРИЕНТАЦИИ, СТАБИЛИЗАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ

В.Я. Распопов, Д.М. Малютин

Приведены результаты теоретических и опытно - конструкторских работ в области прикладной гироскопии, выполненных коллективом кафедры «Приборы управления» Института высокоточных систем им. В.П. Грязева Тульского государственного университета. Рассмотрены характеристики инерциальных приборов (акселерометры, гироскопы) и измерительно - управляющих систем на их основе для стабилизации полезной нагрузки, определения угловых координат и навигационных параметров объектов различного базирования.

Ключевые слова: гироскоп, акселерометр, гиросtabilизатор.

Измерительной основой на борту подвижного объекта (ПО) наземного, морского и воздушно-космического базирования для определения их угловых координат и навигационных параметров в автономном режиме служат инерциальные приборы (гироскопы и акселерометры) и измерительные системы на их основе. Решение ряда задач ориентации, в том числе позиционирования, навигации и управления возможно с использованием информации о геофизических полях (гравитационное, магнитное и др.) и комплексированием ее с информацией от измерительных датчиков (приборов).

Следует отметить, что в современных инерциальных датчиках помимо механической и (или) электромеханической части, которые вырабатывают и сохраняют инерциальную информацию, имеется развитая электроника, которая обеспечивает съем информации, а также в гироскопических приборах и системах на их основе, управление их работой. Кроме того, в последнее десятилетие активно развиваются и применяются динамически настраиваемые гироскопы (ДНГ), волоконно - оптические гироскопы (ВОГ), волновые твердотельные гироскопы (ВТГ), микромеханические гироскопы и акселерометры (ММГ и ММА).

I. Инерциальные датчики и измерительные системы

Опыт разработки гироскопов для решения задач ориентации и управления динамичных летательных аппаратов (ЛА) [1-5] показал, что могут быть применены модернизированные решения соответствующих гироскопов и инерциальные системы с применением ММГ и ММА, комплексированные с магнитометрическими датчиками и системами спутниковой навигации [6-8].

1. Для измерения угловых отклонений продольной оси ЛА от исходного положения служат гиросприборы - измерители угловых перемещений [9]. На рис. 1, 2 приведены варианты конструкций подобных гиросприборов, а в табл.1 – их характеристики [10]. Технические решения защищены патентами.



Рис. 1. ИУП-01: а – прибор в сборе; б – прибор со снятым кожухом; в – 3D-модель

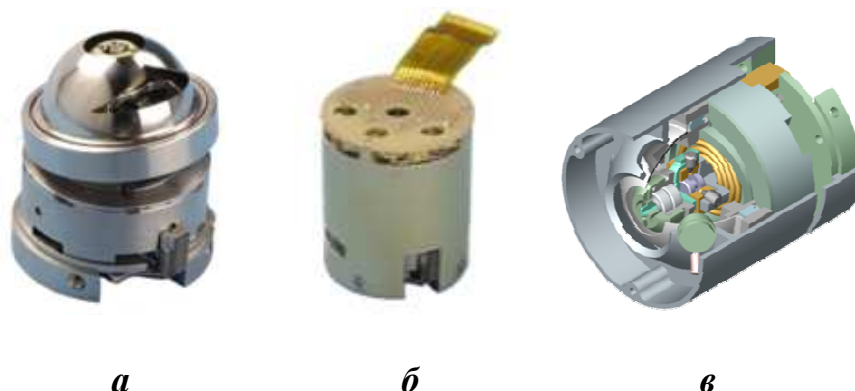


Рис. 2. ИУП-02: а – прибор со снятым кожухом; б – прибор в сборе; в – 3D-модель

Таблица 1
Технические характеристики измерителей угловых перемещений

№ п/п	Характеристика	Шифр гиросприбора	
		ИУП-01	ИУП-02
1	Схема гироскопа	Трехступенной с передачей момента вращения от привода к ротору через карданов подвес	Трехступенной с вращающимся кардановым подвесом и ротором вращающимся по инерции после разгона
2	Передаточная функция	$W(p) = T/(Tp+1)$	

Окончание табл. 1

№ п/п	Характеристика	Шифр гиросприбора	
		ИУП-01	ИУП-02
3	Постоянная времени, с	1,0 (не менее)	0,5 (не менее)
4	Тип датчика угла	Оптико-электронный (цифровой)	
5	Разброс коэффициента передачи, % (не более)	10 (возможна настройка блоком электроники)	
6	Чувствительность, град/с	0,05	0,1 (не более)
7	Привод ротора	Электропривод специальной разработки	Пружинный двигатель разобщенного типа
8	Габариты, мм (диаметр x длина)	60x60	36x46
9	Масса, г (не более)	420	120

Отличительной особенностью ИУП - 01 является возможность работы электродвигателя в качестве генератора при отключенном питании, когда ротор гироскопа вращается на выбеге (по инерции) и является приводом для двигателя-генератора.

2. Трехстепенной гироскоп со сферическим шарикоподшипниковым подвесом [11] находит широкое применение [12]. Ротор гироскопа имеет малые углы прокачки и используется преимущественно в замкнутых системах стабилизации. Качество стабилизации и управления существенно зависит от электронного блока управления. Прибор Д7 с целью уменьшения габаритов имеет плату, на которой расположены и датчики углов и датчики моментов, следствием чего является их электромагнитное взаимодействие. Для устранения этого эффекта разработан модифицированный прибор Д7-М, в котором датчики углов и моментов размещены на отдельных платах. На рис. 3 показан прибор Д7 с разработанной платой электроники, обеспечивающей заданные режимы работы гиростабилизатора (ГС) оптической аппаратуры большого увеличения, а на рис. 4 прибор Д7-М. Технические характеристики приборов приведены в табл. 2.

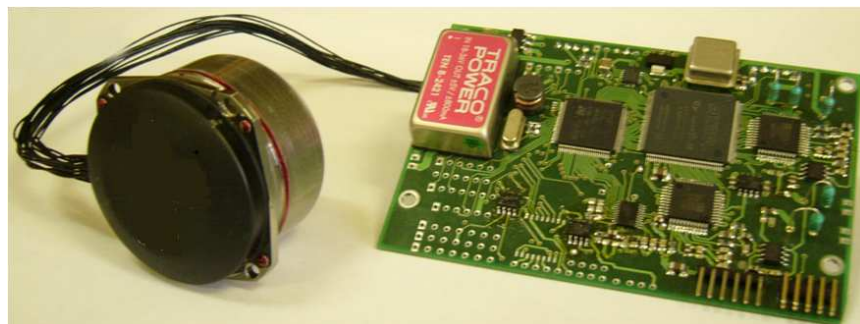


Рис. 3. Гиросприбор Д7 с платой электроники – датчик углов стабилизируемой платформы оптической аппаратуры



Рис. 4. Модернизированный гироскоп Д7-М (без платы электронной)

Таблица 2

Технические характеристики гироскопов

Параметр, размерность	Д7	Д7-М
Угловая скорость управляемой прецессии	60 ⁰ /с	130 ⁰ /с
Минимальная угловая скорость управления	0,02 ⁰ /с	0,02 ⁰ /с
Диапазон выходных значений углов	0,5 ⁰	0,5 ⁰
Погрешность статической крутизны	2,5%	2,5%
Габариты (диаметр, длина)	55мм, 40мм	63мм, 52мм

3. Волновые твердотельные гироскопы [11] с металлическим резонатором обладают эксплуатационными и точностными характеристиками достаточными для применения в бортовой аппаратуре динамичных летательных аппаратов. Требования, предъявляемые к волновым твердотельным гироскопам (ВТГ)-ДУС по параметрам точности, в настоящее время примерно следующие: уход 1-30 град/час в диапазоне температур (-50+60)⁰, диапазон измерения 0,01-9000 град/час, порог чувствительности – не более 0,005 град/час, смещение нуля – не более 1-10 град/час в рабочем диапазоне температур (-50+60)⁰, отклонение линейности масштабного коэффициента в рабочем диапазоне температур – не более 0,0035 %. Указанные параметры достаточны для использования ВТГ-ДУС в системах навигации и стабилизации среднего класса точности. В настоящее время в разработке находится (ВТГ) - ДУС с металлическим резонатором, на котором могут быть достигнуты указанные параметры точности (рис. 5).



Рис. 5. ВТГ-ДУС с металлическим резонатором; слева - направо прибор в сборе, кожух, чувствительный элемент (резонатор на основании), основание с узлом крепления, резонатор, крепежный винт

Работа (ВТГ) - ДУС проходит в режиме, так называемой силовой компенсации. При кратковременном отключении питания ВТГ сохраняет инерциальную информацию. Замечательной особенностью ВТГ является его способность работать в режиме, так называемой, свободной волны (СВ) при отключенном питании. При этом в течении нескольких секунд ВТГ работает как интегратор угловой скорости, то есть является датчиком угла. Следовательно, в режиме СВ ВТГ может быть применен как датчик угла вращающегося ЛА.

4. Для решения некоторых задач управления требуется измерение линейного ускорения ЛА с большой точностью. На рис. 6 показан модуль измерения линейного ускорения на базе акселерометра АК с частотным выходом. Высокую точность измерения обеспечивает акселерометр, а частотный выход позволяет встроиться в цифровую систему управления ЛА. Модуль имеет следующие технические характеристики: нестабильность масштабного коэффициента 0,1%, диапазон измеряемых ускорений: с частотным выходом $-10..+50 \text{ м/с}^2$; с аналоговым выходом $-50..+50 \text{ м/с}^2$, напряжение питания 24В, потребляемый ток 80 мА, дрейф нулевого сигнала через 30с после включения 0,1Гц/мин, коэффициент передачи 5Гц/м/с², температурный диапазон $(-55+60)^\circ$.

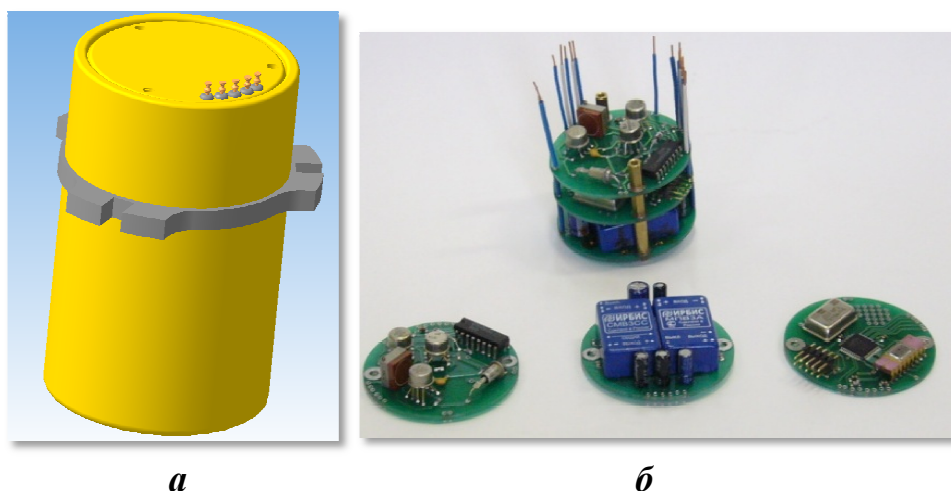


Рис. 6. Модуль измерения линейного ускорения с частотным выходом:
а – общий вид; б – сборочные единицы

5. На базе акселерометра и магнитометров разработан измеритель параметров морской волны (рис. 7) для работы в составе морского волномерного буя в качестве измерителя высоты, направления распространения и скорости волны. Очевидно, что указанные параметры морского волнения имеют важное значение для стационарных морских платформ различного назначения, а также для прогнозирования навигационной обстановки в районах расположения буюв. Погрешности измерений имеют характери-

стики: погрешность по углам бортовой и килевой качек – не более 0,8 град; погрешность по углу магнитного курса – не более 1 град. Погрешность измерения ординаты волны: в диапазоне 15м с длиной волны 300 м (период 13,9 с) не более $\pm 5\%$, в диапазоне 1,5м с длиной волны 30м (период 4,4 с) не более $\pm 8\%$.

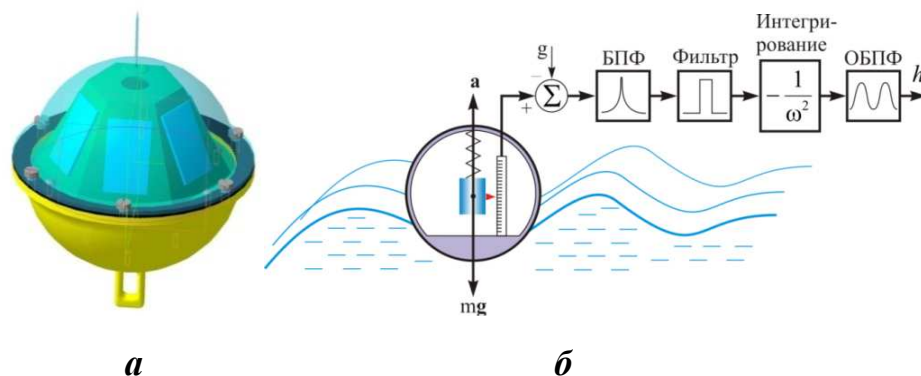


Рис. 7. Морской волномерный буй: а – 3D-модель; б – блок-схема вычислительного алгоритма для определения высоты волны на базе преобразования Фурье; g – ускорение силы тяжести; БПФ – блок преобразования Фурье; ОБПФ – блок обратного преобразования Фурье; h – высота волны

II. Системы позиционирования

Системы позиционирования [13] могут быть построены на различных физических принципах и применяться, например, в наשלемных целеуказателях и других применениях.

Малогабаритная система для автоматического определения углов места и азимута (рис. 8) построена на базе акселерометров АТ-1104 и магниторезисторов. Использование магниторезисторов для определения азимута потребовало решения задачи по компенсации девиации, обусловленной не только «топографией» магнитного поля объекта, но и фактом изменения магнитного «склонения».

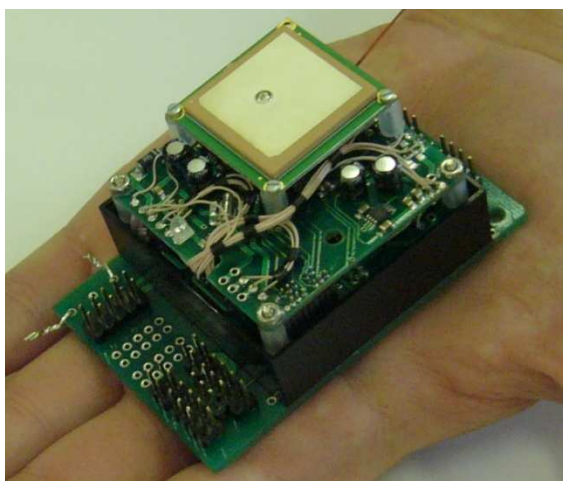


Рис. 8. Малогабаритная система позиционирования

Система позиционирования имеет следующие технические характеристики: диапазон изменения азимутального угла от 0 до 360 град, диапазон изменения угла места от -20 до +60 град, погрешность определения угла места 0,5 град, погрешность определения азимута в горизонте 0,5 град, масса 0,35 кг, габаритные размеры блока магниторезистивных датчиков 70мм, 30мм, 15мм.

III. Системы ориентации и навигации на базе инерциальных, оптических, магнитометрических и пирометрических датчиков

Системы служат для определения угловых координат подвижных объектов (ПО) и являются важнейшей составной частью систем навигации. Применение МЭМС - датчиков и технологий позволяет создавать миниатюрные по массе, габаритам и энергопотреблению измерительные приборы и системы [8], что делает возможным их применение в системах ориентации беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) [14,15,16] и создания на их основе программно - аппаратных комплексов, обеспечивающих выполнение полетного задания БПЛА, то есть микросистемную авионику [17,18] (рис. 9, табл. 3, 4).



а



б

Рис. 9. Инерциальные системы ориентации: а – для малоразмерного БПЛА; б – для пилотируемого ЛА (резервная система)

Таблица 3

Технические характеристики инерциальной микросистемы ориентации малогабаритного БПЛА

Характеристика	Значение
Напряжение питания, В	7-12
Потребляемый ток, А	0,35
Диапазон действующих угловых скоростей, %/с	±400
Диапазон действующих ускорений, g	6

Окончание табл.3

Характеристика	Значение
Диапазон измерения углов:	
- курса, °	0÷360
- тангажа, °	±90
- крена, °	±180
Масса, г	100
Габаритные размеры, мм	50×50×50

Таблица 4

Технические характеристики резервной системы ориентации

Характеристика	Значение
Напряжение питания, В	9, ±15
Потребляемый ток	
- по уровню напряжения ±15 В, А	0,1
- по уровню напряжения 9В, А	0,5
Характеристика	Значение
Диапазон действующих угловых скоростей, %/с	±100
Диапазон действующих ускорений, g	10
Диапазон измерения углов:	
- тангажа, °	±90
- крена, °	±180
Погрешность по углу тангажа:	
- прямолинейный полет, °	2
- маневрирования °	3
Погрешность по углу крена:	
- прямолинейный полет, °	2
- маневрирования °	3
Масса, г	750
Габаритные размеры, мм	79,5×Ø118

IV. Гравиметрические комплексы

Гравиметрические комплексы на базе индикаторных ГС имеют определяющее значение для создания и уточнения крупномасштабных карт гравитационного поля Земли [19, 20]. Глобальные карты аномалий гравитационного поля служат для целей автономной навигации в мировом океане, а также разведочной геофизики. Очевидно, что малогабаритные гравиметрические комплексы для аэро - и морских измерений существенно расширяют географию их применения.

Технические характеристики бортового гравиметрического комплекса ГРИН (рис. 10): инструментальная погрешность каналов гравиметрических датчиков 0,04 мГал; температура статирования гравиметрических датчиков 45°C; линейное смещение нуля-пункта гравиметрических датчиков не более 1 мГал/сутки; точность удержания вертикали в динамике ±15"; напряжение питания 220В, 50 Гц; потребляемая мощность 1кВт.

Комплекс «ГРИН» применен при проведении научных исследований и производственных работ в акватории Мирового океана и переходных зон на научно - исследовательском судне «17 съезд профсоюзов» водоизмещением 5000 т; при проведении научных и производственных работ в районе Штокмановского месторождения в Баренцевом море, при проведении поисково-разведочной гравиметрической съемки Ахтанизовских лиманов Приазовья по заказу Министерства геологии РФ 1999 г. на катере типа «Бриз» водоизмещением 10 т.; при проведении гравиразведочных работ в районах Северного и Центрального Каспия по заказу Министерства природных ресурсов РФ в 2000г. на судне «Тантал» водоизмещением 300 т.; при проведении гравиразведочных работ в районе Центрального Каспия по заказу Министерства природных ресурсов РФ и ООО «Лукойл-Астраханьнефть» в 2001г. на судне СР-933 водоизмещением 2000 т.; при проведении гравиразведочных работ в районе Северного Каспия и дельте реки Волги по заказу Министерства природных ресурсов РФ в 2002г. на судне «Колонок» водоизмещением 100 т, при проведении научных гравиметрических работ с борта самолета АН 30Д в районе Ладожского озера. На набортный гравиметрический комплекс «ГРИН» получен сертификат соответствия № 0000419, выданный ГП «ВНИИФТРИ» Госстандарта РФ, который зарегистрирован в Реестре Системы сертификации средств измерений под № 000080070.

В реальных условиях эксплуатации гравиинерциальных измерительных систем функция распределения возмущений заранее неизвестна и её параметры изменяются. Таким образом, имеет место априорная и текущая неопределенность в описании модели внешних возмущений. В этих условиях повышение точности возможно за счёт использования самонастраивающихся систем, в которых для восполнения недостающей информации о возмущениях активно используется текущая информация. Следовательно, наиболее целесообразное решение проблемы повышения точности гравиинерциальных измерительных систем связано с использованием принципа самонастройки.



а

б

Рис. 10. Малогабаритные гравиметрические комплексы: а – «ГРИН»; б – «ГРИН-М»

Разработаны и исследованы математические модели схем акселерометрической коррекции индикаторного ГС морского гравиметра с самонастройкой параметров. Сигнал с выхода датчиков ГС (двух акселерометров и датчика угловой скорости, ось чувствительности которого перпендикулярна плоскости стабилизируемой площадки с гравиметром) подается на вход устройств измерения спектра, характеристики которых определяются интегральным преобразованием Фурье временного сигнала в его частотный спектр. В спектре определяются частоты качки, где спектр имеет преобладающее значение амплитуды. В соответствии с полученными значениями частот качки управляющее устройство изменяет параметры дополнительных динамических звеньев контура коррекции таким образом, чтобы обеспечить фазовый сдвиг между горизонтальными ускорениями и отклонением платформы точно равным -270 град на преобладающих частотах качки. Исследованы различные структурные решения построения схем акселерометрической коррекции с самонастройкой параметров, в которых в каждом из двух каналов системы в качестве звеньев с постоянными параметрами применена комбинация колебательного и изодромного звеньев, а в качестве дополнительных динамических звеньев с переменными параметрами рассмотрены варианты применения аperiodического звена (с одним переменным параметром), интегро - дифференцирующего звена (с двумя переменными параметрами) и комбинации четырех интегро – дифференцирующих звеньев (с восемью переменными параметрами (рис.11)). Сформулированы соответствующие критерии самонастройки, позволяющие однозначно определить переменные параметры дополнительных динамических звеньев в соответствии с текущими значениями преобладающих частот качки и постоянными параметрами системы. Предлагаемые схемы акселерометрической коррекции обеспечивают отсутствие погрешности $\langle \delta g_1 \rangle$ ($\langle \delta g_1 \rangle$ – среднее за период качки значение погрешности гравиметра из-за ускорений и наклонов стабилизированной площадки) на преобладающих частотах качки, пренебрежимо малое значение погрешности $\langle \delta g_2 \rangle$ ($\langle \delta g_2 \rangle$ – среднее за период качки значение погрешности гравиметра, обусловленное наклонами стабилизированной площадки), отсутствие погрешности по скорости, статической погрешности из-за постоянных возмущающих моментов, действующих по оси прецессии гироскопа и малое время переходного процесса. Важно то, что предлагаемый подход в случае применения комбинации четырех интегро – дифференцирующих звеньев (с восемью переменными параметрами) обеспечивает отсутствие систематических погрешностей гиросtabilизированного гравиметра от составляющих горизонтального ускорения с различными значениями преобладающей частоты качки, обусловленных линейными ускорениями орбитального движения центра тяжести корабля, рысканием и наличием хода корабля, рысканием, бортовой качкой, килевой качкой при установке гравиметра на некотором расстоянии от центра тяжести корабля в условиях изменяющейся нерегулярной качки корабля. Кроме того, обеспечены минимальные значения погрешности измерения

$\langle \delta g_1 \rangle$ при изменении преобладающей частоты качки, в течении интервала времени, необходимого для самонастройки устройства системы коррекции и неточности при определении истинного значения преобладающей частоты качки.

Преобладающая частота составляющих результирующего горизонтального ускорения качки, обусловленных рысканием корабля и составляющей, обусловленной рысканием и наличием хода корабля, лежит в низкочастотной области. Погрешности измерения ускорения силы тяжести на этой частоте превалируют. Расчеты подтвердили высокую эффективность применения акселерометрической коррекции с самонастройкой параметров.

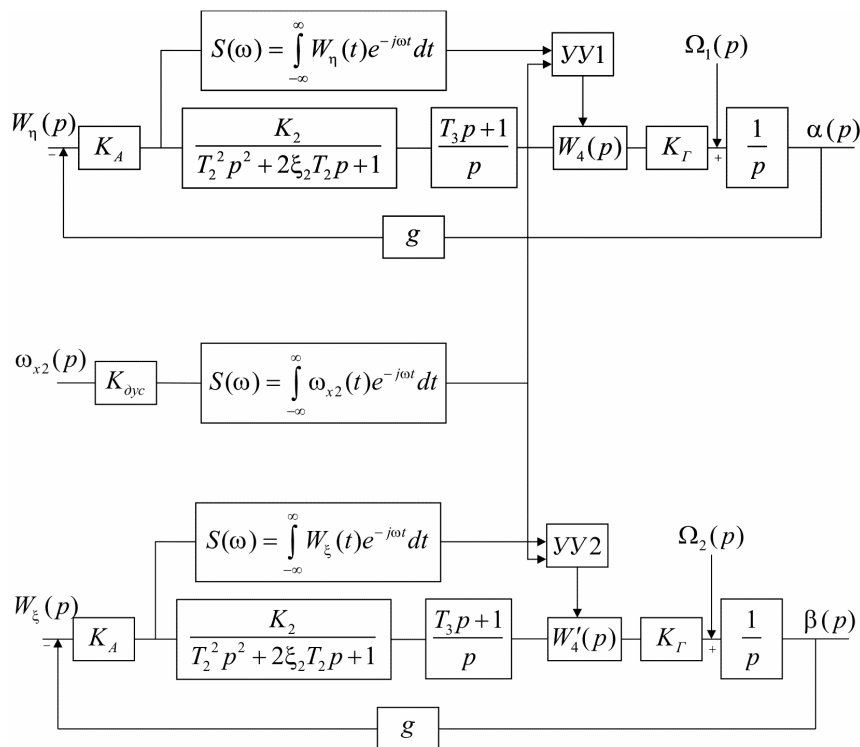


Рис. 11. Структурная схема системы коррекции ГСП морского гравиметра с самонастройкой параметров: $\alpha(p), \beta(p)$ – погрешность стабилизации по первому и второму каналам системы соответственно; ω_{x2} – абсолютная угловая скорость стабилизированной площадки относительно оси перпендикулярной ее плоскости; W_η, W_ξ – горизонтальные ускорения качки,

K_A – коэффициент передачи акселерометра; K_γ – коэффициент передачи гироскопа по управляющему воздействию; g – ускорение силы тяжести; T_2, T_3, K_2, ξ_2 – параметры корректирующего устройства

СК, $\Omega_1(p), \Omega_2(p)$ – угловые скорости системы отсчета по первому и второму каналам СК, $K_{\delta yc}$ – коэффициент передачи датчика угловой скорости

Систематическая составляющая погрешности измерения ускорения силы тяжести из - за совместного влияния составляющей горизонтального ускорения, обусловленной рысканием корабля и наклоном гиростабилизированной платформы в случае нерегулярной качки равна $-0,000337$ мГал. Систематическая составляющая погрешности измерения ускорения силы тяжести из - за совместного влияния составляющей горизонтального ускорения, обусловленной рысканием и наличием хода корабля и наклоном гиростабилизированной платформы равна $-0,058$ мГал. Полученные значения погрешностей соответствуют перспективным показателям точности.

Разработан алгоритм цифрового управления гиростабилизированной платформой с самонастройкой параметров контура коррекции и технология цифровой реализации адаптивной схемы акселерометрической коррекции ГС гравиметрического комплекса. В системе применен вычислитель спектра, который не требует больших информационных ресурсов. Информация о значениях преобладающих частот качки имеется по завершении каждого интервала наблюдения. Реализована автоматическая процедура определения момента времени перенастройки параметров. Для автоматического определения необходимого момента времени перенастройки параметров дополнительных динамических звеньев вводятся пороговые условия. При условии, что новое значение преобладающей частоты больше или меньше на заданную величину предыдущего значения, происходит перенастройка параметров дополнительных динамических звеньев.

V. Гиростабилизаторы

Оптико - электронные системы, применяемые на борту ПО, работают, как правило, в составе управляемых ГС [21, 22]. ГС могут быть построены с использованием трехстепенных гироскопов с кардановым и сферическим шарикоподшипниковым подвесом, динамически - настраиваемых и волоконно - оптических гироскопов, а также на базе ММГ и ММА [23, 24, 25] (рис.12, табл.5).

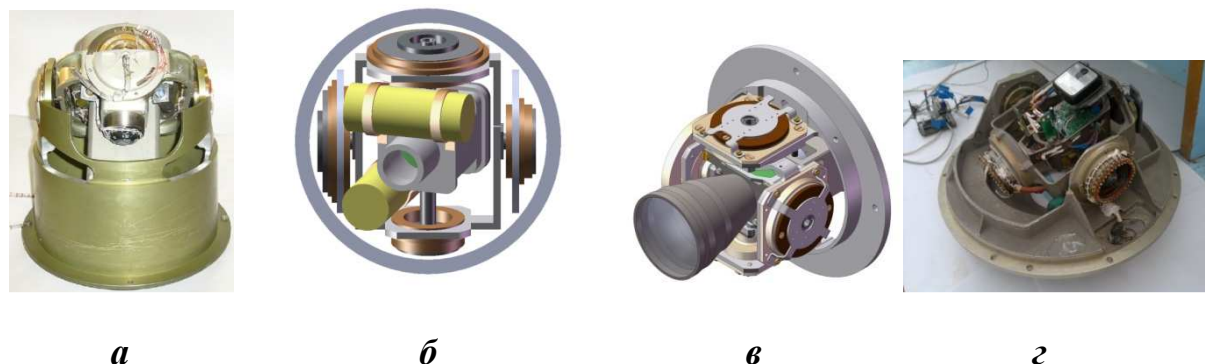


Рис. 12. Двухосные индикаторные гиростабилизаторы оптической аппаратуры: а – на трехстепенном астатическом гироскопе; б – 3D-модель ГС на ВОГ; в – 3D-модель ГС на ДНГ; г – ГС на ММГ и ММА

Таблица 5

Технические характеристики ГС

Чувствительный элемент	Диаметр, длина, мм	Масса ГС и полезной нагрузки, кг	Погрешность стабилизации
3х-степенной гироскоп в кардановом подвесе	200*210	6,0	Менее 1 угл. мин
ВОГ	116*86	0,78	Менее 1 угл. мин
ДНГ	116*90	1,3	Менее 1 угл. мин
ММГ и ММА	240	2	Менее 1, 5 угл.мин

Выводы

Достигнутые технические характеристики приборов и систем, разработанных на кафедре Приборы управления Тульского государственного университета, описание которых приведено в работе, позволяют использовать их для эффективного решения задач ориентации, стабилизации и управления.

Работа (в части гравиметрические комплексы) выполнена при финансовой поддержке РФФИ. Грант №17-08-00434 А.

Список литературы

1. Бортовые приборы вращающихся по крену летательных аппаратов / В.И. Бабичев, В.И. Горин, В.Д. Дудка, В.В. Кирилин, Д.М. Малютин, В.Я. Распопов, В.Я. Филимонов // Гироскопия и навигация, 2007. №1(56). С. 36-46.
2. Состояние и развитие высокоточного оружия сухопутных войск РФ / В.И. Бабичев, М.В. Грязев, В.В. Игнатов, В.П. Танаев, А.В. Шигин // Материалы Всероссийской научно – практической конференции, посвященной памяти В.П. Грязева. Тула: Изд-во ТулГУ, 2015. С. 31-42.
3. Бабичев В.И., Грязев М.В. Разработка бортовых гироскопов противотанковых управляемых артиллерийских снарядов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки, 2017. Вып. 9. Ч. 2. С. 9-18.
4. Горин В.И., Распопов В.Я. Научные разработки конструкций бортовых гироскопов с импульсными гиросмоторами // Оборонная техника. 1995. №6. С.44-50.
5. Горин В.И., Распопов В.Я. Гироскоординаторы вращающихся по крену ракет / под ред. В.Я. Распопова. М: НТЦ «Информтехника», 1996. 151 с.

6. Распопов В.Я. Микромеханические приборы. М.: Машиностроение, 2007. 401с.
7. Распопов В.Я. Гироприборы и системы управляемых ракет ближней тактической зоны. Монография. Тула: Изд-во ТулГУ, 2013. 248с.
8. Матвеев В.В., Распопов В.Я. Приборы и системы ориентации, стабилизации и навигации на МЭМС - датчиках / Тула: Изд-во ТулГУ, 2017. 224с.
9. Белобрагин В.Н., Зайцев В.Д., Распопов В.Я. Опыт разработки гироприборов для вращающихся по крену изделий // Гироскопия и навигация. 2005. №4. С.57-72.
10. Белобрагин В.Н., Горин В.И., Распопов В.Я. Измерители угловых параметров летательного аппарата на базе гироскопов с вращающимся подвесом // Датчики и системы. 2005. №2. С.7-10.
11. Лукьянов Д.П., Распопов В.Я., Филатов Ю.В. Прикладная теория гироскопов: учебник. Санкт-Петербург: Государственный научный центр Российской Федерации «ОАО Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2015. 355 с.
12. Распопов В.Я. Гироскопы с шарикоподшипниковым подвесом.- Тула: ТулГУ, 2003. 176 с.
13. Системы позиционирования / Р.В. Алалуев, Ю.В. Иванов, Д.М. Малютин, В.В. Матвеев, М.Г. Погорелов, В.Я. Распопов, А.П. Шведов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2016. Вып. 10. С. 233-238.
14. Микросистемы ориентации / В.Я. Распопов, В.В. Матвеев, А.П. Шведов, М.Г. Погорелов, М.В. Рябцев, Р.В. Алалуев, А.В. Ладонкин, В.М. Глаголев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки, 2016. Вып. 10. С.239-265.
15. Микросистемы ориентации беспилотных летательных аппаратов / под ред. В.Я. Распопова. М.: Машиностроение, 2011. 184 с.
16. Кухарь В.Д., Распопов В.Я. Системы ориентации для малоразмерных летательных аппаратов / Новый оборонный заказ. Стратегии. Санкт-Петербург: ООО «Дефанс Медиа», 2011. №4(16). С. 81-84.
17. Распопов В.Я. Микросистемная авионика. Гриф и К, 2010. 247с.
18. Матвеев В.В., Распопов В.Я. Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем: учеб. пособие / под общей редакцией В.Я. Распопова. Санкт-Петербург: Государственный научный центр Российской Федерации «ОАО Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2009. 278 с.
19. Малютин Д.М., Распопов В.Я. Исследование динамики гиростабилизатора морского гравиметра с самонастройкой параметров / Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Вып. 9. Ч. 2 . 2017. С.96-104.

20. Малютин Д.М. Алгоритм цифрового управления гиросtabilизированной платформой морского гравиметра с самонастройкой параметров // Известия Тульского государственного университета. Технические науки, 2017. Вып. 9. Ч. 2. С. 88-95.

21. Распопов В.Я. Теория гироскопических систем. Гиросtabilизаторы: учеб. пособие. Тула; Изд-во ТулГУ. 2016. 386 с.

22. Малютин Д.М., Телухин С.В., Распопов В.Я. Гиросtabilизаторы оптической аппаратуры / Известия Тульского государственного университета. Технические науки, 2016. Вып. 10. С. 290-300.

23. Малютин Д.М. Система стабилизации и управления на волоконно – оптических гироскопах / Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2014. №5. С.121-125.

24. Малютин Д.М. Система стабилизации полезной нагрузки на динамически настраиваемом гироскопе / Приборы и методы измерений. 2016. Т7. №1. С.32-23.

25. Малютин Д.М., Малютина М.Д., Филин И.В. Индикаторный гиросtabilизатор на микромеханических гироскопах // Инженерный журнал. Справочник. №1 (166) с Приложением. 2011. С.44-53.

Распопов Владимир Яковлевич, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой, tgu-ru@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Малютин Дмитрий Михайлович, канд. техн. наук, доц., tgu-ru@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

MEASURING INSTRUMENTS AND SYSTEMS FOR ORIENTATION, STABILIZATION AND CONTROL

V.Ya. Raspopov, D.M. Malyutin

The results of theoretical and experimental design work in the field of applied gyroscope performed by the staff of the Department "control Devices" of the Institute of high-precision systems. V. P. Gryazev, Tula state University. Characteristics of inertial devices (accelerometers, gyroscopes) and measuring and control systems based on them for useful load stabilization, determination of angular coordinates and navigation parameters of objects of different basing are considered.

Key words: gyroscope, accelerometer, gyrostabilizer.

Raspopov Vladimir Yakovlevich, doctor of technical sciences, professor, head of chair, tgu-ru@yandex.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Malyutin Dmitry Mikhailovich, candidate technical sciences, docent, tgu-ru@yandex.ru Russia, Tula, Tula State University

ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕРФЕРОМЕТРА МАЙКЕЛЬСОНА С КОГЕРЕНТНО-ОГРАНИЧЕННЫМ ИСТОЧНИКОМ ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ДИФФУЗНО ОТРАЖАЮЩИХ ОБЪЕКТОВ

Е.Е. Майоров, А.Ч. Машек, Г.А. Цыганкова, А.А. Поликарпова,
А.А. Константинова, М.В. Хохлова

В настоящей работе показано влияние спекл-структуры на формирование интерференционного сигнала прибора. Приведена оптическая схема измерительного интерференционного прибора на основе интерферометра Майкельсона. Выведено аналитическое выражение для амплитуды выходного сигнала в зависимости от параметров оптической схемы и геометрии освещения. Выявлена зависимость амплитуды сигнала от количества спеклов в эффективной апертуре фотоприемника. Полученные формулы позволяют оценивать амплитуду сигнала при функционировании измерительной системы, а также при изменении параметров оптической схемы интерферометра.

Ключевые слова: интерферометр Майкельсона, когерентно-ограниченный источник, диффузно отражающий объект, спекл, светоделиитель, фотоприёмник.

Получение высокоточной и достоверной информации о геометрических параметрах поверхности объектов всегда являлось важной задачей метрологии. В настоящее время для решения указанной задачи существует широкий класс методов и технических средств, которые подразделяются на контактные и бесконтактные [1 – 4, 8 – 12].

Контактные методы реализуются в различных конструкциях механических приборов. В настоящее время ведущие фирмы-производители оптико-механических приборов, такие, как Carl Zeiss, Renishaw, производят контактные приборы, позволяющие измерять рельеф поверхности с точностью до 1,0-0,1 мкм.

Основными недостатками контактных методов являются низкая производительность, требование хорошей виброзащиты, относительно быстрый износ щупового элемента [2 – 6, 9 – 16]. Кроме того, использование контактных методов измерений может оказать негативное влияние на объекты с малой устойчивостью к механическому воздействию. Поэтому на использование контактных методов накладывается ограничение по классу контролируемых объектов. Также контактные методы не пригодны для решения динамических задач.

Указанные недостатки исключаются применением бесконтактных методов контроля. Важное место среди них занимают оптические методы.

Оптические методы измерений рельефа поверхности и работа соответствующих приборов основаны на анализе светового излучения, отраженного от контролируемой поверхности [3 – 7, 10 – 16]. Анализ литературных данных показал, что наиболее перспективными в этом классе приборов являются интерферометрические бесконтактные приборы и систе-

мы, в которых используются источники излучения с ограниченной длиной временной когерентности [10 – 16]. Это направление в оптическом приборостроении относительно новое и интенсивно развивается лишь в последние 10 - 12 лет. Приборы указанного типа имеют ряд преимуществ по сравнению с аналогичными устройствами геометрической оптики, а именно: точность, диапазон измерений, а также расстояние до контролируемой поверхности не зависят от апертурных углов освещения и наблюдения.

Поэтому исследование интерферометра Майкельсона с когерентно-ограниченным источником излучения для контроля диффузно отражающих объектов является актуальной задачей для оптического приборостроения.

Спекл-структура и ее влияние на формирование интерференционного сигнала. При освещении диффузной поверхности лазерным излучением в отраженном свете наблюдается картина спеклов [1, 11, 17]. Рассмотрим схему, представленную на рис. 1. Каждая точка освещенной поверхности рассеивает некоторое количество света в направлении экрана. Вследствие высокой пространственной и временной когерентности лазерного излучения световые волны, рассеянные всеми точками поверхности, также когерентны. В результате сложения элементарных волн на экране наблюдается интерференционная картина – хаотическое чередование светлых и темных пятен, называемых спеклами. Существование такой картины есть результат сложения всех рассеянных элементарных волн с учетом разности фаз, обусловленной случайной вариацией микрорельефа поверхности.

В работах [2, 12, 17] рассчитаны основные статистические свойства спекл-картин при условии, что: амплитуда и фаза каждой отдельной световой волны статистически независимы; фазы всех волн равномерно распределены по значениям в интервале от $-\pi$ до π .

Как показано в [2, 12, 17], распределение освещенности подчиняется следующему закону:

$$p(I) = \frac{1}{\langle I \rangle} \exp\left(-\frac{I}{\langle I \rangle}\right), \quad (1)$$

где $p(I)$ – плотность вероятности освещенности I ; $\langle I \rangle$ – средняя освещенность.

Свойства спекл-картины зависят от способа ее образования. В соответствии с введенной Д.Габором терминологией [3, 8, 15] спекл-картину, наблюдаемую на некотором расстоянии от диффузно рассеивающей поверхности, как показано на рис. 1, называют объективной (в отличие от субъективной, формируемой в плоскости изображения оптической системы).

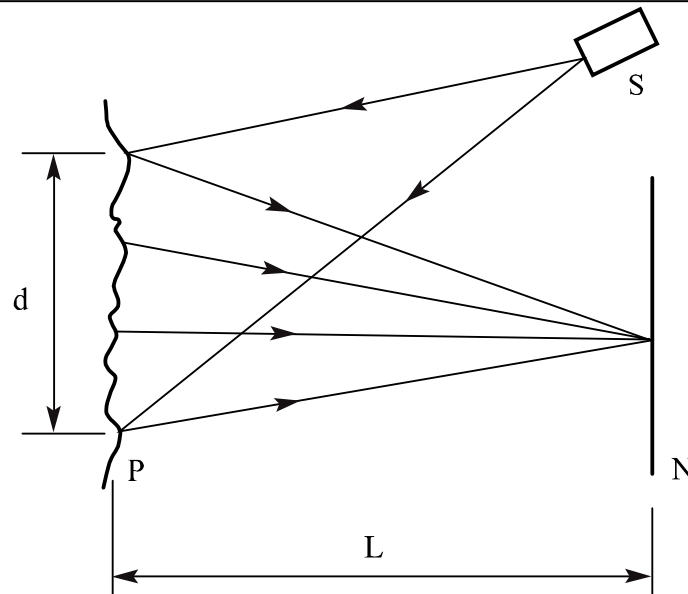


Рис. 1. Схема получения спекл-структуры при отражении от диффузной поверхности: S – источник когерентного излучения; P – диффузная поверхность; N – плоскость наблюдения

Функция автокорреляции для объективной спекл-картины, возникающей при однородном освещении области поверхности диаметром d , имеет вид

$$R_I(x, y) = \langle I \rangle^2 \left[1 + \text{sinc}^2 \frac{dx}{\lambda L} \text{sinc}^2 \frac{dy}{\lambda L} \right], \quad (2)$$

где $R_I(x, y)$ – функция автокорреляции интенсивности I спекл-картины в плоскости наблюдения x, y , L – расстояние от рассеивающей поверхности до плоскости наблюдения. λ – длина волны излучения.

Ширина функции автокорреляции совпадает с расстоянием между точками с максимальной и минимальной интенсивностями. Это расстояние принимается за характерный размер элемента спекл-картины, называемого индивидуальным спеклом. Из (2) следует, что

$$b_s = 1,22 \frac{\lambda L}{d}, \quad (3)$$

где b_s – характерный размер индивидуального спекла.

Рассмотренные свойства спекл-полей являются ключевыми при исследовании характеристик когерентно-ограниченных систем контроля поверхностей.

Интерферометр Майкельсона для контроля геометрических параметров поверхности с использованием когерентно-ограниченного излучения. Метод контроля геометрических параметров поверхности с использованием когерентно-ограниченного излучения основан на явлении двухлучевой интерференции. Оптическая схема интерферометрического прибора представлена на рис. 2.

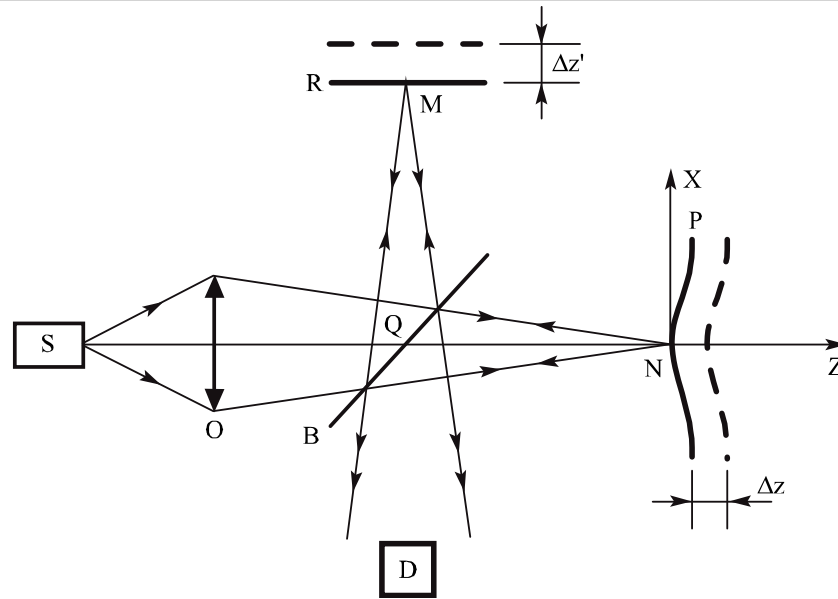


Рис. 2. Оптическая схема интерферометра Майкельсона:
***S* – источник излучения; *O* – объектив; *B* – светоделитель;**
***R* – опорное зеркало; *P* – поверхность объекта; *D* – фотоприемник.**

Излучение источника *S* фокусируется на поверхность опорного зеркала и на плоскость $z = 0$, являющуюся мнимым изображением опорного зеркала в светоделителе. Примем за исходное состояние интерферометра такое, при котором зондируемая точка поверхности объекта лежит в плоскости мнимого изображения опорного зеркала. Исходное состояние характеризуется равенством оптических длин плеч *QN* и *QM*. Поверхность объекта и поверхность опорного зеркала находятся в идентичных условиях освещения: излучение источника *S* одновременно фокусируется на обе поверхности. В исходном состоянии разность хода интерферирующих пучков равна нулю, интерференционная картина на выходе интерферометра имеет максимальный контраст.

При выходе из исходного состояния анализируемая точка поверхности смещается из плоскости $z = 0$ на величину Δz . Это может произойти двумя путями: в результате продольного смещения объекта вдоль оси *Z*, либо вследствие относительного поперечного перемещения контролируемой поверхности и зондирующего луча. Однако в любом случае возврат в исходное состояние может быть осуществлен компенсационным смещением опорного зеркала на величину $\Delta z' = \Delta z$: равенство оптических длин плеч интерферометра и нулевая разность хода восстанавливаются.

На выходе интерферометра в плоскости анализа, в которой находится фотоприемник *D*, световой поток представлен суперпозицией двух волн – объектной и опорной. Пусть компенсационное перемещение опорного зеркала происходит с постоянной линейной скоростью, равной *v*. Это приведет к линейному изменению во времени разности фаз ϕ интерферирующих волн:

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} 2vt, \quad (4)$$

где λ – длина волны излучения, $2vt = 2\Delta z'$ – изменение оптической разности хода во времени при смещении опорного зеркала на величину $\Delta z'$.

В соответствии с [8, 17] и (4) выражение для изменяющейся во времени интенсивности светового потока на выходе интерферометра можно записать в виде

$$I(t) = I_p + I_r + 2\sqrt{I_p I_r} |\gamma_{pr}(t)| \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda} vt\right), \quad (5)$$

где I_p – интенсивность объектного светового пучка, I_r – интенсивность опорного пучка.

Для режима линейного преобразования светового потока в электрический сигнал на рис. 3. представлена временная зависимость выходного сигнала фотоприемника $u(t)$, рассчитанная по формуле (5). При расчете использовалась следующая спектральная характеристика источника излучения:

$$F(\nu) = F_o \exp\left(-\frac{\nu - \nu_o}{\Delta\nu}\right)^2,$$

где ν , ν_o , $\Delta\nu$ – соответственно частота, средняя частота и ширина спектра излучения.

При этом функция степени когерентности имеет вид [4, 8, 17]

$$\gamma_{pr}(t) = \exp\left[-\frac{2\nu(t - t_m)}{l_c}\right]^2. \quad (6)$$

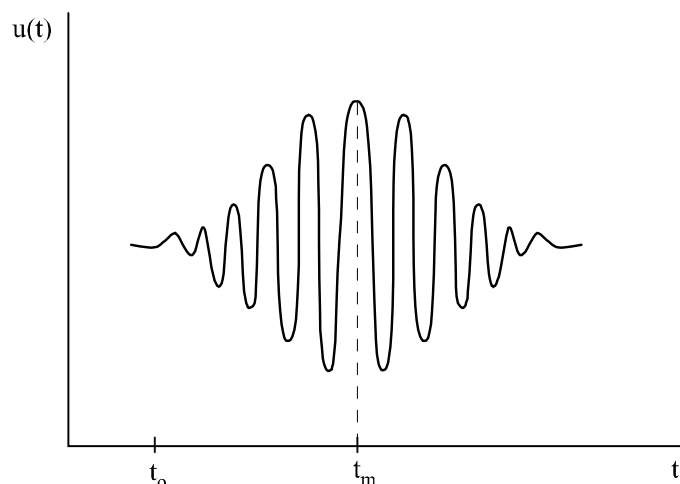


Рис. 3. Выходной интерференционный сигнал

Из графика видно, что относительно медленное изменение амплитуды выходного сигнала промодулировано высокочастотной косинусоидальной функцией с периодом $T = \lambda/2\nu$. Максимум огибающей сигнала, как отмечено ранее, соответствует моменту времени t_m , при котором $\Delta z = \Delta z'$. При идентифицированной точке начала отсчета t_0 перемещения опорного

зеркала определение искомой величины $\Delta z_i = f(x_i, y_i)$ сводится к измерению соответствующих временных интервалов $[t_o, t_{mi}]$, где индекс i характеризует некоторую точку плоскости X, Y .

Амплитуда интерференционного сигнала. Важнейшим вопросом анализа функционирования рассматриваемых систем является вопрос формирования выходного интерференционного сигнала. Выходной сигнал интерферометрической системы в общем случае определяется интегралом интерференционной составляющей интенсивности (5) по эффективной апертуре Ω фотоприемника:

$$u(t) = k \iint_{\Omega} (I_p I_r)^{1/2} |\gamma_{pr}(t)| \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} 2vt\right) d\omega, \quad (7)$$

где $u(t)$ – выходной сигнал, I_p – интенсивность объектного светового пучка, I_r – интенсивность опорного пучка, k – коэффициент трансформации светового потока в электрический сигнал, $d\omega$ – элемент апертуры.

Анализ выходного сигнала производится по его огибающей. Для нахождения последней в подынтегральном выражении осциллирующий сомножитель необходимо положить равным единице.

Поэтому

$$U(t) = k \iint_{\Omega} (I_p I_r)^{1/2} |\gamma_{pr}(t)| d\omega, \quad (8)$$

где $U(t)$ – огибающая выходного сигнала.

Величина I_p есть распределение интенсивности спекл-картины в плоскости анализа. Величина I_r – интенсивность опорной волны с регулярным фронтом. Поэтому интерференционная картина представляет собой результат суперпозиции спекл-поля объектной волны и регулярного фронта опорной волны. В этом случае, как показано в [5, 8, 11, 17], интерференционное поле также имеет вид спекл-структурированной картины, однако, с удвоенным размером индивидуального спекла b_s :

$$b_s = 2,44 \frac{\lambda L}{d}, \quad (9)$$

где L – расстояние от поверхности до плоскости наблюдения; d – размер освещенного участка поверхности.

Входящая в подынтегральное выражение функция $I_p = I_p(x, y)$ описывает распределение интенсивности спекл-картины в плоскости наблюдения и имеет случайный характер как функция освещенного участка поверхности объекта. Однако для каждого фиксированного освещенного участка поверхности $I_p(x, y)$ представляет собой ансамбль ограниченного числа отдельных спеклов. Поэтому для расчета усредненной величины огибающей выходного сигнала операцию интегрирования заменим суммированием средних интенсивностей отдельных спеклов [6 – 8, 17].

С этой целью рассмотрим фрагмент объектного канала оптической схемы интерферометра (рис. 2), представленный на рис. 4. При использовании излучения с ограниченной когерентностью размер зондирующего пятна d для данной схемы можно определить из следующего выражения [4, 7 – 10, 17]:

$$I'_p(x, y) = I_s(x', y') \otimes \left[f(x, y) + \frac{\lambda}{2\pi l_c} g(x, y) \right], \quad (10)$$

где $I'_p(x, y)$ – распределение интенсивности в плоскости изображения светового пятна на поверхности объекта; $I_s(x', y')$ – распределение интенсивности в плоскости источника; λ – средняя длина волны излучения; l_c – длина когерентности; $\otimes$ – операция свертки.

В выражении (10) $f(x, y)$ и $g(x, y)$ представляют собой интегральные функции, рассмотренные в [7 – 10, 17]. Функция $f(x, y)$ описывает дифракционное изображение точечного источника для строго монохроматического света. Функция $g(x, y)$ учитывает ограничение длины когерентности излучения. Функция $f(x, y)$ отражает влияние конечных размеров изображающей системы O , которое сводится к тому, что каждая точка в плоскости изображения расширяется в пятно величиной

$$\Delta = 1,22 \frac{\lambda L_o}{D_o}, \quad (11)$$

где: L_o – расстояние от объектива до поверхности объекта (плоскости изображения); D_o – диаметр объектива.

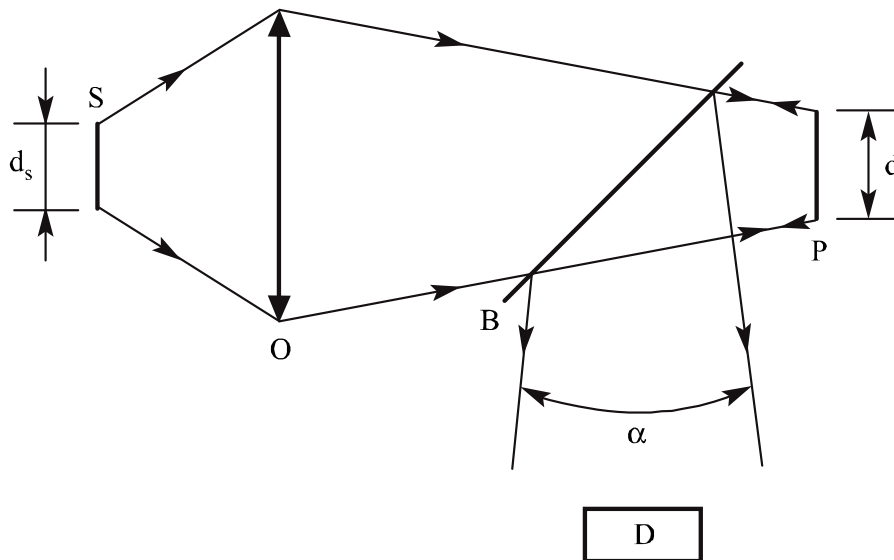


Рис. 4. К расчету амплитуды выходного сигнала:
S – источник излучения; O – объектив; B – светоделиватель;
P – поверхность объекта; D – фотоприемник

Анализ функции $g(x, y)$ проведен в [7 – 10, 17]. Из приведенных в этой работе численных расчетов следует, что для практически интересного случая – $l_c > 4\lambda$ – величина $(\lambda/2\pi l_c) g(x, y)$ составляет 2% от максимального значения $f(x, y)$. Поэтому, пренебрегая вторым слагаемым в квадратных скобках (10), с учетом (11) выражение для величины светового пятна на поверхности объекта запишем в виде

$$d = \beta d_s + 1,22 \frac{\lambda L_o}{D_o}, \quad (12)$$

где: d – диаметр пятна; d_s – линейный размер светящегося тела источника излучения; β – масштаб изображения.

Используя (9) и (12) для размера индивидуального спекла получим

$$b_s = 2,44 \frac{\lambda L}{\beta d_s + 1,22 \frac{\lambda L_o}{D_o}}. \quad (13)$$

Найдем количество спеклов N_s в эффективной угловой апертуре α фотоприемника (рис. 4):

$$N_s = \frac{L^2 \alpha^2}{b_s^2}. \quad (14)$$

Изменение интенсивности отдельного спекла во времени есть периодическое колебание со случайной фазой. Будем считать амплитуды интенсивностей отдельных спеклов равными. При сложении N колебаний с равными амплитудами A , фазы которых равномерно распределены в промежутке от $-\pi$ до π , результирующая амплитуда U имеет вид [8, 17]

$$U = \sqrt{\frac{N}{2}} A. \quad (15)$$

После подстановки (13) и (14) в (15) получим следующее выражение для усредненной по ансамблю реализаций огибающей выходного сигнала $\langle U(t) \rangle$:

$$\langle U(t) \rangle = \frac{0,61}{\sqrt{2}} \frac{k\pi L^2 \alpha \lambda \sqrt{\langle I_p \rangle I_r}}{\beta d_s + 1,22 \frac{\lambda L_o}{D_o}} |\gamma_{pr}(t)|, \quad (16)$$

Входящая в (16) величина $\langle I_p \rangle$ – усредненная по возможным реализациям спекл-картин интенсивность объектной волны – определяется мощностью источника излучения и отражающими свойствами поверхности объекта.

Поскольку компенсационное перемещение опорного зеркала $\Delta z'$ связано со временем линейной зависимостью

$$\Delta z' = vt,$$

где v – скорость движения опорного зеркала.

Выражение (16) отражает изменение амплитуды выходного сигнала при смещении опорного зеркала. Перепишем формулу (16) с учетом (13) и (14) в следующем виде:

$$\langle U(t) \rangle = \frac{0,61 k\pi L^2 \alpha^2 \sqrt{\langle I_p \rangle I_r}}{\sqrt{2 N_s}} |\gamma_{pr}(t)|. \quad (16a)$$

Из полученного выражения следует практически важный вывод: амплитуда выходного сигнала обратно пропорциональна $\sqrt{N_s}$ – количеству отдельных спеклов в эффективной апертуре фотоприемника

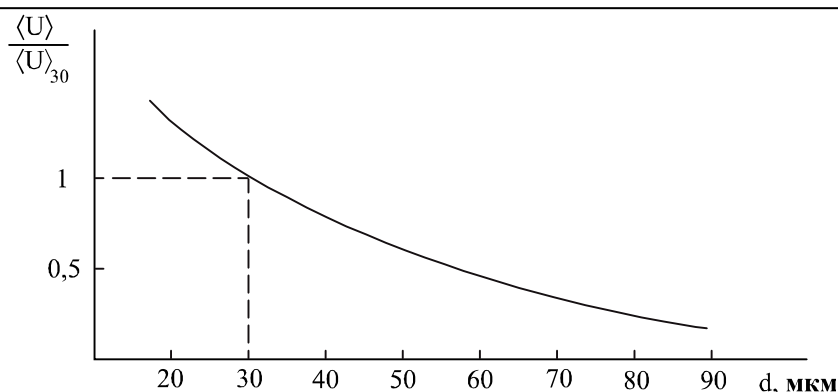


Рис. 5. Зависимость усредненной амплитуды выходного сигнала от расфокусировки зондирующего пятна: $\langle U \rangle_{30}$ - амплитуда при $d = 30$ мкм

Наибольший практический интерес представляет зависимость амплитуды выходного сигнала от расфокусировки зондирующего пятна. Чем больше размер пятна, тем большее количество отдельных спеклов участвует в формировании выходного сигнала, и тем меньше его амплитуда. На рис. 5 показана рассчитанная по (16) зависимость относительной амплитуды огибающей ($|\gamma_{pt}(t)| = 1$) от диаметра зондирующего пятна. Полученное аналитическое выражение (16) дает возможность оценивать амплитуду выходного сигнала при функционировании интерферометрической системы, а также при изменении параметров оптической схемы интерферометра.

Список литературы

1. Франсон М. Оптика спеклов // Пер. с франц. под ред. проф. Ю.И.Островского. М.: Мир, 1980. 171 с.
2. Goodman F.W. Laser speckle and related phenomena // Springer-Verlag, 1975. P. 9 – 75.
3. Клименко Н.С. Голография сфокусированных изображений и спекл-интерферометрия. М.: Наука, 1985. 224 с.
4. Кольер Р., Беркхарт К., Лин Л. Оптическая голография. // пер. с англ. под ред. Ю.И.Островского. М.: Мир, 1973. 686 с.
5. Ennos A.E. Laser speckle and related phenomena // Springer-Verlag, 1975. P. 203 – 253.
6. Ахманов С.А., Дьяков Ю.Е., Чиркин А.С. Введение в статистическую радиофизику и оптику. М.: Наука, 1981. 640 с.
7. Франсон М., Сланский С. Когерентность в оптике // пер. с франц. под ред. Шифрина К.С. М.: Наука, 1967. 80 с.
8. Майоров Е.Е., Прокопенко В.Т. Интерферометрия диффузно отражающих объектов. СПб.: НИУ ИТМО, 2014. 195 с.

9. Майоров Е.Е., Прокопенко В.Т., Шерстобитова А.С. Исследование оптико-электронной системы расшифровки голографических интерферограмм // Оптический журнал, 2013. Т80. №3. С. 47 – 51.

10. Майоров Е.Е., Прокопенко В.Т. Исследование напряженно-деформированной поверхности объектов методом голографической интерферометрии // Научное обозрение, 2013. №1. С. 43 – 46.

11. Майоров Е.Е., Прокопенко В.Т. Исследование влияния спекл-структуры на формирование интерференционного сигнала и погрешность измерений // Научное приборостроение, 2013. Т. 23. №2. С. 38 – 46.

12. Майоров Е.Е. Метод устранения влияния декорреляции спекл-полей на точность измерений и динамический диапазон интерференционного сигнала // Научное обозрение, 2013. №9. С. 329 – 332.

13. Майоров Е.Е. Измерение смещений диффузно отражающих поверхностей вне плоскости системой обработки голографических интерферограмм // Научное обозрение, 2013. №12. С. 190 – 195.

14. Майоров Е.Е., Машек А.Ч., Удахина С.В., Цыганкова Г.А., Хайдаров Г.Г., Черняк Т.А. Разработка компьютерной интерференционной системы контроля негладких поверхностей // Приборы, 2015. №11 (185). С. 26 – 31.

15. Прокопенко В.Т., Майоров Е.Е., Машек А.Ч., Удахина С.В., Цыганкова Г.А., Хайдаров А.Г., Черняк Т.А. Оптико-электронный прибор для контроля геометрических параметров диффузно отражающих объектов// Известия высших учебных заведений. Приборостроение, 2016. Т. 59. № 5. С. 388 – 394.

16. Прокопенко В.Т., Майоров Е.Е., Машек А.Ч., Цыганкова Г.А., Абрамян В.К., Зайцев Ю.Е., Хайдаров А.Г., Хайдаров Г.Г. Применение поперечно-сдвиговой интерферометрии в голографии для контроля геометрических параметров диффузно отражающих поверхностей // Известия высших учебных заведений. Приборостроение, 2017. Т. 60. № 4. С. 331 – 339.

17. Майоров Е.Е., Дагаев А.В., Пономарев С.В., Черняк Т.А. Исследование интерферометра сдвига в фазоизмерительных приборах и системах расшифровки голографических интерферограмм // Научное приборостроение, 2017. Т. 27. № 2. С. 32 – 40.

Майоров Евгений Евгеньевич, канд. тех. наук, доц., зав. кафедрой, majorov_ee@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Университет при Межпарламентской Ассамблее ЕвразЭС,

Машек Александр Чеславович, преподаватель, mashek50@mail.ru, Россия, Пушкин, Военно-морской политехнический институт,

Цыганкова Галина Александровна, канд. физ.-мат. наук, доц., galusinka@mail.ru, Россия, Пушкин, Военно-морской политехнический институт,

Поликарпова Александра Алексеевна, преподаватель, alexandraluzina1961@gmail.com, Россия, Пушкин, Военно-морской политехнический институт,

Константинова Анна Алексеевна, канд. тех. наук, доц., konstantinova.a.a@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военная академия связи им. С.М. Будённого,

Хохлова Марина Владимировна, канд. пед. наук, доц., mvxox@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского

THE STUDY OF MICHELSON INTERFEROMETER WITH COHERENT-LIMITED RADIATION SOURCE FOR CONTROL OF DIFFUSELY REFLECTING OBJECTS

*E. E. Maiorov, A. C. Masek, G. A. Tsygankova, A. A. Polikarpova,
A. A. Konstantinova, M. V. Khokhlova*

In the present work the influence of the speckle structure on the formation of in-conferencing signal device is shown. Optical schematic of measuring in-conferencing device based on the Michelson interferometer is considered. The analytical expression for the amplitude of the output signal depending on the parameters of the optic scheme and illumination geometry is derived. The dependence of the signal amplitude on the number of speckles in the effective aperture of the photodetector is defined. The formulas allow us to estimate the amplitude of the signal in the operation of measurement systems, as well as changing the parameters of the optical scheme, interferometer are obtained.

Key words: Michelson interferometer, coherent-limited source, a diffuse reflective object, speckle, beam splitter, photodetector.

Maiorov Evgeny Evgenievich, candidate of technical sciences, docent, head of chair, majorov_ee@mail.ru, Russia, Saint-Petersburg, University at the inter-parliamentary Assembly of EurAsEC,

Mashek Alexander Cheslavovich, teacher, mashek50@mail.ru, Russia, Pushkin, Naval Polytechnic Institute,

Tsygankova Galina Aleksandrovna, candidate of physical and mathematical sciences, docent, galusinka@mail.ru, Russia, Pushkin, Naval Polytechnic Institute,

Polikarpova Alexandra Alexeevna, teacher, alexandraluzina1961@gmail.com, Russia, Pushkin, Naval Polytechnic Institute,

Konstantinova Anna Alexeevna, candidate of technical sciences, docent, konstantinova.a.a@mail.ru, Russia, Saint-Petersburg, Military Academy of Telecommunications named after. C.M. Budyonny,

Khokhlova Marina Vladimirovna, candidate of pedagogical sciences, docent, mvxox@mail.ru, Russia, Saint-Petersburg, Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМЫ ДЛЯ КОНТРОЛЯ СОСТАВА НЕФТЕГАЗОВОДЯНОЙ СМЕСИ В ТРУБОПРОВОДЕ

И.Н. Войтюк, О.С. Максимова

В статье представлено краткое описание системы для измерения покомпонентного состава нефтегазоводяной смеси в трубопроводе. Рассмотрен принцип работы блока детектирования. Дано полное описание методики и практических работ по испытанию блока детектирования и их результаты. Дано описание испытательного стенда для анализа и сравнения спектрометрических свойств и стабильности счета блоков детектирования.

Ключевые слова: нефтегазоводяная смесь, гамма-излучение, плотность, блок детектирования, случайные и систематические погрешности, стабильность счета импульсов.

На сегодняшний день имеются приборы и методы контроля потока товарной нефти непосредственно в трубопроводе: ультразвуковой, виброакустический, турбинный и т.д., однако они неприменимы в случае нефтегазоводяной смеси.

Исследования, проводимые в рамках данной работы, посвящены решению задачи многофазных бессепарационных измерений производительности нефтяных скважин отдельно по нефти, воде и свободному газу, являющейся актуальной, сложной и до конца не решённой в настоящее время.

Решить эти задачи можно на основе научного, технического и производственного задела, а также опыта эксплуатации многофазных расходомеров, имеющегося в ООО «ЛУКОЙЛ-Коми» и ООО «Комплекс-ресурс».

Этот опыт накоплен в основном в ходе изготовления, внедрения в эксплуатацию и эксплуатации индикаторов производительности нефтяных скважин отдельно по нефти, воде и газу «Нефтемер МК-5М».

Однако при эксплуатации данных приборов выяснилось, что возникают систематические и случайные погрешности измерений плотности нефтегазоводяной смеси, появление которых в большей степени связаны с работой первичных преобразователей, а именно блоков детектирования. При анализе погрешностей результатов измерений плотности в ходе испытаний выявлено, что случайная составляющая погрешности измерений обусловлена в основном случайным характером процессов излучения, взаимодействия с контролируемой средой и регистрации квантов гамма-излучения. Случайные погрешности возникают также в результате многократного преобразования сигнала измерительной информации. Систематическая составляющая погрешности измерений каналами прямого и рассе-

янного гамма-излучений обусловлена нелинейностью выходных сигналов блоков детектирования, вызванных неточностями при первичном градуировании физических характеристик контролируемых сред.

Систематические погрешности вызваны также рядом других факторов, влияющих на точность и стабильность градуировочных характеристик, в частности, старение элементов системы, дрейф электроники, изменение температуры окружающей среды, уменьшение интенсивности гамма-излучения и т. д.

Для снижения влияния данных факторов необходимо исследовать работу всей автоматической измерительной системы в целом, а именно обосновать радиоизотопный метод измерения покомпонентного состава нефтегазоводяной смеси в трубопроводе, полностью изложить конструкцию, принцип действия измерительной системы, подробно описать приборы и составные части, входящие в ее состав. Кроме того, необходимо более широко изучить первичный преобразователь, являющийся основной частью измерительной системы. Для этого целесообразно изучить назначение, принцип действия и конструкцию блока детектирования, провести исследование его спектрометрических свойств и стабильности счета, разработать стенд для сравнения погрешностей различных блоков для обеспечения точности результатов измерений.

Отсюда следует, что тема работы является актуальной, так как связана напрямую с повышением эффективности добычи и транспортировки полезных ископаемых необходимого количества и заданного качества, а также снижением погрешностей измерений дискретных приборов, измеряющих случайные величины.

1. Описание метода измерения и системы для его осуществления

За основу данной работы берём радиоизотопный метод измерения с использованием эффектов комптоновского рассеяния и фотоэлектрического поглощения гамма излучения материалом стенок трубопровода и веществами, образующими сырую нефть.

Основная идея метода заключается в следующем. Предполагается, что на наружной поверхности трубопровода без внедрения в него устанавливаются многоканальный блок гамма излучения (БГИ МК) и приемники излучения в виде блоков детектирования (БД).

Коллимированный луч гамма-излучения радионуклида Цезий-137 проникает сквозь стенку трубопровода и взаимодействует с ограниченным объемом контролируемой жидкости. При прохождении гамма-излучения через вещество происходит преобразование энергии гамма-квантов в элементарных актах их взаимодействия с атомами и электронами среды [1]. Этот процесс схематично представлен на рис. 1.

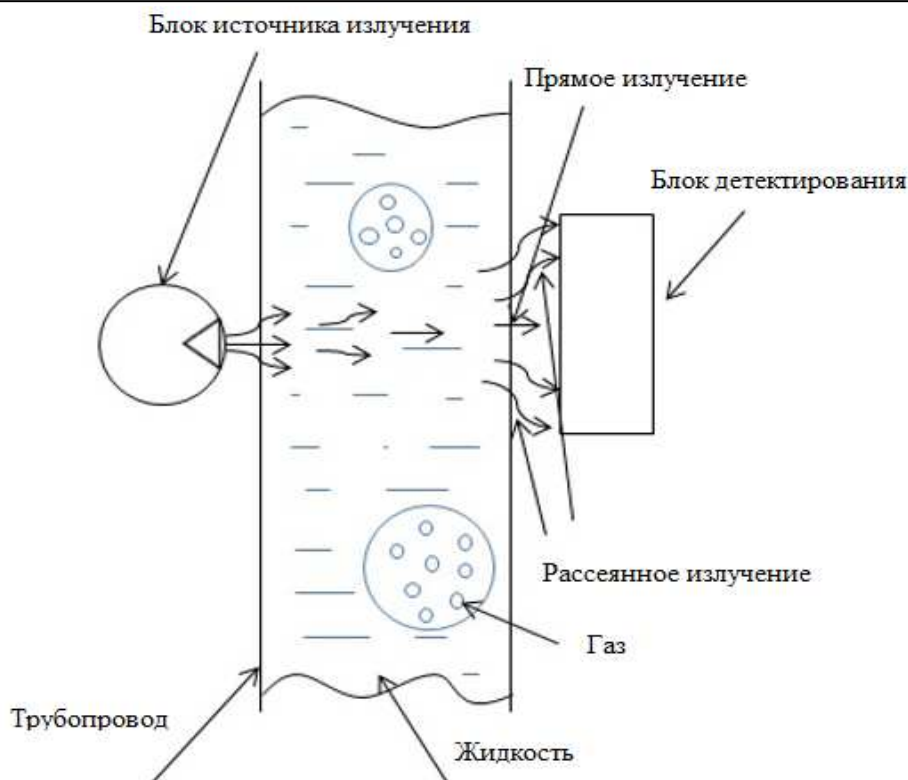


Рис. 1. Схема движения и фиксирования прибором гамма-излучений в трубопроводе

При взаимодействии гамма-квантов в энергетическом диапазоне 400-800 кэВ с веществом происходит уменьшение потока в узком пучке измеряемого гамма-излучения, проходящего через вещество, под действием фотоэлектрического поглощения гамма-квантов и выхода из узкого пучка при комптоновском рассеянии [2].

В результате этого, помимо ослабленных пучков прямого излучения, образуются потоки рассеянного излучения, распространяющиеся в среде во всех направлениях. Таким образом, информацию о контролируемой среде несут прямое и рассеянное излучение [3].

В соответствии с законом Гуго-Ламберто-Берра поток узкого пучка прямого гамма-излучения, прошедшего сквозь среду с постоянными во времени свойствами, толщиной d (м), определяется из соотношения (1):

$$N_{\text{пр}} = N_{0\text{пр}} \cdot \exp(-\mu_0 d) = N_{0\text{пр}} \cdot \exp(-\mu \cdot \rho_{\text{см}} \cdot d), \quad (1)$$

где $N_{0\text{пр}}$, $N_{\text{пр}}$ – интенсивности или математические ожидания числа гамма-квантов, регистрируемых блоком детектирования при отсутствии и при наличии контролируемой среды; μ_0 , μ – линейный и массовый коэффициенты ослабления м^{-1} , $\text{м}^2/\text{кг}$; $\rho_{\text{см}}$ – плотность смеси, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Для рассеянного излучения характерно то, что оно распространяется во всем объеме контролируемой среды, многократно взаимодействуя с атомами вещества. Путем подбора энергии первичного кванта, взаимного положения и диаграмм направленности (коллимации) источника и детек-

тора излучений (угла рассеяния и расстояния между областью рассеяния и детектором) можно добиться линейной зависимости интенсивности рассеянного под определенным углом излучения от плотности рассеивателя, что отражает формула (2):

$$N_{\text{расс}} = N_{0\text{расс}} \cdot (1 - \mu d\rho). \quad (2)$$

Вторичное гамма излучение имеет широкий энергетический спектр. Мягкая и жесткая части спектра разделяются при детектировании и образуют независимые сигналы измерительной информации – $N_{\text{пр}}$ и $N_{\text{расс}}$. $N_{\text{пр}}$ соответствует жесткой части спектра, а $N_{\text{расс}}$ – мягкой. Далее эта информация идёт во вторичный преобразователь, где с помощью формул идёт подсчёт требуемых параметров. Плотность смеси вычисляется по формуле (3):

$$\rho_{\text{см}} = \frac{\ln\left(\frac{N_{0\text{расс}}}{N_{\text{расс}}}\right) - b \times \ln\left(\frac{N_{0\text{пр}}}{N_{\text{пр}}}\right)}{a}, \quad (3)$$

где $N_{0\text{пр}}$, $N_{0\text{расс}}$, a , b – градуировочные коэффициенты.

Объемные доли воды и свободного газа в сырой нефти также вычисляются по количеству интенсивностей прямого и рассеянного излучений.

Главными составными частями автоматизированной измерительной системы на базе радиоизотопного способа измерений являются: блок гамма-излучения (БГИ), трубопровод, блок детектирования (БД) и блок регистрации, преобразования и передачи измерительной информации. Блок гамма-излучения вместе с блоком детектирования образуют первичный преобразователь. Принцип действия БД основан на регистрации потока γ -квантов сцинтилляционным детектором с фотоэлектронным умножителем (ФЭУ), формировании спектрометрических сигналов, амплитуда которых пропорциональна энергии зарегистрированных квантов, выделении из общего потока зарегистрированных квантов двух его компонентов соответствующих энергиям квантов, лежащих в двух непересекающихся энергетических диапазонах, обработке информации микроконтроллером по установленному алгоритму. Каждый из БД представляет собой электронное устройство, предназначенное для регистрации гамма-излучения радионуклида Cs-137.

Поток гамма-излучения от источника, прошедший через контролируемую среду, преобразуется в сцинтилляторе в электрический сигнал в виде потока прямоугольных импульсов положительной полярности с переменной амплитудой и длительностью. С выхода сцинтиллятора сигнал поступает в микроконтроллер, где обрабатывается по специальной программе и передается по интерфейсу RS-485. БД выдает в систему сбора информации усредненные значения отсчетов, пропорционально зарегистрированному количеству гамма-квантов.

Компьютер производит последовательный опрос всех БД и датчиков и по полученным данным осуществляет для каждого БД: обработку поступающей измерительной информации и вычисление усредненных значений массового расхода жидкости, нефти, объема попутного нефтяного газа, объемной доли воды в жидкости.

3. Исследование статистических характеристик блоков детектирования

То или иное преимущество или недостаток измерительной системы можно корректно оценить и проанализировать, испытав канал преобразования измерительной информации в системе от блока детектирования до ее преобразования, регистрации, отображения и передачи.

При выборе БД необходимо, чтобы его сцинтиллятор (кристалл, ФЭУ, делитель) обладал требуемыми показателями, т.е. при подборе ФЭУ и кристалла необходимо учитывать следующие характеристики: для кристалла - световой выход; для ФЭУ – энергетическое разрешение. Исходя из параметров ФЭУ и кристалла, можно вычислить разрешение сцинтиблока.

Для проверки разрешения сцинтиблока использовался стенд, структурная схема которого приведена на рис. 2.

На испытательном стенде осуществлялось тестирование сцинтиблоков в различных конфигурациях. Формирование конфигураций сцинтиблоков реализовано на основе комплектующих десяти кристаллов и десяти ФЭУ. Для каждой конфигурации с помощью прикладного программного обеспечения МСА (Multi Channel Analyzer) были сняты спектры. При использовании функциональных возможностей прикладного ПО были выполнены: аппроксимация информативных участков спектров модельной функцией и нахождение параметров пиков; сравнение спектров для различных конфигураций спектров. Спектр приемлемого сцинтиллятора представлен на рис. 3.

В качестве основного параметра, характеризующего спектрометрические характеристики сцинтиблока, применяется полная ширина на половине максимума (ПШПМ) [4], которая вычисляется по формуле (4):

$$\text{ПШПМ} = \left(2,36 \cdot \frac{K_2 - K_1}{K_0} \right) \cdot 100\%, \quad (4)$$

где K_0 – значение канала в точке пика амплитуды; $K_2 - K_1$ – разница значений каналов на половине максимума пика амплитуды.

На рис. 3 видно значения параметров ПШПМ на спектре. В промышленном использовании для достижения требуемой точности БД ПШПМ сцинтиблоков не должно превышать 9%. В соответствии с требованием по значению ПШПМ были отобраны две конфигурации сцинтиблоков: сцинтиблок 03 и сцинтиблок 07. Для испытаний стабильности счета блоков детектирования №1, №2, в них были установлены ФЭУ и кристаллы, приведенные в табл. 1.

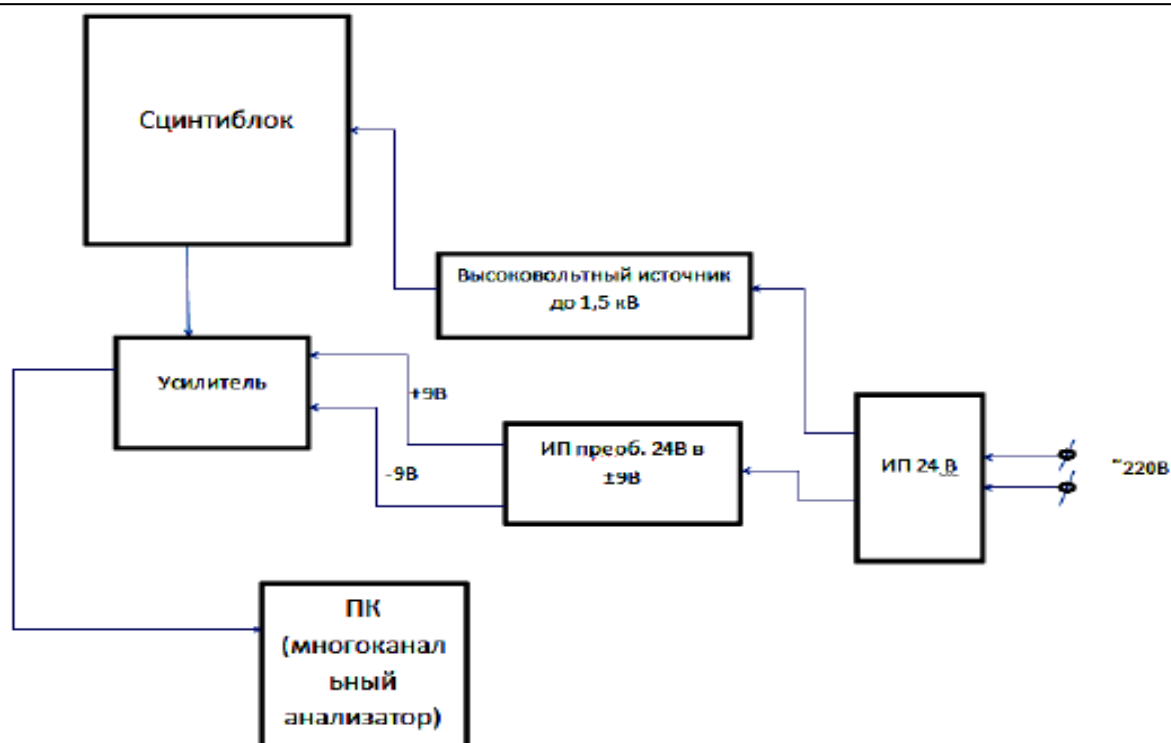


Рис. 2. Структурная схема стенда для испытания ФЭУ и кристаллов

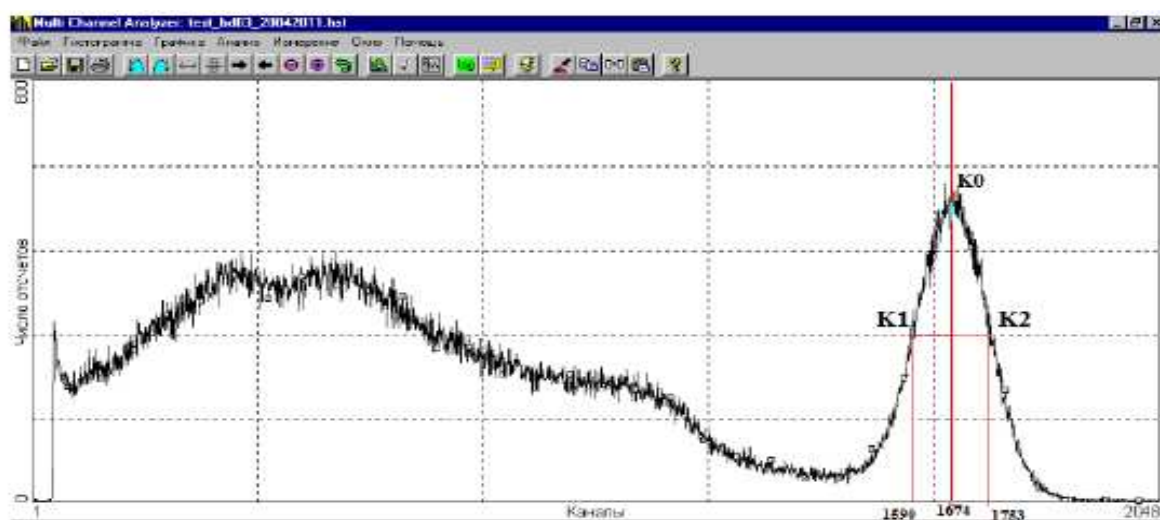


Рис. 3. Спектр в программе МСА

Таблица 2
Значения спектрометрических характеристик БД №1, №2

Номер блока детектирования	Значение ПШПМ, %	№ кристалла	№ ФЭУ
03	8,9	5586	64009
07	8,9	5590	64834

Для проведения эксперимента по снятию двух массивов по жесткому и мягкому каналу (S,H) использовался стенд, структурная схема которого приведена на рис. 4.

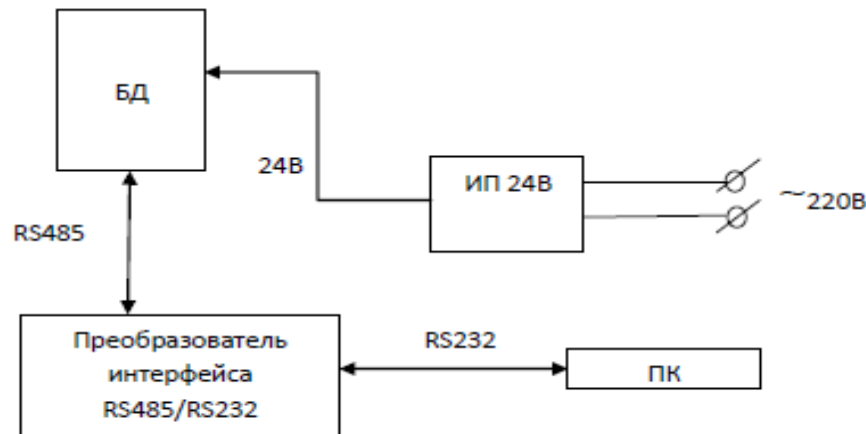


Рис. 4. Испытательный стенд для снятия двух массивов данных

Программа Fvor («частотомер-вортекс») предназначена для получения данных от блоков детектирования, их первичной обработки, хранения в файлах на жёстком диске и вывода на дисплей.

После запуска программы, она автоматически создает папку Fvor data, в которую записываются массивы данных по S и H каналам.

По окончании испытаний производится обработка данных в программе MatLab. По разработанному алгоритму в Matlab была написана программа, с помощью которой были определены параметры, характеризующие стабильность счета блоков детектирования.

Обработка массивов по H каналу:

```

load bd1_h.txt
x=bd1_h;
N = 100000;
n=floor(length(x)/N)*N
x = x(1:n);
xx = reshape(x, N, [ ]);
mm = mean(xx)
S = std(x)
  
```

Обработки массивов по S каналу:

```

load bd1_s.txt
x=bd1_s;
N = 100000;
n=floor(length(x)/N)*N
x = x(1:n);
xx = reshape(x, N, [ ]);
  
```


$mm = \text{mean}(xx)$

$S = \text{std}(x)$

С помощью программ, разработанной по алгоритму, осуществляется обработка всех полученных массивов в программе Fvor 18, результатом является получение средних значений импульсов за каждый цикл, среднее квадратичное отклонение (СКО) за весь интервал работы (30 минут).

Все полученные результаты для БД№1 и БД№2 в MatLab были записаны в таблицу Excel. В Excel были вычислены: среднее значение импульсов за весь интервал работы, относительные погрешности. Также были построены графики средних значений импульсов за циклы и графики отклонений среднего количества импульсов за циклы от среднего количества импульсов за весь интервал исследований. Среднее значение импульсов (формула (5)) при этом [5, 6]:

$$X = \frac{(x_1 + x_2 + \dots + x_{48})}{48} \quad (5)$$

Относительная погрешность (выражение (6)) [7]:

$$\delta_{\text{ОП}} = \left| \frac{\Delta x}{x} \right| \cdot 100\% \quad (6)$$

Результаты испытаний приведены в табл. 2.

На основании полученных массивов данных по Н и S каналам (Fvor_18) были построены гистограммы в программе OriginLab, также произведена аппроксимация гистограмм по методу Гаусса.

Математическое ожидание (МО) за каждый цикл и среднее квадратичное отклонение (СКО) за весь интервал работы, полученные из гистограмм, составили:

$$\text{Для БД№1: по каналу Н: } \left\{ \frac{\text{МО} = 9.22}{\text{СКО} = 3.02} \right\}, \text{ по каналу S: } \left\{ \frac{\text{МО} = 30.97}{\text{СКО} = 4.63} \right\}$$

$$\text{Для БД№2: по каналу Н: } \left\{ \frac{\text{МО} = 14.86}{\text{СКО} = 3.84} \right\}, \text{ по каналу S: } \left\{ \frac{\text{МО} = 58.97}{\text{СКО} = 7.58} \right\}.$$

Коэффициенты вариации находятся по формулам (7) и (8) [8, 9]:
для БД№1:

$$\vartheta_1 = \left(\frac{\sigma}{M} \right)_{1h} = \frac{3.02}{9.22} = 0.33; \quad \vartheta_2 = \left(\frac{\sigma}{M} \right)_{1S} = \frac{4.63}{30.97} = 0.15 \quad (7)$$

для БД№2:

$$\vartheta_3 = \left(\frac{\sigma}{M} \right)_{2h} = \frac{3.84}{14.86} = 0.26; \quad \vartheta_4 = \left(\frac{\sigma}{M} \right)_{2S} = \frac{7.58}{58.97} = 0.13 \quad (8)$$

По построенным гистограммам можно сказать, что распределение отчетов относительно среднего для БД№2 гораздо ближе к нормальному. Поэтому можно сделать вывод, что имеет место систематическая погрешность для БД№1.

Из полученных результатов видно, что коэффициенты вариации у БД№2 меньше чем у БД№1, поэтому мы можем говорить, что у БД№2 разброс импульсов меньше, чем у БД№1.

Таблица 3

**Результаты статистической обработки
для БД№1 и БД№2 по Н- и S-каналам**

Номер блока детектирования	БД№1		БД№2	
	Н-канал	S-канал	Н-канал	S-канал
Среднее значение импульсов за весь интервал работы	9.2179	30.9750	14.8585	58.9697
Минимальное значение за весь интервал работы	9.2022	30.8091	14.8398	58.9275
Максимальное значение за весь интервал работы	9.2347	31.1647	14.8790	59.0014
Отклонение среднего значения импульсов за циклы от среднего значения импульсов за весь интервал работы	0.18%	0.61%	0.14%	менее 0.1%

Также стоит отметить, что одной из задач является достижение стабильности счета импульсов (отклонения значений импульсов от среднего значения не превышало 0,1%). Так как от этого параметра зависит погрешность измерений. Из графиков, полученных в результате исследований видно, что разброс относительно среднего значения у БД№1 гораздо

больше, чем у БД№2. У БД№1 по каналу Н 20% точек располагается выше 0,1%, тогда как у БД№2 всего 10%. По каналу S у БД№1 70% точек находятся выше значения 0,1%, а у БД№2 все точки находятся ниже значения 0,1%.

Все результаты исследования можно объяснить тем, что:

1) в БД№1 вся стабилизация пика полного поглощения осуществляется только программным путем;

2) компоненты, входящие в состав БД№2 являются более стабильными, чем у БД№1.

Таким образом, делаем вывод, что прибор БД№2 метрологически обладает лучшими характеристиками, поэтому следует рекомендовать его к применению в качестве базового варианта для разрабатываемых измерителей характеристик потоков нефтегазовых смесей в трубопроводах.

Список литературы

1. Изотов В.В., Аникеев О.А., Дыганов А.Г. Эффект Комптона: Методическое пособие к лабораторным работам по атомной и ядерной физике. Зеленодольск: изд-во ЗФ КГУ, 2007. 18 с.

2. Беспалов В.И. Взаимодействие ионизирующих излучений с веществом: учеб. пособие для вузов. Томск: Изд-во ТПУ, 2008. 370 с.

3. Проскуряков Р.М., Коптева А.В., Войтюк И.Н. Автоматическая корректировка метрологических характеристик измерителей случайных сигналов первичного преобразователя анализатора жидкостных потоков // Записки Горного института: РИЦ СПбГИ (ТУ). СПб., 2012. Т. 195. С. 277-280.

4. Миллер Б.М., Панков А.Р. Теория случайных процессов в примерах и задачах. М.: Физматлит, 2002. 320 с.

5. Сизиков В.С. Математические методы обработки результатов измерений: учебник для вузов. СПб.: Политехника, 2001. 240 с.

6. Лебедев А.Н., Куприянов М.С. Вероятностные методы в инженерных задачах. СПб.: изд-во, 2000. 333 с.

7. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения: учебное пособие. М.: Высшая школа, 2-е изд., 2000. 383 с.

8. Тартаковский Д.Ф., Ястребов А.С. Метрология, стандартизация и технические средства измерений. М.: Изд-во стандартов, 2001. 205 с.

9. Чертов А. Г. Физические величины (Терминология, определения, обозначения, размерности, единицы): справочное пособие. М.: Высшая школа, 1990 . 335 с.

Войтюк Ирина Николаевна, канд. техн. наук, доц., [voytuk irina@mail.ru](mailto:voytuk_irina@mail.ru), Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский Горный университет,

Максимова Ольга Сергеевна, студент, olja-max.96@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский Горный университет

STUDY OF THE SYSTEMs STATISTICAL CHARACTERISTICS TO CONTROL
THE COMPOSITION OF OIL-GAS-WATER MIXTURE IN THE PIPELINE

I.N. Voytyuk, O.S. Maksimova

The paper provides a brief description of the system for measuring component composition of oil-gas-water mixture in the pipeline. The paper discloses the operational principle of the detection unit. The paper provides full description of testing methodology, as well as practical implementation of the detection unit testing and the results thereof. The paper gives a description of the test bench to analyze and compare spectral properties and stability account detection units. Also the paper provides algorithms for reducing random and systematic errors of the measuring system.

Key words: oil-gas-water mixture, gamma radiation, density, detection block, pulse counting procedure stability, random and systematic errors.

Voytyuk Irina Nikolaevna, candidate of technical sciences, docent, [voytuk irina@mail.ru](mailto:voytuk_irina@mail.ru), Russia, Saint-Petersburg, Saint-Petersburg Mining University,

Maksimova Ol'ga Sergeevna, student, olja-max.96@mail.ru, Russia, Saint-Petersburg, Saint-Petersburg Mining University

АНАЛИЗ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КОЛИЧЕСТВА ПОДАННЫХ ЗАЯВОК НА ИЗОБРЕТЕНИЯ ПО ТЕМАТИКЕ «МИКРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ГИРОСКОПЫ» В ВЕДУЩИХ СТРАНАХ МИРА

С.В. Журбенко

В статье приводится статистика патентования изобретений по тематике «Микромеханические гироскопы». Статистика охватывает национальные патентные ведомства 7 стран, а также европейское патентное ведомство и всемирную организацию интеллектуальной собственности. Статистика приводится для периода протяженностью 20 лет. В рамках рассматриваемого периода приводится деление на этапы по 5 лет. Для каждого этапа приводится общее количество поданных заявок на изобретения, а также динамика роста изобретательской активности.

Ключевые слова: статистика, изобретательская активность, микромеханические гироскопы.

Предметом настоящего исследования является анализ показателей патентной активности участников инновационного рынка в ведущих странах мира, таких как Канада, Китай, США, Япония, Великобритания, Германия и Франции.

Исходными данными для проведенного исследования является информация о подаче заявок в патентные ведомства ведущих стран, а также межнациональные патентные организации (Европейское патентное ведомство, Всемирная организация интеллектуальной собственности). Исследование основывается на информации находящейся в свободном доступе, предоставляемой поисковой системой Google на основе приоритетной выборки по тематике «Микромеханические гироскопы».

Исследование охватывает период с 1998г. по 2017г. и подразделяется на 4 этапа:

1. 01.01.1998г. – 31.12.2002г.;
2. 01.01.2003г. – 31.12.2007г.;
3. 01.01.2008г. – 31.12.2012г.;
4. 01.01.2013г. – 31.12.2017г.

Такие объекты, как изобретения и полезные модели, в основном характеризуют уровень технологического потенциала конструкторских разработок. Поэтому для оценки уровня научно-технической и изобретательской активности на территории конкретной страны, без учета национальных программ развития науки и международных программ сотрудничества, в исследовании рассматривается статистика с учетом как национальных (резидентов), так и иностранных заявителей.

При рассмотрении данных следует учитывать, что для каждой из исследуемых стран характерны свои особенности – экономические, политические, географические и др., поэтому приведенные диаграммы носят иллюстративный характер, указывая на основные тенденции [2].

Исследование показало, что безусловным лидером за последние 20 лет с долей порядка 35% от общего количества поданных заявок, в части патентования изобретений, касающихся тематики микро-механических гироскопов были, есть и остаются США (US). Второе место с долей порядка 20% занимает Китай (CN), а третье – Япония (JP) с долей порядка 12% от общего числа поданных заявок. Канада (CA), Германия (DE), Великобритания (GB) и Франция (FR) в свою очередь занимают не более 2% от общего числа поданных заявок.



Рис. 1. Процентное соотношение общего числа поданных заявок в разбивке по патентным ведомствам за весь период исследования

Однако необходимо учитывать и количество заявителей, обращающихся во Всемирную организацию интеллектуальной собственности (ВО), охватывающую 17% от общего числа поданных заявок, а также Европейское патентное ведомство (ЕП), охватывающее 10%. Если принять во внимание тесные как экономические, так и научно-технические связи стран, входящих в Евросоюз, то их процентные доли можно просуммировать. Таким образом, доля европейских заявителей от общего числа составляет не менее 15%, и означает, что по вовлеченности в разработки приборов, относящихся к классу микромеханических гироскопов, европейские участники инновационного рынка уступают только коллегам из США и Китая.

Также немаловажной является информация о динамике роста патентования на протяжении исследуемого периода. Динамика патентования показывает изменение активности изобретательской деятельности за определенный отрезок времени. Анализ динамики патентования выполняется по дате предоставления заявки. В этом случае точнее всего отображается время создания изобретений и исключается возможность ошибок, которые связаны с разницей во времени прохождения заявками экспертизы в разных патентных ведомствах.

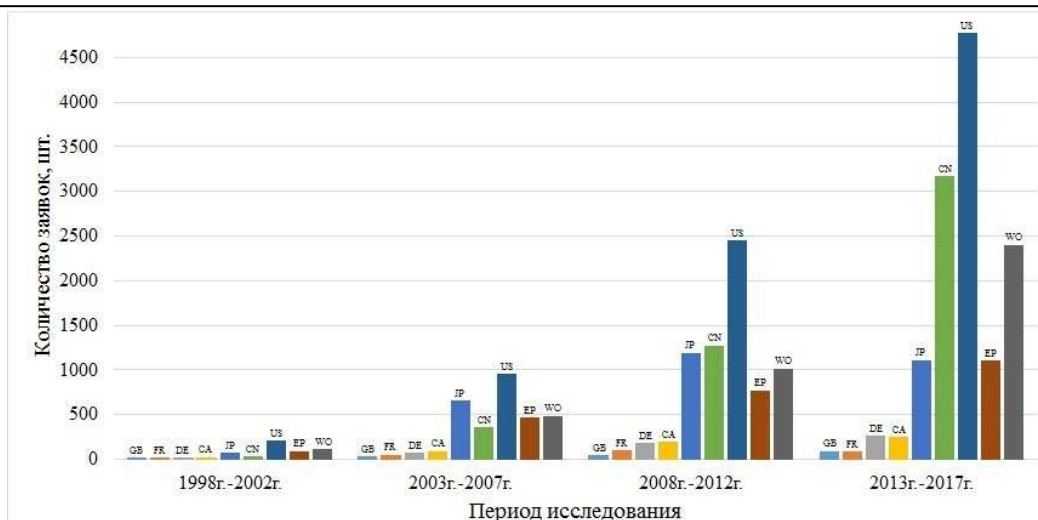


Рис. 2. Поданные заявки на выдачу патента в разбивке по патентным ведомствам и этапам исследования

Динамика подачи заявок на получение патентов в количественном отношении на протяжении 20 лет показывает неуклонный рост. Так количество заявок на получение патентов, поданных на регистрацию в патентные ведомства Германии, в конце исследуемого периода практически в 51 раз превосходит количество заявок, поданных на регистрацию в начале периода, в то время как в Великобритании в 15 раз, что соответствует показателю европейского патентного ведомства.

Среди североамериканских стран (США, Канада) этот показатель примерно одинаков и количество заявок на получение патентов, поданных на регистрацию в национальные патентные ведомства, на конец исследуемого периода в 24 раза превосходит количество в начале периода.

Безусловным лидером в данном аспекте является Китай. Здесь количество заявок на получение патентов, поданные на регистрацию в конце исследуемого периода в 137 раз превосходит количество заявок на патенты, поданные на начало периода.

Однако в случае Японии и Франции наблюдается некоторое снижение прироста. Этап с наибольшим количеством поданных заявок (2008г.–2012г.) для Японии в 19 раз, а для Франции в 28 раз превосходит количество поданных заявок на регистрацию патентов в начале исследуемого периода. В то время как завершающий этап исследования (2013г.–2017г.) превосходит изначальные показатели в 18 и 23 раза соответственно.

Данный спад хорошо иллюстрируется при рассмотрении процентного прироста по отношению к предыдущему периоду. Так для Японии и Франции этот показатель для последнего этапа исследования имеет отрицательное значение и составляет -7% и -17% соответственно.

Данное обстоятельство частично объяснимо значительным процентом крупных межнациональных корпораций среди заявителей, заинтересованных в представлении на мировых рынках, вследствие чего отдающих предпочтение межнациональным патентным ведомствам.

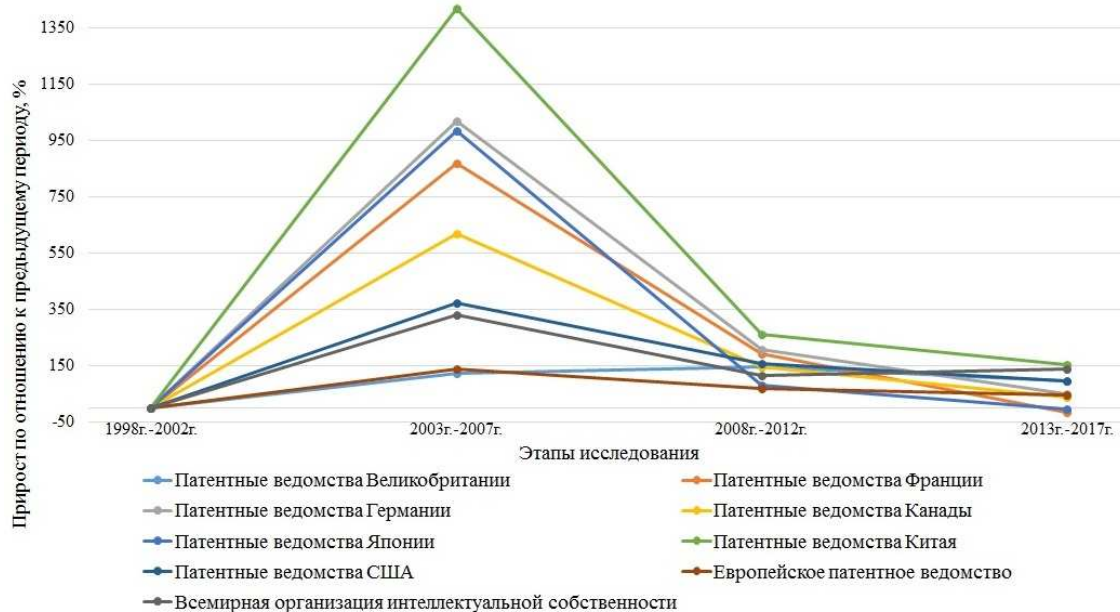


Рис. 3. Прирост по отношению к предыдущему периоду в разбивке по патентным ведомствам и этапам исследования

Как видно из графика (рис. 3) наиболее резкий скачок в увеличении прироста числа заявок наблюдается на этапе с 2003г. по 2007г. Этот этап можно охарактеризовать как этап становления фундаментальных решений в области микромеханических гироскопов.

Дальнейший спад прироста количества подаваемых заявок наблюдается для всех исследуемых патентных ведомств и носит системный характер и на фоне роста количественного числа ежегодно подаваемых заявок говорит не о снижении изобретательской активности, а о ее стабилизации.

Таким образом, спад процентного прироста в сочетании со стабильным ростом общего числа подач заявок на изобретения, говорит о том, что на сегодняшний день разработка микромеханических гироскопов превратилась из нового направления приборостроения в стабильно развивающуюся отрасль промышленности.

Список литературы

1. Google Patents [Электронный ресурс]. URL: <https://patents.google.com> (дата обращения: 10.02.2018).
2. Ананьев С.С. Анализ статистических данных о правовой охране объектов промышленной собственности в ведущих странах. М.: Изобретательство, 2005. Т. V № 11. С. 1 – 7.

Журбенко Сергей Владимирович, асп., zhurbenkosergey@yandex.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

INDICATOR ANALYSIS OF QUANTITY OF APPLICATION FORM ON THE SUBJECT
"MICROMECHANICAL GYROSCOPES" IN THE LEADING
COUNTRIES OF THE WORLD

S.V. Zhurbenko

The article contains statistics of patent for invention on the subject "Micromechanical gyroscopes". The statistics cover national patent offices of 7 countries, and the European Patent Office, the World Intellectual Property Organization. Statistics are given for a period of 20 years. The division of the phases for 5 years is given within the period under review, The total quantity of application form for inventions and the dynamics of growth in inventive activity are given for each phase.

Key words: statistics, inventive activity, micromechanical gyroscopes.

*Zhurbenko Sergey Vladimirovich, postgraduate, zhurbenkosergey@yandex.ru,
Russia, Tula State University*

УДК 621.314.6

УПРАВЛЕНИЕ АКТИВНЫМ ВЫПРЯМИТЕЛЕМ НАПРЯЖЕНИЯ В СОСТАВЕ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОГО ПРИВОДА ПРИ ПРОВАЛАХ НАПРЯЖЕНИЯ

Я.Э. Шклярский, А.И. Барданов

В статье рассмотрена работа электропривода с активным выпрямителем напряжения, управляемым в соответствии с принципами векторного управления, в условиях провала напряжения. Установлено, что при несимметричном провале напряжения, активный выпрямитель с векторным управлением является источником высших гармоник. Предложена стратегия управления, позволяющая на основе параметров годографа обобщенного вектора напряжения и мгновенной мощности двигателя сформировать входные токи выпрямителя, таким образом, чтобы при провале напряжения сохранить синусоидальную форму токов. Предложенная стратегия управления реализована в компьютерной модели, разработанной в среде Simulink MATLAB. Проанализированы входные токи выпрямителя в условиях провала напряжения при работе преобразователя с векторным управлением и с предложенной системой управления.

Ключевые слова: активный выпрямитель напряжения, векторное управление, провал напряжения, годограф обобщенного вектора напряжения, входные токи выпрямителя, источник высших гармоник.

1. Введение. Согласно ГОСТ 32144-2013 провалом напряжения называется кратковременное (до 1 минуты) снижение действующего значения напряжения ниже установленного порогового значения (от 0,9 до 0 от номинального значения) в конкретно точке электрической сети [1]. Провалы напряжения являются серьезной проблемой для электроустановок на промышленных предприятиях с непрерывным технологическим циклом, так как могут вызывать аварийное прекращение работы двигателя с частотно-регулируемым приводом (ЧРП) вследствие срабатывания защиты минимального напряжения при снижении напряжения в звене постоянного тока [2 – 4].

Проблема эта касается только систем с нерегулируемым выпрямителем, ЧРП же с активным выпрямителем (АВ) и в частности АВ напряжения с векторным управлением поддерживают величину напряжения в звене постоянного тока на уровне задания. В общем случае оно должно поддерживаться на величине несколько выше амплитуды линейного напряжения, чтобы сохранить возможность формирования входных токов [5–7]. Если это невозможно, привод, либо прекращает работу и отключается от сети, либо изменяет стратегию управления, чтобы преодолеть провал напряжения, сохранив параметры приводного механизма [4, 8].

Так как АВ с векторным управлением ориентирует обобщенный вектор тока по обобщенному вектору напряжения в точке подключения к сети, при несимметричном провале напряжения вектор тока движется с переменной скоростью, что ведет к несинусоидальности входных токов. Далее будет показано, что это явление – следствие работы системы АВ, поэтому его можно избежать путем внесения корректировок в задание составляющих вектора тока.

2. Векторное управление АВ. Для понимания процессов, происходящих в активном выпрямителе в условиях провала напряжения, требуется отдельно рассмотреть принцип формирования входных токов выпрямителя и его реализацию. Устройство и принцип действия АВ с векторным управлением подробно описаны во множестве работ [5,6,9], поэтому в этой статье рассмотрим только ключевые принципы. Силовая часть преобразователя представляет собой сетевой инвертор, звено постоянного тока и группу дросселей. В работе рассматривается АВ напряжения, звено постоянного тока преобразователя такого типа состоит из конденсатора большой емкости, что определяет его свойства. Рис. 1 иллюстрирует взаимодействие активного выпрямителя с сетью и режимы работы устройства.

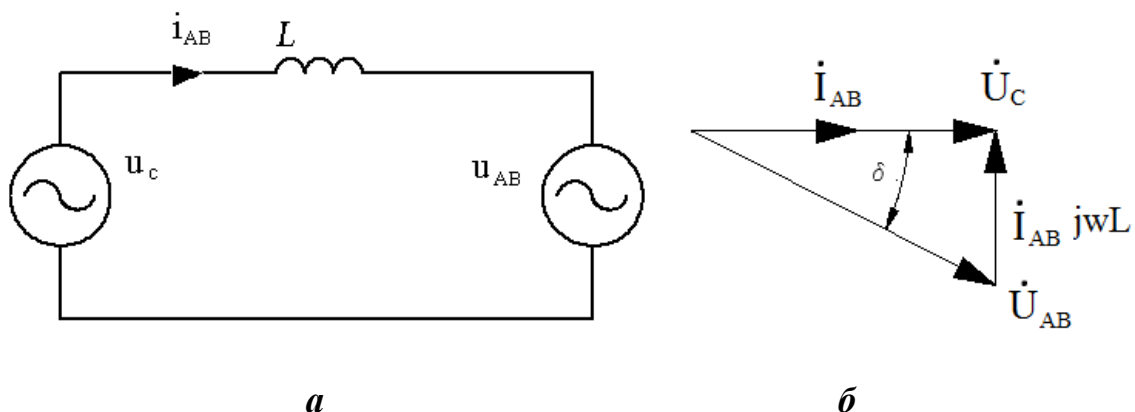


Рис. 1. Взаимодействие активного выпрямителя с сетью и режимы работы устройства: а – однофазная эквивалентная схема замещения АВ; б – векторная диаграмма работы АВ

Схема на рис. 1, а описывается уравнением:

$$u_c = L \frac{di_{AB}}{dt} + u_{AB}, \quad (1)$$

где u_c – напряжение в точке подключения АВ к сети; i_{AB} – входной ток АВ; u_{AB} – напряжение сетевого инвертора; L – индуктивность входного дросселя устройства; t – время в секундах.

Из анализа (1) становится понятно, что ток выпрямителя определяется разностью напряжения формируемого сетевым инвертором и напряжения в точке присоединения АВ к сети.

Рис. 1, б иллюстрирует работу устройства в выпрямительном режиме, когда комплексный вектор тока сонаправлен с вектором напряжения, что указывает на потребление устройством из сети только активной мощности. Следует отметить, что сетевые инверторы способны работать в режиме компенсации реактивной мощности. Преобразователи управляемые таким образом называются статическими компенсаторами реактивной мощности, подробно их работа и способы формирования задания для них разобраны в [10,11]. В статье будет рассматриваться только выпрямительный режим работы устройства, режим компенсации реактивной мощности и смешанные режимы работы в статье рассмотрены не будут.

С помощью преобразований (1) по Кларку [12] и Парку [13] переходим к передаточным функциям тока преобразователя в dq координатах:

$$\begin{cases} u_{cd} - u_{ABd} = i_{ABd}R + L \frac{di_{ABd}}{dt} - i_{ABq}\omega L; \\ u_{cq} - u_{ABq} = i_{ABq}R + L \frac{di_{ABq}}{dt} + i_{ABd}\omega L. \end{cases}, \quad (2)$$

где u_{cd} , u_{cq} – ортогональные составляющие обобщенного вектора напряжения сети; u_{ABd} , u_{ABq} – ортогональные составляющие напряжения сетевого инвертора; i_{ABd} , i_{ABq} – ортогональные составляющие обобщенного вектора тока; R – активное сопротивление дросселей АВ; ω – круговая частота питающего напряжения.

Анализ уравнения показывает возможность раздельного управления компонентами тока, что реализовано в системе векторного управления с упреждением по соответствующим составляющим напряжения сети и ортогональным составляющим тока.

Задание для d-компоненты тока формируется контуром регулирования напряжения звена постоянного тока. Передаточная функция системы по напряжению на конденсаторе:

$$P_{вх.к.} - P_{вых.к.} = \frac{C_K}{2} \frac{du_K^2}{dt}, \quad (3)$$

где $p_{вх.к.}$ – поток мощности, входящий в звено постоянного тока; $p_{вых.к.}$ – поток мощности, выходящий из звена постоянного тока; C_k – емкость конденсатора в звене постоянного тока; u_k – мгновенное напряжение в звене постоянного тока.

Подробный вывод передаточных функций (2, 3) представлен в работах [5,6]. Из анализа (3) становится ясно, что для обеспечения возможности формирования входных токов контур регулирования напряжения должен поддерживать напряжение на конденсаторе постоянным. Для поддержания напряжения в звене постоянного тока поток мощности [14], поступающий в преобразователь из сети, должен быть равен сумме потока мощности, отдаваемого преобразователем частоты в электродвигатель, и мощности потерь. При несоблюдении этого баланса напряжение в звене постоянного тока изменяется.

3. Канонические системы координат. В нормальном режиме работы сети векторы напряжения и тока движутся по кругу с постоянной скоростью, поток мощности при этом постоянен (величина его соответствует скалярному произведению векторов напряжения и тока), и соответствует потреблению электроэнергии двигателем. При несимметричном провале напряжения, годограф вектора напряжений представляет собой эллипс [3,15], это обстоятельство в значительной мере влияет на процессы, происходящие в преобразователе.

Известно, что для любого эллипса можно найти такую систему координат (СК), обозначим ее $\alpha'\beta'$, в которой геометрическое место точек фигуры описывается уравнением:

$$\left(\frac{u_{\alpha'}}{a}\right)^2 + \left(\frac{u_{\beta'}}{b}\right)^2 = 1, \quad (4)$$

где $u_{\alpha'}$ – проекция обобщенного вектора напряжения на ось абсцисс СК $\alpha'\beta'$; $u_{\beta'}$ – проекция обобщенного вектора напряжения на ось ординат СК $\alpha'\beta'$; a – длина большой полуоси эллипса; b – длина малой полуоси эллипса.

Система координат, связанная с осями симметрии эллипса называется канонической, а уравнение (4) – каноническим. Свойства канонических СК делают их чрезвычайно удобными для описания поведения системы при провалах напряжения. В общем случае, оси канонической СК повернуты относительно осей системы координат $\alpha\beta$ на угол ψ . Приведя к канонической системе координат три и более измерения мгновенных напряжений трехфазной сети, можно определить параметры годографа обобщенного вектора напряжения. Для этого был разработан итерационный алгоритм, определяющий параметры годографа для различных углов ψ , и выбирающий правильный по ошибке при расчете канонического

уравнения. Таким образом, угол поворота канонической СК относительно осей $\alpha\beta$ определяется перебором. Подробно итерационный алгоритм описан в статьях [3, 15].

Важным свойством канонических СК является то, что в синусоидальном несимметричном режиме (несимметричный провал напряжения) проекции обобщенного вектора напряжений изменяются ортогонально по законам синуса и косинуса:

$$\begin{bmatrix} u_{\alpha'} \\ u_{\beta'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a \cos(\omega t + \psi) \\ b \sin(\omega t + \psi) \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где $u_{\alpha'}$ – проекция обобщенного вектора напряжения на ось абсцисс системы координат $\alpha'\beta'$; $u_{\beta'}$ – проекция обобщенного вектора напряжения на ось ординат, системы координат $\alpha'\beta'$.

4. Условие синусоидальности входных токов АВ. Пусть имеются два набора синусоидальных, несимметричных токов и напряжений соответственно, тогда обобщенные векторы движущиеся по эллиптическим траекториям (рис. 2, а). Из анализа (5) понятно, что вектор движется по эллиптической траектории с неравномерной скоростью, ускоряясь при прохождении малой полуоси и замедляясь при прохождении большой полуоси. Соответственно между рассматриваемыми векторами имеется изменяющийся угол, обозначим его $\varphi_{3\phi}$. Учтем это свойство и определим, в каком случае поток мощности постоянен.

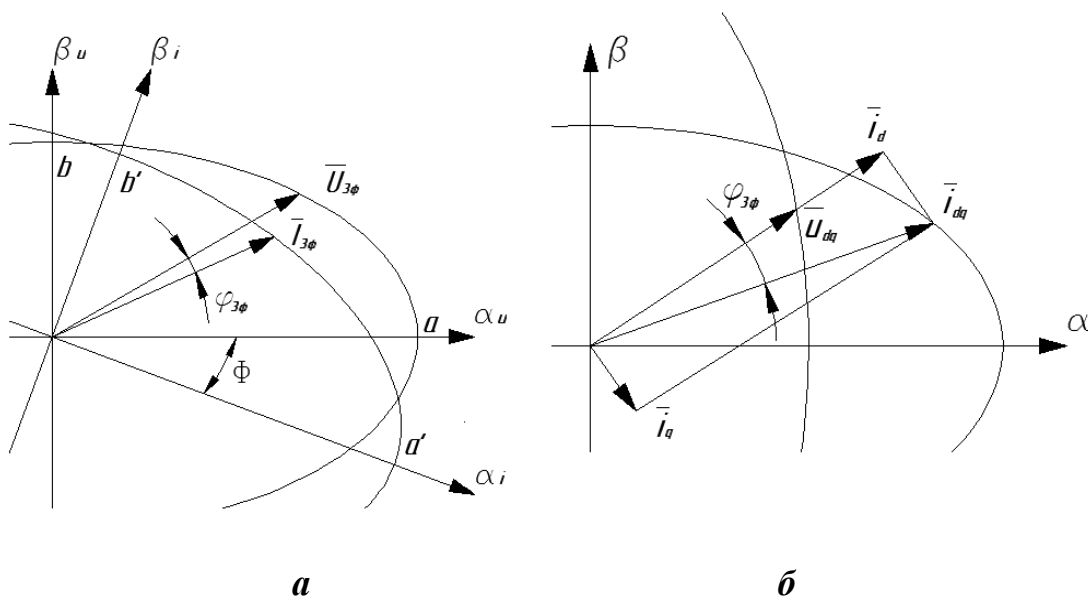


Рис. 2. Обобщенные векторы синусоидальных несимметричных напряжений и токов: а – в общем случае; б – при постоянном потоке активной мощности

На рис. 3, а каноническая система координат обобщенного вектора напряжения $U_{3\phi}$, обозначена $\alpha_u \beta_u$, каноническая система координат обобщенного вектора тока $I_{3\phi}$ обозначена $\alpha_i \beta_i$, а буквой Φ обозначен угол между системами координат. Большие и малые полуоси соответствующих эллипсов обозначены буквами a, b, a' и b' . Траектория движения векторов описывается системой уравнений:

$$\begin{cases} i_{\alpha_i} = a' \cos(\omega t + \psi_i); \\ i_{\beta_i} = b' \sin(\omega t + \psi_i); \\ u_{\alpha_u} = a \cos(\omega t + \psi_u); \\ u_{\beta_u} = b \sin(\omega t + \psi_u). \end{cases}$$

где $i_{\alpha_i}, i_{\beta_i}$ – координаты обобщенного вектора тока в канонической СК; $u_{\alpha_u}, u_{\beta_u}$ – координаты обобщенного вектора напряжения в канонической СК.

Так как важно в первую очередь относительное положение векторов, примем ψ_u равным нулю, приведем координаты обобщенного вектора тока к канонической СК обобщенного вектора напряжений и определим мгновенную мощность системы p (скалярное произведение двух векторов):

$$p = (i_{\alpha_i} \cos(\Phi) - i_{\beta_i} \sin(\Phi)) u_{\alpha_u} + (i_{\alpha_i} \sin(\Phi) + i_{\beta_i} \cos(\Phi)) u_{\beta_u}$$

Мгновенная мощность в значительной мере определяется углом между осями канонических систем координат Φ и разностью между ψ_u и ψ_i . Условием постоянства потока мощности является отсутствие колебательных составляющих. Если приравнять нулю углы ψ_i и Φ нулю, выражение принимает чрезвычайно простой и удобный для анализа вид, и, самое значимое, в выражение остается только одна колебательная составляющая:

$$p = P + 2\Delta P \cos(2\omega t).$$

В этом представлении переменная составляющая потока мощности, обозначенная ΔP определяется как:

$$\Delta P = \frac{aa' - bb'}{2}, \quad (6)$$

а постоянная определяется P равна:

$$P = aa' - \Delta P.$$

Из анализа (6) понятно, что переменная составляющая потока мощности становится равна нулю при выполнении условия:

$$\frac{a}{b} = \frac{b'}{a'}. \quad (7)$$

Следовательно, для обеспечения постоянного потока мощности в синусоидальном, несимметричном режиме работы сети выпрямителю достаточно поддерживать входные токи такими, чтобы годограф их обобщенного вектора представлял собой эллипс, оси симметрии которого совпадают с осями симметрии годографа вектора напряжения ($\Phi = 0$). При этом

отношение длин полуосей эллипсов должно быть обратно пропорциональным (7) а угол между векторами в моменты пересечения осей симметрии эллипсов должен быть равен нулю ($\psi_i = 0$).

5. Система управления. Для сохранения работоспособности выпрямителя при синусоидальности его входных токов следует формировать обобщенный вектор тока в соответствии с критерием постоянства потока мощности.

На рис. 2, б оси симметрии эллипсов совпадают с осями стационарной системы координат $\alpha\beta$. В соответствии с этим представлением определяем параметры годографа обобщенного вектора тока:

$$\begin{cases} a' = \frac{i_{зад} \cdot U_{\kappa}}{a}; \\ b' = \frac{i_{зад} \cdot U_{\kappa}}{b}, \end{cases} \quad (8)$$

где U_{κ} – напряжение звена постоянного тока; $i_{зад}$ – задание для контура тока, формируемое контуром регулирования напряжения.

Для дальнейших расчетов необходимо определить угол θ , на который вектор напряжения повернут относительно оси α' . Для этого воспользуемся свойством, описанным (4)

$$\theta = \arccos\left(\frac{u_{\alpha'}}{a}\right).$$

Определив угол θ , система управления вычисляет координаты обобщенного вектора токов в канонической СК $\alpha'\beta'$ (5) и переводит их в стационарную СК $\alpha\beta$ для определения составляющих вектора тока, используя скалярное и векторное произведения векторов соответственно:

$$\begin{cases} i_d = \frac{u_{\alpha} i_{\alpha} + u_{\beta} i_{\beta}}{|u_{\alpha\beta}|}; \\ i_q = \frac{u_{\alpha} i_{\beta} - u_{\beta} i_{\alpha}}{|u_{\alpha\beta}|}. \end{cases} \quad (9)$$

где i_d, i_q – координаты обобщенного вектора тока во вращающейся СК; i_{α}, i_{β} – координаты обобщенного вектора тока в стационарной СК; u_{α}, u_{β} – координаты обобщенного вектора напряжения в стационарной СК; $u_{\alpha\beta}$ – обобщенный вектор напряжения в стационарной системе координат.

Таким образом, если известны координаты обобщенного вектора напряжения сети и параметры его годографа, то в любой момент времени можно определить координаты обобщенного вектора тока, такие, чтобы поддерживать требуемый поток мощности.

6. Результаты моделирования. Для исследования работы активно-го выпрямителя в режиме провала напряжения в программном пакете Simulink MATLAB была разработана компьютерная модель. Модель создавалась с использованием стандартных блоков библиотеки Simscape\PowerSystems. Индуктивность и активное сопротивление дросселей, емкость конденсатора в звене постоянного тока и коэффициенты ПИ регуляторов выбирались в соответствие с рекомендациями, данными в [6]. Напряжение в точке общего подключения 0,4 кВ, мощность установки 16 кВт.

Последовательно смоделируем работу преобразователя в различных режимах работы сети, сначала в нормальном режиме, а затем при однофазном провале напряжения (во время провала остаточное в фазе А напряжение составило 50% от номинального) с обычной векторной системой управления и с системой управления, формирующей задание для входных токов преобразователя при поддержании постоянства потока мощности.

Входные токи и напряжение в точке присоединения устройства к сети при работе АВ в нормальном режиме представлены на рис. 3. Годограф на рис. 3 и все годографы далее представлены в относительных единицах. В этом режиме, токи и напряжения синусоидальны и симметричны, чему и служит такого типа преобразователь, векторы напряжения и тока вращаются с одинаковой скоростью, без сдвига фаз, соответственно годографы тока и напряжения представляют собой круги, что видно из рисунка.

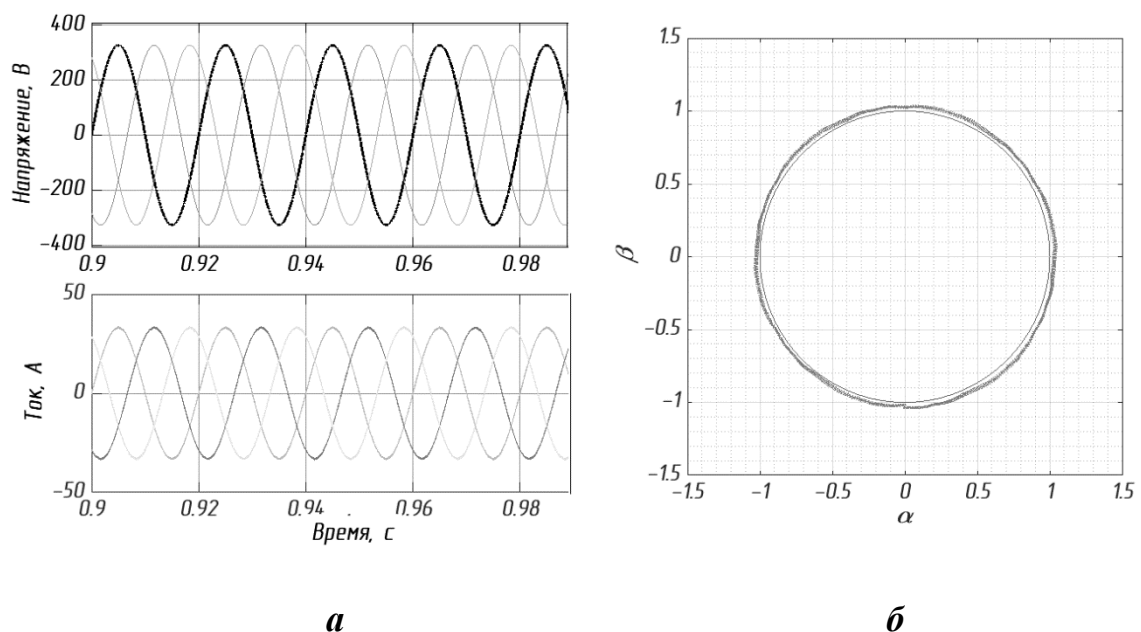


Рис. 3. Напряжения и токи активного выпрямителя в нормальном режиме работы (а), годографы обобщенных векторов напряжения и тока в нормальном режиме работы (б)

При провале напряжения (рис. 4) годограф обобщенного вектора напряжения является эллипсом (напряжения сети синусоидальны и несимметричны), а скорость вектора не постоянна. В этих условиях система управления пытается поддержать постоянный поток мощности, однако, этому препятствует сам принцип, ориентирования вектора тока по вектору напряжения, что ведет к искажению входных токов устройства. Коэффициент гармонических искажений полученных токов равен 9,36%.

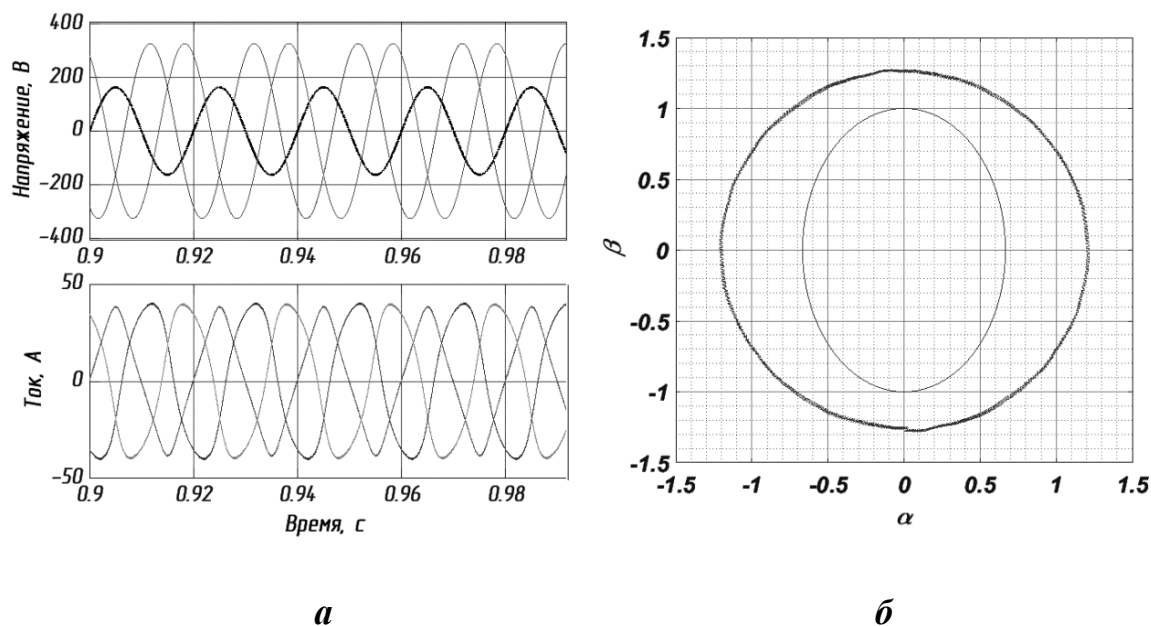


Рис. 4. Напряжения и токи активного выпрямителя при провале напряжения (а), годографы обобщенных векторов напряжения и тока при провале напряжения (б)

Проведем моделирование работы устройства при провале напряжения, формируя задание для контура регулирования составляющих обобщенного вектора тока, способом, обеспечивающим постоянство потока мощности в синусоидальном несимметричном режиме (8, 9).

Полученные графики, подтверждают теоретические положения, входные токи синусоидальны и годограф вектора токов представляет собой эллипс, каноническая система координат которого совпадает с канонической системой координат вектора напряжения, а величины полуосей обратно пропорциональны. Коэффициент гармонических искажений входных токов при применении предложенного принципа управления равен 1,11%, что меньше полученного в случае обычного векторного управления в 8 раз.

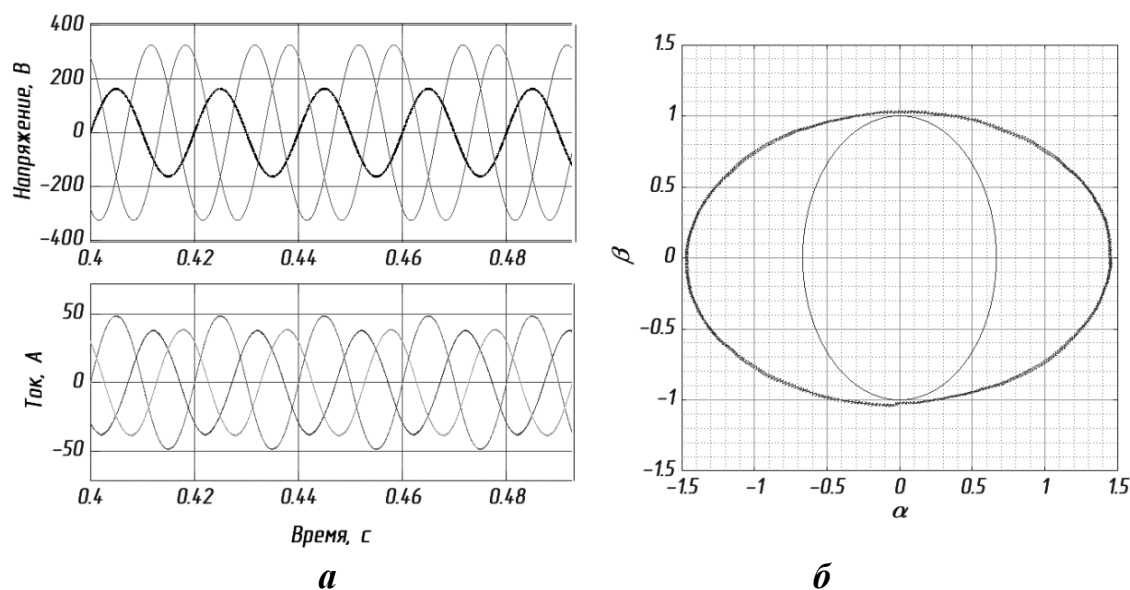


Рис. 5. Напряжения и токи активного выпрямителя при поддержании постоянного потока мощности (а), годографы обобщенных векторов напряжения и тока при поддержании постоянного потока мощности (б)

Закключение. Исходя из необходимости поддержания активным выпрямителем постоянного потока мощности при синусоидальных входных токах, на основе особенностей траектории обобщенного вектора напряжения при провале напряжения сформулированы требования к годографу обобщенного вектора тока активного выпрямителя. Для выполнения этих требований годограф должен представлять собой эллипс, при этом проекции обобщенного вектора тока на оси системы координат, сориентированные по осям симметрии этого эллипса должны изменяться по закону синуса и косинуса.

Для реализации описанного принципа разработана система управления, которая исходя из требуемой электродвигателю мощности, позволяет сформировать задания для составляющих обобщенного вектора тока, чтобы добиться синусоидальной формы входных токов.

Эффективность предложенного способа управления при несимметричном провале напряжения, оценивалась на основе компьютерного моделирования в среде Simulink MATLAB. В ходе моделирования по коэффициенту гармонических искажений входных токов при прочих равных условиях сравнивались преобразователь с обычным векторным управлением, и активный выпрямитель, формирующий вектор токов по предложенному алгоритму. Сравнение результатов моделирования двух систем управления показало, что коэффициент гармонических искажений входных токов устройства с модернизированной системой управления снизился в 8 раз.

Список литературы

1. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Издательство стандартов, 2014. 18 с.
2. Николаев А.А. и др. Исследование влияния провалов напряжения в системе электроснабжения завода ММК METALURJI на работу главных электроприводов стана горячей прокатки // Электротехнические системы и комплексы, 2015. Т. 3. № 28. С. 8–14.
3. Shonin O.B., Kryltcov S.B., Novozhilov N.G. The digital algorithm for fast detecting and identifying the asymmetry of voltages in three-phase electric grids of mechanical engineering facilities The digital algorithm for fast detecting and identifying the asymmetry of voltages in three-phase electr // MEACS2016, 2017. С. 1–6.
4. Шонин О.Б., Новожилов Н.Г., Крыльцов С.Б. Повышение устойчивости асинхронного электропривода с бездатчиковой скалярной системой управления при провалах напряжения сети // Известия Тульского государственного университета. Технические науки, 2016. Вып. 11. Ч. 2. С. 507–520.
5. Zarif M., Monfared M. Electrical Power and Energy Systems Step-by-step design and tuning of VOC control loops for grid connected rectifiers // Int. J. Electr. Power Energy Syst. Elsevier Ltd, 2015. Т. 64. С. 708–713.
6. Sanjuan S.L. Voltage Oriented Control of Three-Phase Boost PWM Converters Voltage Oriented Control of Three-Phase Boost PWM Converters. Chalmers University of Technology, 2010. 105 с.
7. Mohan N. и др. Power electronics. 3-е изд. / под ред. Zobrist B. Hoboken: John Wiley, 2003. 792 с.
8. Шонин О.Б., Новожилов Н.Г., Крыльцов С.Б. Наблюдатель частоты вращения ротора в скалярной системе управления асинхронным электроприводом // Электротехнические системы и комплексы, 2016. Т. 2. С. 15–19.
9. Jamma M. и др. Voltage oriented control of three-phase PWM rectifier using space vector modulation and input output feedback linearization theory // 2016 8th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI). IEEE, 2016. Т. 30. С. 1–8.
10. Bharadwaj C.A., Maiti S. Modular multilevel STATCOM with energy storage // 2016 11th International Conference on Industrial and Information Systems (ICIIS). IEEE, 2016. С. 730–735.
11. Kadu A.D. и др. Application of STATCOM for harmonic mitigation and power factor improvement using direct current control technique // 2017 Second International Conference on Electrical, Computer and Communication Technologies (ICECCT). IEEE, 2017. С. 1–4.

12. Aboutanios E. An adaptive clarke transform based estimator for the frequency of balanced and unbalanced three-phase power systems // 25th Eur. Signal Process. Conf. EUSIPCO 2017, 2017. Т. 2017–Janua. № 1. С. 1001–1005.

13. Park R.H. Abridgment of two-reaction theory of synchronous machines generalized method of analysis. Part I // J. A.I.E.E. 1929. Т. 48. № 3. С. 194–194.

14. Emanuel A.E. Power Definition and the Physical Mechanism of Power Flow. 1-е изд. John Wiley, 2010. 264 с.

15. Шклярский Я.Э., Барданов А.И. Определение напряжения звена постоянного тока частотного электропривода при провалах напряжения // Известия Тульского государственного университета. Технические науки, 2017. Вып. 12. Ч. 2. С. 447–456.

Ярослав Элиевич Шклярский, д-р техн. наук, доц., зав. кафедрой, js-10@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский Горный Университет,

Алексей Игоревич Барданов, асп., bardanov.alexey@gmail.com, Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский Горный Университет

CONTROL OF ACTIVE RECTIFIER OF VARIABLE FREQUENCY DRIVE DURING VOLTAGE DIPS

Y.E. Shklyarskiy, A.I. Bardanov

Operation of an electric drive with an active voltage rectifier controlled in accordance with the principles of vector control in conditions of voltage failure is discussed in the paper. It is established that during an asymmetric voltage failure, the VOC controlled active rectifier is a high harmonics source. To achieve sinusoidal currents novel control strategy was proposed. Reference input currents values are being calculated from parameters of the generalized voltage vector locus and the instantaneous power of the engine. The proposed control strategy is implemented in a computer model developed in the Simulink MATLAB environment. Simulation results are input currents of the rectifier under voltage dip. They are calculated for standard VOC control system and for proposed control technique.

Key words: active rectifier, VOC, voltage dip, generalized voltage vector locus, rectifier input currents, high harmonics source.

Yaroslav Elievich Shklyarsky, doctor of technical sciences, head of the department, js-10@mail.ru, Russia, St.Petersburg, Mining University,

Bardanov Aleksey Igorevich, postgraduate, bardanov.alexey@gmail.com, Russia, St. Petersburg, Mining University

ПОДБОР ОБЪЁМНЫХ НАСОСОВ ДЛЯ ГИДРОСИСТЕМЫ ИНЕРЦИОННОГО ГИДРОДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ТРАНСФОРМАТОРА ВРАЩАЮЩЕГО МОМЕНТА

Д.В. Гребеньков

Исследуется проблема повышения надежности инерционного гидродифференциального трансформатора вращающего момента за счет применения в конструкции выпрямителя момента наиболее подходящих по своим характеристикам объёмных насосов, используемых в качестве муфт свободного хода. Приводятся экспериментальные и расчетные зависимости, определяющие объёмные потери в насосе.

Ключевые слова: инерционный гидродифференциальный трансформатор вращающего момента, гидромашина, механизм свободного хода, утечки.

Использование в трансмиссиях мобильных машин (ММ) автоматических передач способствует увеличению их производительности по причине более эффективного расходования мощности силовой установки, а также повышению эксплуатационных качеств и топливной экономичности. Инерционно-импульсные передачи для силовых приводов ММ представляют наибольший интерес из числа известных механических автоматических передач, так как обладают следующими преимуществами: бесступенчатое и автоматическое изменение частоты вращения и крутящего момента, подаваемого к двигателям ММ в широком диапазоне при высоком КПД; возможность защиты от перегрузок энергетической установки; удобство и простота управления [1, 2].

В связи с этим, наблюдается постоянный интерес к использованию инерционного трансформатора вращающего момента (ИТВМ) в автоматических приводах ММ. Потенциальные возможности таких передач, изначально заложенные физической сущностью происходящих процессов в ИТВМ, и малый опыт их применения в автомобилестроении диктует актуальность и важность данной проблемы в перспективе, как с практической, так и с научной точки зрения.

В настоящее время ИТВМ не получили массового применения в автомобилестроении по причине малой надёжности выпрямителя инерционного момента, использующего в конструкции механизм свободного хода (МСХ), в котором быстро выходит из строя тело заклинивания. Теоретически и экспериментально были исследованы выпрямители момента различного конструктивного исполнения и принципа действия, в том числе пластинчатые, роликовые, эксцентриково-клиновые с кинематической связью в виде кулисно-крестовой муфты и внутреннего зубчатого зацепления,

пружинные, микрохраповые, кулачковые и т.д. В результате исследований выяснилось, что МСХ в ИТВМ работают при больших динамических нагрузках с большой частотой включения, что предъявляет повышенные требования к их технологическим и конструктивным параметрам [3].

Наиболее слабым звеном механизма свободного хода механического типа является тело заклинивания. Применение в качестве тала заклинивания гидравлической жидкости позволяет устранить выявленное слабое звено и уменьшить износ.

Чтобы повысить надежность ИТВМ был разработан гидродифференциальный выпрямитель момента (ГВМ) оригинальной конструкции, в котором функции МСХ выполняют гидромашины, а гидравлическая жидкость является телом заклинивания.

На рис. 1 приведена кинематическая схема инерционного гидродифференциального трансформатора вращающего момента (ИГТВМ), который состоит из импульсного механизма, представляющего собой ведущий вал 1, соединенный с неуравновешенными грузами 3, вал-реактор 2 и основной дифференциальный механизм 4. Дополнительный дифференциальный механизм состоит из зубчатых колёс 5 и 6, сателлитов 7, водила 8, зубчатого колеса 9 и коронного зубчатого колеса 13, соединённого через зубчатое колесо 9 с выходной объёмной гидромашинной (гидроМСХ) 12, которая закреплена на корпусе 14 передачи. Таким же образом установлена и корпусная гидромашинная 15. Замкнутую циркуляцию рабочей жидкости в гидромашинных 12 и 15 обеспечивают клапаны обратного действия 11 и 16, установленные в соответствующих трубопроводах. Ведомый вал 10 соединен с водилом 8. ИГТВМ может работать в трех характерных режимах: стоповом (режим неподвижного реактора), трансформации вращающего момента и прямой передачи (режим динамической муфты) [4].

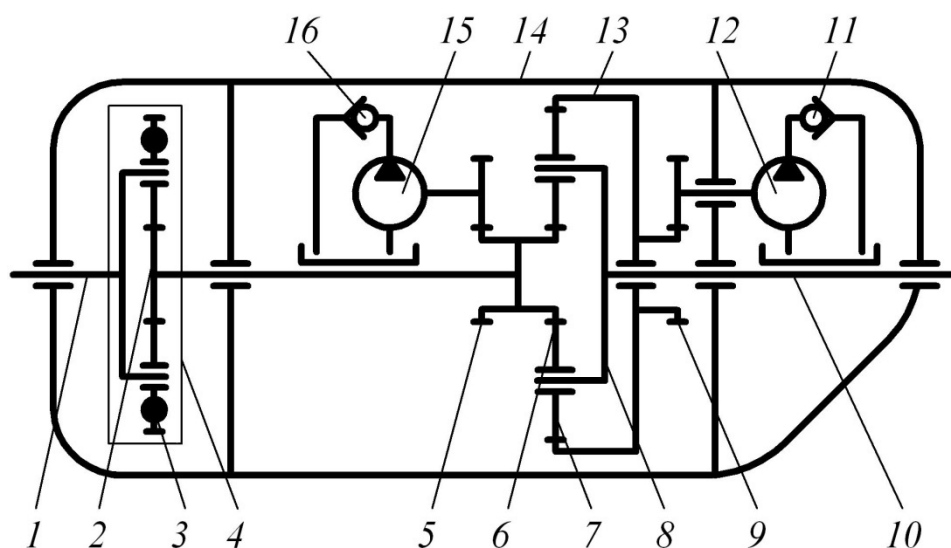


Рис. 1. Кинематическая схема ИГТВМ

При выборе рациональной схемы гидродифференциального выпрямителя момента инерционной передачи необходимо учитывать характерные особенности изготовления, эксплуатации и технические характеристики гидромашин, которые возможно использовать в качестве гидроМСХ.

Анализ теоретических исследований показывает, что применение в качестве МСХ аксиально- и радиально поршневых насосов неприемлемо, из-за их больших габаритов, массы, трудоемкости изготовления и высокой стоимости, хоть они и имеют высокий 0,97 – 0,98 объёмный КПД. Слабым местом аксиально-поршневых насосов, в силу специфики их конструктивных особенностей, является затруднительная установка соосно с валом-реактором 2 ИГТВМ. Исходя из этого, можно сделать вывод, что потребуется специальный привод гидроМСХ, который повлечёт за собой усложнение конструкции ИГТВМ и увеличение габаритных размеров.

Применение радиально-поршневых гидромашин позволит создать конструкцию, в которой вал привода будет служить одновременно реактором инерционно-импульсной передачи, т.е. обеспечивать соосность основного дифференциального механизма 4 и гидроМСХ. Однако, гидромашин такого типа обладают большими габаритами по сравнению с аксиальными, а так же имеют более высокие моменты инерции вращающихся частей, т.к. масса радиальной гидромашин примерно в два раза больше аксиальной, поэтому они менее приемисты и более тихоходны.

Применение винтовых, роторно-пластинчатых и др. типов гидромашин невозможно, т.к. они обладают сравнительно малым 0,6 – 0,95 объёмным КПД.

Наиболее подходящими для применения в гидродифференциальном выпрямителе момента являются шестеренные насосы с конструктивно улучшенными узлами радиальной и торцевой герметизации. Механический КПД таких гидромашин достигает значения 0,94, а объёмный – 0,98. В свою очередь, шестеренные гидромашин характеризует их простая конструкция, малая масса и минимальные габаритные размеры, при всех прочих равных условиях в сравнении с другими видами объёмных гидравлических машин. Отличительными чертами работы гидравлических МСХ являются высокая частота включений в единицу времени и большие динамические нагрузки на его звенья, что при длительной эксплуатации приводит к износу рабочих поверхностей шестерённых насосов, являющихся основой гидроМСХ, необратимому изменению свойств материалов деталей, старению и т. д. [5]. Все это увеличивает внутренние зазоры в гидромашине и утечки рабочей жидкости, т.е. обуславливает нарушение рабочего процесса и уменьшение общего КПД ИГТВМ.

Объёмные потери в шестеренном насосе обусловлены при нормальном режиме работы в основном утечками рабочей жидкости через радиальный зазор между дуговой поверхностью корпуса и внешней цилинд-

рической поверхностью шестерен, а так же через торцовый зазор между боковыми стенками корпуса и торцевыми поверхностями шестерен [6].

Полагая течение в щели между корпусом и головкой зуба ламинарным, можно записать, что утечка на единицу ширины ротора (радиальный зазор) равна

$$Q_{\text{ут}} = \frac{Sb}{2} \left(\frac{S^2 p}{6\mu l} - v \right), \quad (1)$$

где S – зазор между шестерней и уплотняющей частью корпуса насоса; b – ширина зубчатого колеса, т. е. длина зазора в направлении, перпендикулярном движению потока жидкости; p – перепад давления между полостью нагнетания и всасывания; μ – вязкость перекачиваемой жидкости; l – суммарная длина щели уплотнения, равная сумме толщин зубьев на радиусе выступов; v – скорость рабочей жидкости во всасывающей магистрали насоса [7]

$$v = \frac{Q_{\text{Т}}}{f_{\text{М}}} = \frac{2\pi}{f_{\text{М}}} nbm^2 \omega \left(z + 1 - \frac{\pi^2 \cos^2 \alpha}{12} \right),$$

где $Q_{\text{Т}}$ – расчетная геометрическая подача насоса; $f_{\text{М}}$ – площадь поперечного сечения всасывающей магистрали; n – число секций насоса; b – ширина шестерни; m – модуль шестерен насоса; $\omega = \dot{\varphi} / 2\pi$ – частота вращения шестерни; $\dot{\varphi}$ – угловая скорость шестерни; z – число зубьев шестерни; α – угол зацепления.

Из формулы (1) следует, что утечка рабочей жидкости зависит от скорости v . Это подтверждается экспериментом, результаты которого показывают (см. рис. 2) сильное влияние скорости на величину утечки рабочей жидкости. Кривые снимались при вязкости масла примерно $10 \text{ мм}^2/\text{с}$ [8].

Поскольку на утечки влияет также и температура рабочей жидкости (масла), в формулу (1) следует вводить среднее значение вязкости

$$\mu_{\text{ср}} = \frac{\mu_1 + \mu_2}{2},$$

где μ_1 и μ_2 – вязкости рабочей жидкости при фактических температурах соответственно на входе и на выходе из гидронасоса.

Повышение температуры Δt рабочей жидкости при проходе её через зазор можно вычислить (если допустить, что все развивавшееся при этом тепло аккумулируется в масле, т.е. отсутствует теплоотдача от масла к деталям агрегата) по формуле

$$\Delta t = \frac{p}{m c \gamma},$$

где p – потеря давления в зазоре; m – механический эквивалент тепла; c – удельная теплоемкость жидкости; γ – объёмный вес жидкости.

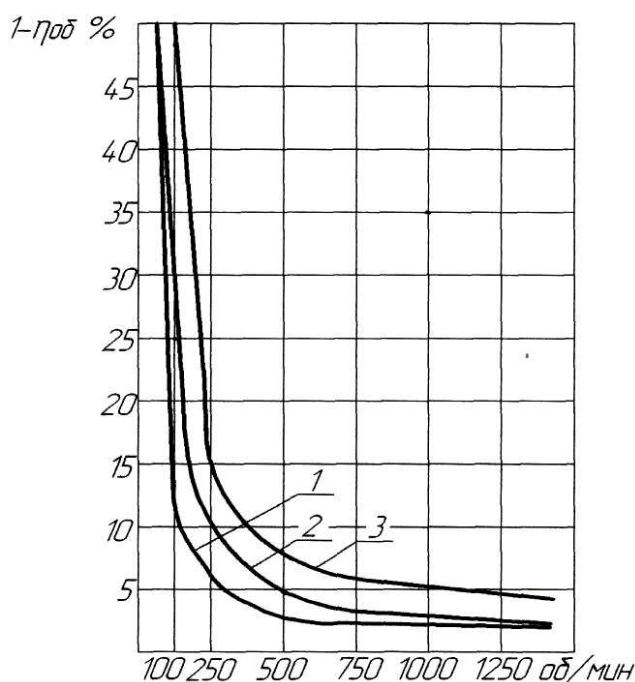


Рис. 2. Экспериментальный график зависимости величины утечки от скорости: 1 – при 70 °C; 2 – при 50 °C; 3 – при 25 °C

Опыты показали, что величина зазора S , вообще говоря, с повышением давления меняется вследствие деформации деталей, образующих зазор. Ввиду этого зависимость утечек от давления будет нелинейной. Однако в пределах применяющихся рабочих давлений изменение зазоров в насосах обычно незначительно, ввиду чего при расчете ими можно пренебречь.

На основании вышеизложенного можно сделать вывод, что применение шестеренных насосов в гидросистеме передачи, в сравнении с другими типами гидромашин, значительно повышает работоспособность, КПД и улучшает выходные характеристики ИГТВМ.

Список литературы

1. Гребеньков Д. В. Исследование влияния параметров износа на КПД инерционного гидродифференциального трансформатора вращающего момента // Вестник машиностроения. 2016. №4. С. 18 – 22.

2. Мироненко А.В., Гребеньков Д.В. Универсальный тягово-транспортный агрегат // Техника и технология. Актуальные научные проблемы. Рассмотрение, решение, практика: Сборник научных докладов. Варшава: Изд-во ООО “Диаманд Трейдинг тур”, 2015. С. 35 – 40.
3. Гребеньков Д. В. Метод прогнозирования технического ресурса инерционной гидродифференциальной автоматической передачи мобильных машин: дис. ... канд. техн. наук. М., 2005. 167 с.
4. Гребеньков Д. В. Гидродифференциальный выпрямитель момента инерционной автоматической передачи мобильных машин // Известия Московского государственного технического университета МАМИ. 2017. №2 (32). С. 25 – 30.
5. Гребеньков Д. В. Прогнозирование ресурса инерционного гидродифференциального выпрямителя момента мобильной машины // Вестник машиностроения. 2013. №2. С. 33 – 36.
6. Баженов С. П., Гребеньков Д. В. Объёмные утечки в гидравлических механизмах свободного хода // Успехи современного естествознания. 2003. №4. С. 74.
7. Баженов С. П., Гребеньков Д. В. Обоснование параметров гидросистемы выпрямителя момента инерционной бесступенчатой автоматической передачи // Современные наукоемкие технологии. 2004. №1. С. 46.
8. Перегудов, Н.Е. Исследование уплотняющего воздействия гусеничного движителя сельскохозяйственного трактора на почву и разработка метода его оценки: дис. ... канд. техн. наук. Мичуринск, 2016. 172 с.

Гребеньков Дмитрий Васильевич, канд. тех. наук, доц., greben80@rambler.ru, Россия, Липецк, Липецкий государственный технический университет

SELECTION OF POSITIVE-DISPLACEMENT PUMPS FOR HYDRAULIC SYSTEM INERTIAL GIDRODIFFERENTIAL TRANSFORMER TORQUE

D.V. Grebenkov

We study the problem of improving the reliability of transformer gidrodifferential inertial torque due to the application of the design of the rectifier most suitable for their characteristics of volumetric pumps used as freewheel. Experimental and calculated dependences determining volumetric losses in the pump are given.

Key words: inertial gidrodifferential transformer torque, hydromachine, freewheeling mechanism, leaks.

Grebenkov Dmitry Vasilevich, candidate of technical sciences, docent, greben80@rambler.ru, Russia, Lipetsk, Lipetsk State Technical University

УДК 620.424.1

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМА РАБОТЫ ПЕНДЖИКЕНТСКОЙ РЭС ПРИ НОРМИРОВАННОМ КОЭФФИЦИЕНТЕ ЗАГРУЗКИ ТРАНСФОРМАТОРОВ.

Ф.М. Разоков

Рассмотрены методы оптимизации режима работы питающей сети напряжением 110 кВ. Оптимизация была произведена на основе алгоритм расчетов, выполненных на ЭВМ. Методы оптимизации были выбраны по условиям правил технической эксплуатации и по правилам устройств электроустановок так, чтобы все электрические параметры были в пределах допустимых норм.

Ключевые слова: нормы потери, падение напряжения, питающий сеть, отклонение, метод, оптимизация, компенсация, электроснабжения, замкнутая схема.

Данный питающая сеть напряжением 110 кВ берет начало от подстанции «Айни-220 (Искодар)», которая питается по линии 220 кВ, образуя одностороннее питание. На схеме районной электрической сети (РЭС), (рис. 1) показана еще одна ГПП «Рудаки», которая раньше питалась из Узбекистана по линии напряжением 220 кВ, а по питающим линиям напряжением 110 кВ электрическая нагрузка была во много раз меньше, чем в настоящее время и РЭС была обеспечена двухсторонним питанием электроэнергией.

В данный момент Пенджикентская РЭС имеет одностороннее питание от ГПП «Айни-220(Искодар)». В режиме одностороннего питания надежность электроснабжения РЭС уменьшилось во много раз, а потери мощности и напряжения увеличились.

Рассмотрим режим работы сети, при котором коэффициент загрузки трансформатора считается нормотивным, то есть однострансформаторным ($K_z = 0,9$) и двухтрансформаторным ($K_z = 0,7$)[1]. В данной питающей сети напряжением 110 кВ насчитывается 10 подстанций с разным числом и мощностью трансформаторов. По значениям коэффициента загрузки и номинальной мощности трансформатора каждой подстанции можно определить величину нагрузки каждого трансформатора.

$$S_{наг} = S_{нт} * K_z * n; MVA,$$

где $S_{наг}$ – мощность нагрузки; $S_{нт}$ – номинальная мощность трансформатора; K_z – коэффициент загрузки трансформатора; n – число трансформаторов.

По рассчитанным нагрузкам можно рассчитать другие параметры линии на отдельных участках цепи. На рис. 2 показана расчетная схема, в которую введены все необходимые нам данные. Все расчеты параметров линии электропередачи согласно электроэнергетике (электрические сети и системы) и результаты расчета приведены в табл. 1[2].

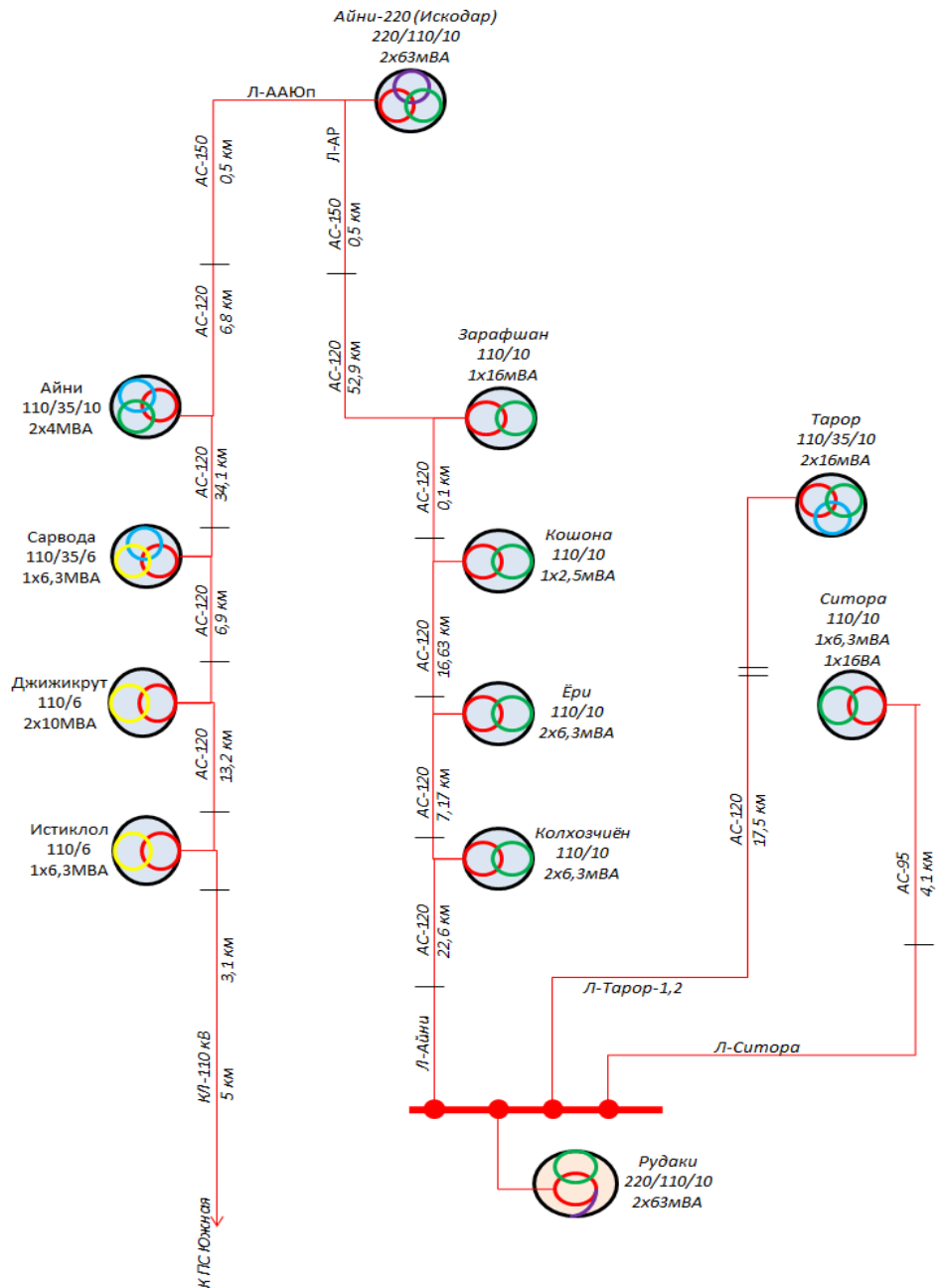


Рис. 1. Топологический модель РЭС

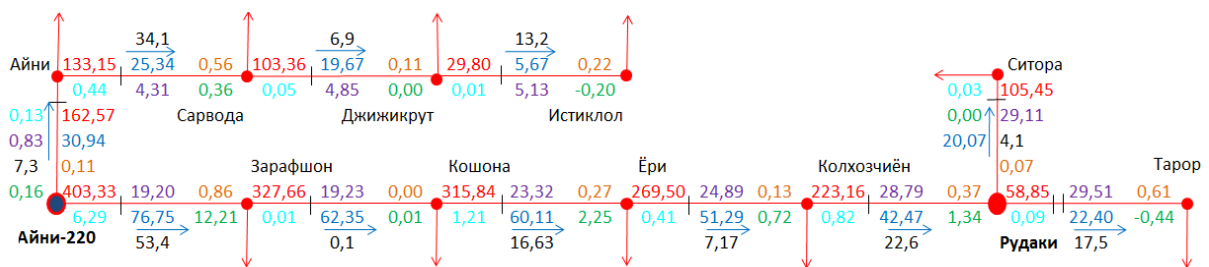


Рис. 2. Модель электрической питающей сети с одностороннем питанием

По табл. 1 видно, что процентное соотношение падения напряжения на каждом участке линии $\Delta U\%$ во многом превосходит максимально допустимые значения, а допустимое значение падения напряжения равно 5%[3]. Соответственно суммарное потери активной и реактивной мощности $\Sigma \Delta P\%$, $\Sigma \Delta Q\%$ превосходят допустимое значение. Если рассмотреть подробно падение напряжения от источника питания до последнего потребителя «Айни-220 – Тарор», то она равняется $\Delta U=29,51\%$, что почти в **6 раз** превосходит допустимое значение. Отсюда можно рассчитать результирующее напряжение на входе подстанции Тарор равное **81 кВ** вместо **115 кВ**. Это значительно влияет на пропускную способность линии и качество электроэнергии. Для подробного наблюдения за электрическими параметрами линии рассмотрим диаграмму потерь мощности и напряжения, зависящие от тока нагрузки потребителя электроэнергии (рис. 3).

Таблица 1

Рассчитанные параметры ВЛЭП до компенсации

Распределение мощности по участкам				Потери в линиях ЭП				Потери в процентах %		
Участок	S;MBA	I; A	Кз.л	ΔP ;МВт	ΔQ ;МВАр	ΔU ;кВ	$Q_{с.}$;МВАр	$\Delta U\%$	$\Sigma \Delta P\%$	$\Sigma \Delta Q\%$
Айни-220-Зараф.	76,75	403,33	0,57	6,29	12,21	21,12	0,86	19,20	10,33	29,32
Зарафшан-Кошона	62,35	327,66	0,86	0,01	0,01	0,03	0,00	19,23		
Кошона-Ёри	60,11	315,84	0,46	1,21	2,25	4,50	0,27	23,32		
Ёри-Колхозчиён	51,29	269,50	0,39	0,41	0,72	1,73	0,13	24,89		
Колхозч.-Рудаки	42,47	223,16	0,37	0,82	1,34	4,29	0,37	28,79		
Рудаки -Тарор	22,40	58,85	0,15	0,09	-0,44	0,79	0,61	29,51		
Рудаки-Ситора	20,07	105,45	0,32	0,03	0,00	0,35	0,07	29,11		
Айни-220-Айни	30,94	162,57	0,43	0,13	0,16	0,92	0,11	0,83		
Айни-Сарвода	25,34	133,15	0,35	0,44	0,36	3,83	0,56	4,31		
Сарвода-Джижик.	19,67	103,36	0,27	0,05	0,00	0,59	0,11	4,85		
Джижик.-Истиклол	5,67	29,80	0,08	0,01	-0,20	0,31	0,22	5,13		
Источник	Sn.тр	Sp	Кз.тр							
Айни-220	126	107,69	0,85							

Другая проблема в том, что источник питания данной сети «Айни-220 (Искодар)» с двумя силовыми автотрансформаторами по 63 МВА работает с коэффициентом загрузки равно $0,85 > 0,7$. Данный коэффициент загрузки автотрансформатора не соответствует по надежности электро-снабжения ПУЭ [1].

В таком режиме рассматриваемая РЭС нуждается в оптимизации электрических и неэлектрических параметров. Оптимизацию параметров данной сети в действующем режиме, можно выполнить следующими методами:

1. изменения сечения провода ЛЭП;
2. изменения числа цепей в ЛЭП;
3. управления потоками реактивной мощности;
4. изменения схемы электроснабжения.

На рис. 4 показана модель схемы с односторонним питанием, после оптимизации параметров. В целях оптимизации применены следующие меры:

установка поперечного компенсирующего устройства (КУ) для подстанций (Зарафшон, Ёри, Колхозчиен, Ситора, Тарор), где потребляемая реактивная мощность больше, чем на других подстанциях[4]. Значение мощности КУ показана на рис. 4.

изменение действующего сечения провода на отдельном участке линии. Сечения провода на участках Айни-220 – Зарафшон изменен с АС-120 на АС-300, Кошона – Ёри с АС-120 на АС-240, Колхозчиён – Рудаки с АС-120 на АС-240 мм². Участки с измененными сечениями выделены на рис. 4;

изменение числа цепей на определенном участке линии, например: участок сети Айни-220 – Зарафшон.

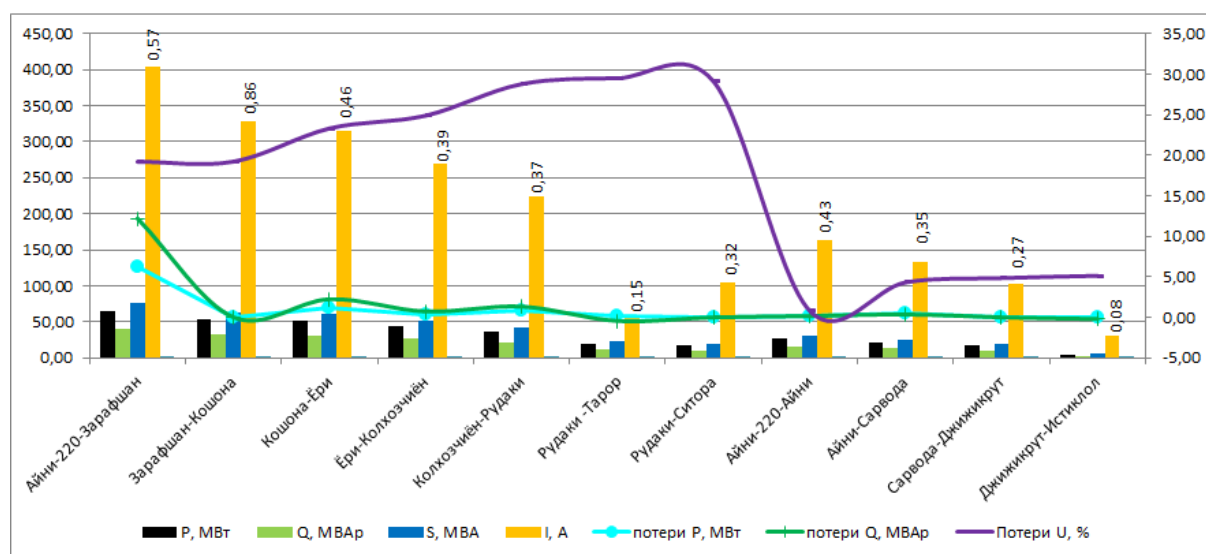


Рис. 3. Диаграммы зависимости потерь мощности и напряжения в сети от тока нагрузки, до оптимизации

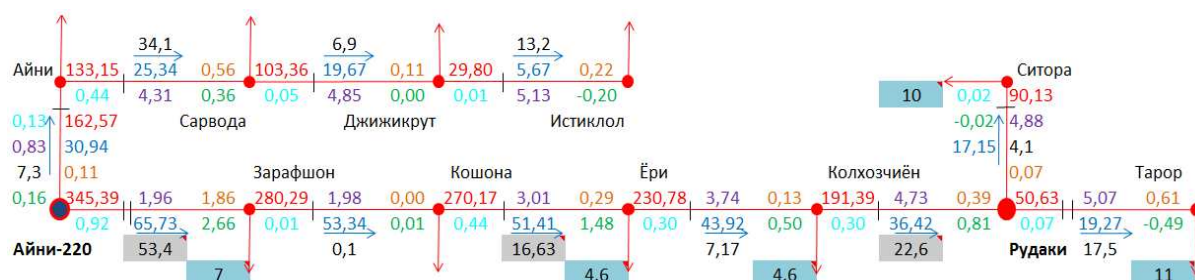


Рис. 4. Модель электрической питающей сети с односторонним питанием после оптимизации

Все расчеты по оптимизации РЭС в данном режиме приведены в табл. 2 и отражены в модели схемы электроснабжения (рис. 4). После установления оптимизирующих устройств электрические параметры линии

пришли в допустимое состояние. Например: результирующее падение напряжения на каждом участке линии и суммарные потери активной мощности теперь как видно из табл. 2 не превосходят 5%.

Рассмотрим другой вариант оптимизации параметров сети методом изменения схемы РЭС. Данный метод позволяет получить двухстороннее питание на тех участках, на которых идет большая потеря электроэнергии. Модель сети показана на рис. 5. Как показано на рис. 5: если от линии напряжением 220 кВ (ГПП Айни-220) провести линию до ГПП Рудаки, запитанную ранее из Узбекистана, то получатся снова два источника питания для всех потребителей Пенджикентской РЭС. Теперь потребители подстанции Зарафшон, Кошона, Ёри, Колхозчиён питаются от двух источников **Айни-220** и **Рудаки**, а подстанции Ситора и Тарор приближались к источнику питания. Такая схема питания позволяет уменьшить потери электроэнергии и падение напряжения в ЛЭП без установки компенсирующих устройств, изменение сечения проводов и без изменения число цепей. Все результаты расчетов по измененной схеме (рис. 5) приведены в табл. 3. Диаграммы изменении таких электрических величин как потери мощности и напряжение в ЛЭП приведены на рис. 6 [5].

Таблица 2

**Рассчитанные параметры ВЛЭП
после оптимизация 1,2,3 методами**

Распределение мощности по участкам				Потери в линиях ЭП				Потери в процентах %		
Участок	S:МВ А	I: А	Кз. л	ΔP ;МВ т	ΔQ ;МВА р	ΔU ;к В	Q_c ;МВА р	ΔU %	$\Sigma \Delta P$ %	$\Sigma \Delta Q$ %
Айни-220-Зараф.	65,73	345,3 9	0,50	0,92	2,66	2,16	1,86	1,96	2,94	9,44
Зарафшан-Кошона	53,34	280,2 9	0,74	0,01	0,01	0,01	0,00	1,98		
Кошона-Ёри	51,41	270,1 7	0,44	0,44	1,48	1,14	0,29	3,01		
Ёри-Колхозчиён	43,92	230,7 8	0,61	0,30	0,50	0,81	0,13	3,74		
Колхозч.-Рудаки	36,42	191,3 9	0,31	0,30	0,81	1,09	0,39	4,73		
Рудаки -Тарор	19,27	50,63	0,13	0,07	-0,49	0,37	0,61	5,07		
Рудаки-Ситора	17,15	90,13	0,27	0,02	-0,02	0,16	0,07	4,88		
Айни-220-Айни	30,94	162,5 7	0,43	0,13	0,16	0,92	0,11	0,83		
Айни-Сарвода	25,34	133,1 5	0,35	0,44	0,36	3,83	0,56	4,31		
Сарвода-Джижик.	19,67	103,3 6	0,27	0,05	0,00	0,59	0,11	4,85		
Джижик.- Истиклол	5,67	29,80	0,08	0,01	-0,20	0,31	0,22	5,13		
Источник	Sn.тр	Sp	Кз.тр							
Айни-220	126	93,88	0,75							



Рис. 5. Модель электрической питающей сети с двухсторонним питанием

После замены разомкнутой схемы на замкнутую, как видно из табл. 3 электрические нагрузки десяти подстанций почти равномерно распределились по двум источникам питания, (**Рудаки** и **Айни-220**). В связи с этим положением на линии резко снизился максимальный протекающий ток на четыре раза и коэффициенты загрузки трансформаторов двух источников почти сравнялись и стали меньше 0,7. Сравним две схемы: замкнутая (рис. 5) и разомкнутая (рис. 2). По нему видно, что в отличие от одностороннего питания при двухстороннем, все потери электрических величин ниже допустимого значения. Преимущество замкнутой схемы в том, что электрические нагрузки почти равномерно распределяются по всей длине линии.

Таблица 3

**Рассчитанные параметры ВЛЭП
после оптимизации четвертым методом**

Распределение мощности по участкам				Потери в линиях ЭП				Потери в процентах %		
Участок	S:МВ А	I: А	Кз. л	ΔP:МВ т	ΔQ:МВА р	ΔU:к В	Qс:,МВА р	ΔU %	ΣΔP %	ΣΔQ %
Айни-220-Зараф.	21,92	115,1 7	0,30	0,51	0,20	5,10	0,86	4,63	1,09	-2,10
Зарафшан-Кошона	7,52	39,52	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	4,64		
Кошона-Ёри	5,27	27,70	0,07	0,01	-0,25	0,36	0,27	4,97		
Ёри-Колхозчиён	3,55	18,66	0,05	0,00	-0,12	0,11	0,13	1,17		
Колхозч.-Рудаки	12,37	65,01	0,17	0,07	-0,22	1,18	0,37	1,07		
Рудаки -Тарор	22,40	58,85	0,12	0,09	-0,44	0,79	0,61	0,72		
Рудаки-Ситора	20,07	105,4 5	0,28	0,03	0,00	0,35	0,07	0,32		
Источник	Sn.тр	Sp	Кз.тр							
Айни-220	126	52,86	0,42							
Рудаки	126	54,84	0,44							

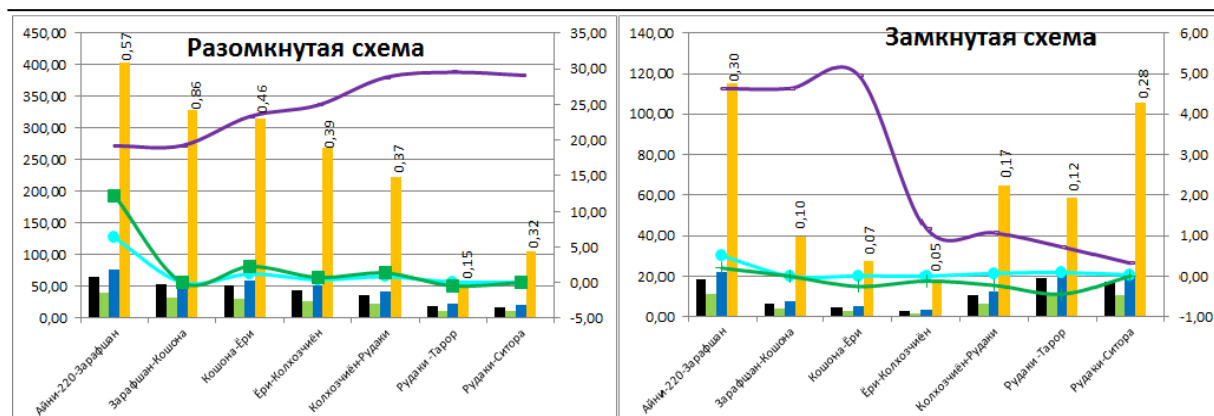


Рис. 6. Диаграммы зависимости потерь мощности и напряжения в сети от тока нагрузки, до и после оптимизации.

Рассмотренные нами варианты оптимизации систем электроснабжения Пенджикентского РЭС, вполне выполнимый. По нашему мнению четвертый вариант более приемлем, чем остальные потому, что в этом случае все электрические параметры ЛЭП соответствуют допустимым значениям. без установки компенсирующих устройств, изменения число цепей и сечений проводов. Кроме того, при выборе замкнутой схеме РЭС повышается надежность электроснабжения.

Список литературы

1. Трансформаторные подстанции в системах электроснабжения [Электронный ресурс] URL: [http:// electricalschool.info/main/elsnabg/368-transformatornye-podstancii-v-sistemakh.html](http://electricalschool.info/main/elsnabg/368-transformatornye-podstancii-v-sistemakh.html) (дата обращения: 10.02.2018).
2. Идельчик В.И. Электрические сети и системы: учебник для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1989. 592 с.
3. Определение допустимой потери напряжения в сети [Электронный ресурс] URL: <http://engineeringsystems.ru/elektrosnabjenie-sh/opredelenie-dopustimoy-poteri-naprjajenija.php> (дата обращения: 10.02.2018).
4. Компенсация реактивных мощностей [Электронный ресурс] URL: <http://leg.co.ua/stati/podstancii/kompensaciya-reaktivnyh-moschnostey.html> (дата обращения: 10.02.2018).
5. Ананичева С.С., Мызин А.Л. Методы анализа и расчета замкнутых электрических сетей: учебное пособие. Екатеринбург, 2012. 94 с.

Разоков Фарход Музаффарович, allpower85@mail.ru, Россия, Чебоксары, Чувашский государственный университета имени И.Н. Ульянова

OPTIMIZATION OF THE MODE OF WORK OF PENJIKENT DEN
AT UNDERGROUND TRANSFORMERS LOAD FACTOR

F.M. Razoqov

The methods of optimization of the operating mode of the supply network with a voltage of 110 kV are considered. Optimization was carried out on the basis of the algorithm of calculations performed on a computer. Optimization methods were chosen according to the rules of the technical operation rules and the rules of electrical installation devices so that all electrical parameters were within the permissible norms.

Key words: loss rates, voltage drop, supply network, deviation, method, optimization, compensation, power supply, closed circuit.

Razokov Farhod Muzaffarovich, allpower85@mail.ru, Russia, Cheboksary, Chuvash State University named after I.N. Ulyanova

УДК 621.3

**РАСЧЁТ УЩЕРБОВ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА
МОСКОВСКОГО МЕГАПОЛИСА ОТ ОПАСНЫХ
КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ**

Е.Г. Гашо, С.В. Гужов, А.А. Кролин, А.В. Началов

В работе приведён анализ потока отказов электрооборудования передающих сетей на основе статистических данных для московского энергоузла. Качественно и количественно показаны функции корреляции частот возникновения ОПЯ и потока отказов групп электрооборудования электросетевых организаций.

Ключевые слова: опасные климатические явления, перерыв электроснабжения, воздушная и кабельная линия электропередач, многофакторный регрессионный анализ.

Во всем мире особое внимание при обеспечении безопасных и комфортных условий проживания в мегаполисах уделяется вопросам сбалансированности долгосрочного экономического и технологического развития с социальными аспектами при снижении негативного антропогенного воздействия на окружающую среду. Само существование мегаполиса оказывает существенное влияние на воздействующие на его объекты климатические факторы. Важную роль играет уровень разработки и внедрения научно-обоснованного комплекса мер по адаптации к опасным климатическим явлениям (ОПЯ). Степень воздействия изменяющегося климата на городскую систему электроснабжения до сих пор исследована недостаточно.

Сложный характер зависимостей от климатических факторов функций потоков отказов структурных составляющих передающих электрических сетей и их элементов, а также неопределённость и сложность формализации задачи прогнозирования частот возникновения ОПЯ определяют актуальность разработки современных расчетных методов.

Электроэнергетический комплекс Москвы и Московской области включают 576 электрических подстанций 110-750кВ, оборудование, относящееся к объектам диспетчеризации Московского РДУ, находится на 392 подстанциях. Всего на территории города Москвы находятся 169 ПС напряжением 110-220-500кВ, принадлежащих филиалу ПАО «ФСК ЕЭС» «Магистральные электрические сети Центра» (МЭС Центра), ПАО «МОЭСК», АО «ОЭК», АО «Энергокомплекс», в том числе 4 ПС напряжением 500кВ, 54 ПС напряжением 220кВ, 111 ПС напряжением 110кВ. На территории Московской энергосистемы расположено 1044 ВЛЭП напряжением 110-750 кВ. Общая протяженность воздушных линий электропередачи (ВЛЭП) всех классов напряжения в городе Москве составляет 99 049 км. Суммарное потребление электрической энергии энергоузла Москвы и Московской области в 2016 году составило 105333,6 млн. кВт·ч.

Средний уровень износа электрических сетей города Москвы составляет 59,2%. С увеличением уровня физического износа увеличивается подверженность ВЛЭП воздействию климатических факторов. При превышении пороговых значений прочностных нагрузок возможно нарушение электроснабжения, приводящее к недоопуску электрической энергии и дополнительным расходам на восстановление целостности системы электроснабжения. В работе проведен статистический анализ комплексных воздействий опасных погодных явлений (ОПЯ) [1] на составляющие электротехнического комплекса города Москвы.

В соответствии со статистикой отказов ПАО «МОЭСК» [2] на ВЛЭП среднего и высокого уровней напряжений для всех перерывов в энергоснабжении можно выделить три основных группы по причинам их возникновения:

- несанкционированные действия (человеческий фактор);
- грозовые перенапряжения;
- ОПЯ, за исключением грозовых явлений.

В дальнейшем будет проводиться анализ воздействия на ВЛЭП без учёта грозовых явлений. Данное предположение допустимо, поскольку после ликвидации перерыва в электроснабжении от грозовых явлений в большинстве случаев проведение аварийно-восстановительных работ на конструктивных элементах линий не требуется [2]. С учётом старения и низких скоростей обновления инфраструктуры выходят на первый план климатические факторы снижения надёжности ВЛЭП [3]. Существует несколько основных причин перерыва электроснабжения в результате ОПЯ.

В соответствии со статистикой отказов ПАО «МОЭСК» наиболее частой причиной нарушения процесса электропередачи является падение дерева из глубины леса с последующим прекращением электроснабжения посредством: падения на провода ВЛ в пролете опор и нарушения крепления проводов к изоляторам на соседних опорах; обрыва проводов в пролёте опор; повреждения опоры; возникновения короткого замыкания и последующего автоматического отключения ВЛ.

Данные по отказам воздушных сетей до 110 кВ, принадлежащих ПАО «МОЭСК», подтверждаются статистикой отключений магистральных линий напряжением 220 и 500 кВ ПАО «ФСК ЕЭС» - МЭС Центра, с той лишь разницей, что за последние 20 лет ни одного падения опор данных ЛЭП в результате воздействия погодных явлений в московском регионе зарегистрировано не было. При этом большинство случаев проведения аварийно-восстановительных работ на магистральных ВЛЭП связано с так называемыми «несанкционированными действиями» (наезд техники на опору, незаконная рубка дерева с дальнейшим его падением на линию или опору и т.д.).

Причиной нарушения электроснабжения могут быть сильное гололедно-изморозевое отложение (ледяной дождь), сильный ливневый дождь, очень сильный снег, приводящие к налипанию снега и утяжелению пролётов с последующим аварийным отключением (АО) ВЛЭП и обрывом проводов.

Чрезмерная ветровая нагрузка является причиной инициации целого ряда причин нарушения электроснабжения. Наиболее частым является нахлест сильным ветром проводов на окружающие предметы (дерево) из-за недопустимого снижения дистанции короткого замыкания. Пролонгированным во времени является ослабление и/или нарушение механической прочности опор, проводов, изоляторов из-за вибрации и «пляски» проводов, что приводит к их ускоренному разрушению.

В период существенного снижения температур окружающего воздуха ($\leq -30^{\circ}\text{C}$) сильные тряска и вибрация, усиливающие натяжение проводов, в сочетании с изменением прочностных свойств элемента вязки проводов по причинам износа, окисления, вибрации ветровыми нагрузками приводят к ослаблению узлов соединения с последующим разрывом цепи. Данный механизм возникает также при относительно небольших морозах, но при достаточно сильном ветре. В таком случае значения эффективной температуры с учетом охлаждающего эффекта ветра рассчитывается по формуле [4]:

$$t_{\text{эфф}} = 13.12 + 0.6215 t_{\text{в}} - 11.37 v^{0.16} + 0.3965 t_{\text{в}} v^{0.16}, \quad (1)$$

где $t_{\text{эфф}}$ - эффективная температура с учетом ветра в $^{\circ}\text{C}$; $t_{\text{в}}$ - температура воздуха в $^{\circ}\text{C}$; v - скорость ветра в км/час. Например, при скорости ветра 20 м/с (сильный ветер) и температуре воздуха -20°C $t_{\text{эфф}} = -30^{\circ}\text{C}$,

при скорости ветра 25 м/с (сильный ветер) и температуре воздуха -25°C $t_{\text{эфф}} = -45^{\circ}\text{C}$, а при скорости ветра 30 м/с (ураган) и температуре воздуха -30°C $t_{\text{эфф}} = -53^{\circ}\text{C}$.

Сильная мгла, характеризующаяся сильным помутнением воздуха за счет скопления мельчайших частиц воды, пыли, продуктов горения, является причиной загрязнения поверхности изолятора частицами с низким электрическим сопротивлением с последующим развитием пробоя по поверхности, приводящим к АО. К аналогичным последствиям, комбинированным с повышенными токами утечки неизолированных проводников, приводит 100%-ая влажность воздуха.

Надёжность передачи электрической энергии по ВЛЭП зависит от надёжности изоляторов, применяемых в распределительных сетях. Отказ линейной изоляции вызывает до 40% всех отключений в распределительных сетях 10 кВ, что объясняется наличием у многих изоляторов заводских дефектов, а также их дополнительным внесением при транспортировке. Отказ изоляторов наиболее часто происходит по причине воздействия механических нагрузок от проводов или из-за электрического пробоя по поверхности, возникающего, например, по причине сильного загрязнения поверхности. Дуга однофазного короткого замыкания может устойчиво гореть при токах порядка 5 А, вызывая при этом полное разрушение изолятора за 1 мин. При воздействии дуги междуфазного КЗ разрушение происходит за 1,5–2 с. [5]. Несколько ускоренное старение изоляции также происходит в период существенных среднесуточных колебаний температуры воздуха и наибольшим среднемесячным количеством осадков.

Интенсивность климатического воздействия достигает максимума в период гололёдообразования, когда воздействие электромагнитного поля на образование гололёдных отложений на воздушных линиях электропередачи особенно велико [6]. Скорость и направление ветра играют немаловажную роль в формировании структуры отложения. При определённых условиях ветер может способствовать слиянию мелких капель в крупные, что влияет на вес образовавшегося осадка [7].

Кабельные линии электропередач (КЛЭП) составляют значительную часть распределительной сети московского энергетического узла. Анализ статистической информации о потоке отказов КЛЭП 6 (10) кВ показал, что практически все пробой изоляции наблюдаются в период до достижения гарантированного срока службы (рис. 1). На срок службы силовых кабелей 6 (10) - 35 кВ по анализируемым городским электрическим сетям оказывают влияние: глубина прокладки; траектория прокладки; пересечение с объектами; особенности грунта; качество прокладки; качество сопряжения элементов сети, а также режимы эксплуатации, которые в комбинации с электромагнитными и тепловыми процессами в изоляции могут приводить к условиям преждевременных пробоев изоляции.

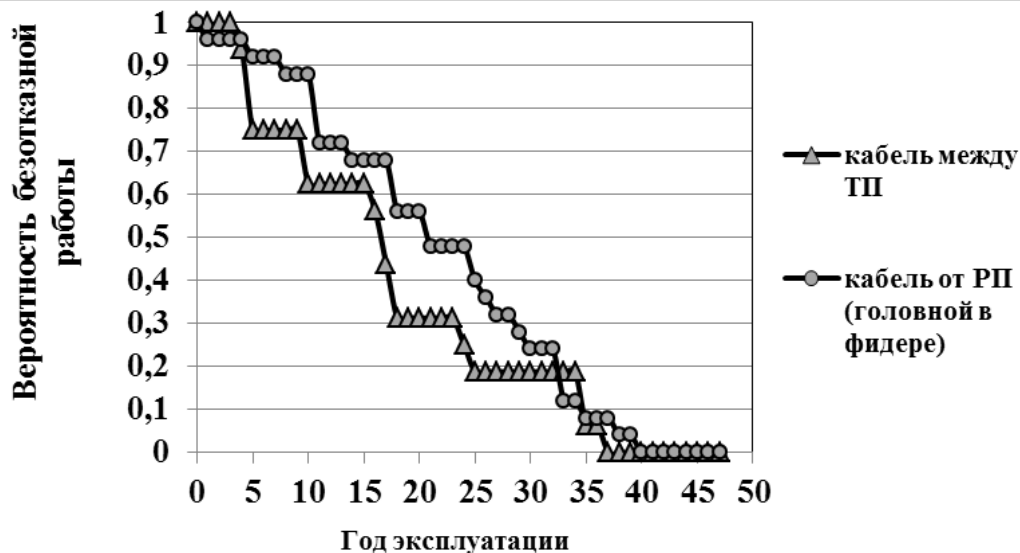


Рис. 1. Статистика отказов КЛЭП [8]

Статистика ПАО «МОЭСК» насчитывает в среднем около 9 тыс. случаев выходов из строя участков КЛЭП за год. Климатическое воздействие на КЛЭП характеризуется повышенной влажностью грунта, приводящей к ускоренной коррозии и гниению подземных элементов, электрическим пробоям в кабельных муфтах и на концевых воронках. Анализ потока отказов КЛЭП не выявил зависимости от ОПЯ.

Трансформаторные подстанции (ТП) и распределительные устройства (РУ) являются устройствами с повышенными требованиями к резервированию и надёжности. К основным причинам снижения их надёжности от климатических явлений относятся:

сильное натяжение шлейфа между масляным выключателем и выносным трансформатором тока на фазе в условиях температуры наружного воздуха ниже - 30°C, приводящее к возникновению усилий, действующих на верхнюю часть фарфоровой крышки МВ с последующим её изломом;

сильная мгла как причина загрязнения поверхности изолятора частицами с низким электрическим сопротивлением с последующим развитием пробоя по поверхности, приводящим к АО;

аномально жаркая погода с повышенной температурой воздуха, приводящая к сверхнормативному перегреву масла и снижению его эксплуатационных свойств, а также к возможному выходу трансформатора из строя;

повышенная влажность воздуха, вызванная сильным ливнем, очень сильным ливневым дождём, продолжительным сильным дождём, которая изменяет электротехнические свойства трансформаторного масла, что приводит к несколько увеличенным собственным потерям силового трансформатора.

Вместе с этим, анализ электронных журналов отказов ПАО «МОЭСК» не выявил корреляции потока отказов с фактами ОПЯ.

Статистика работы релейной защиты и автоматики в распределительных сетевых компаниях анализируется в большей степени по количеству случаев зафиксированных отказов и сбоев (рис. 2).

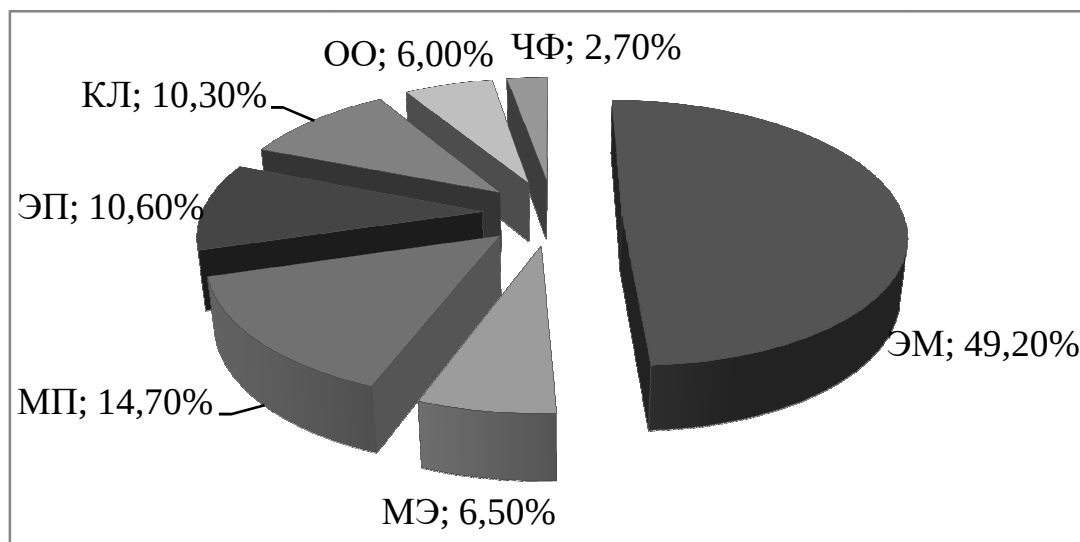


Рис. 2. Статистика отказов устройств релейной защиты и автоматики [9]

Здесь ЭМ – дефекты электромеханических реле; МЭ – дефекты микроэлектронных устройств, включая устройства на полупроводниковых элементах, интегральных логических микросхемах малого и среднего уровня интеграции, сюда же отнесены аналоговые измерительные приборы и измерительные преобразователи; МП – дефекты устройств на базе микропроцессоров и микроконтроллеров; ЭП – дефекты устройств электропитания и коммутационных аппаратов в цепях электропитания, включая автоматические выключатели в цепях ТН, блоки конденсаторов и другие устройства на базе силовой электроники; КЛ – дефекты во вторичных цепях, включая повреждения контрольных кабелей, монтажных проводов, клемм, ключей, переключателей, накладок, вводно-испытательных блоков, блок-контактов приводов; ОО – дефекты основного оборудования, включающих и отключающих электромагнитов коммутационных аппаратов, механические повреждения приводов коммутационных аппаратов; ЧФ – дефекты, возникшие из-за прямого или косвенного воздействия человеческого фактора, в том числе случаи выхода микропроцессорных УРЗА из-за попадания внутрь осадков, дефектов вследствие ошибок при выполнении монтажных работ, ошибок в расчетах уставок, в результате неудачных схемных решений, механических повреждений корпусов МП и МЭ устройств, а также механические повреждения открыто установленных контрольных приборов.

В журналах учета данные нарушения обычно отнесены к дефектам микропроцессорных устройств. Значительную роль также играет человеческий фактор. Статистика воздействия погодно-климатических факторов на работу РЗА исчезающе мала и в дальнейшем не учитывается.

Существует косвенное воздействие сильного мороза и аномально холодной погоды на все элементы сети, обусловленное компенсацией снижения температуры в зданиях посредством использования электрических обогревательных приборов. Увеличение электрической нагрузки в передающих сетях приводит к пропорциональному увеличению омических потерь, составляющих для электрических сетей г. Москвы 0,4% от объёмов электропотребления. Также существует косвенное воздействие аномально жаркой погоды и сильной жары, обусловленное компенсацией существенного превышения температуры в зданиях посредством использования электрических кондиционеров. Увеличение электрической нагрузки в передающих сетях приводит к пропорциональному увеличению омических потерь, составляющих для электрических сетей г. Москвы до 8% от объёмов электропотребления. Информация рассчитана на основании усреднённых данных ежемесячных отчетов о функционировании электроэнергетики. Например, по данным за январь 2016г превышение электропотребления относительно предыдущего года составило 0,3% [10], превышение электропотребления в июне 2010г. составило 6% [11]. Объёмы электропотребления получены на основании данных ПАО «МОЭСК» [12].

Статистика отказов элементов передающей электросети демонстрирует наибольшую зависимость от ОПЯ воздушных линий электропередач различных уровней напряжений. В таблице 1 представлены агрегированные данные для общей протяженности ВЛЭП на территории Москвы, включая ТиНАО. Необходимо отметить, что многие из перечисленных факторов являются косвенными и не всегда учитываются в статистике отказов работы ВЛЭП. Так, все варианты последствий, вызванные падениями деревьев из глубины леса, сведены в исходной статистической документации ПАО «МОЭСК» к факту фиксации КЗ. По аналогичным причинам явления «падение дерева», «очень сильный снег, приводящий к утяжелению пролётов проводов», «ледяной дождь», «обрыв по причине порывов ветра с учётом эффективной температуры» и «сильный ливневый дождь, приводящий к утяжелению пролётов проводов» учтены совместно в графе «ветровая нагрузка».

Применив многофакторный регрессионный анализ [13] получим расчётные функции статистики отказов в зависимости от факторов опасных климатических явлений для случаев:

1) обрыв проводов высоковольтной распределительной сети до 110кВ включительно (рис. 3)

$$y_1=836.8-34.4x_1+38.8x_2,$$

где x_1 - частота фиксации групп климатических факторов: мокрый снег, гололед, изморозь, ледяной дождь, ед./год; x_2 - частота фиксации групп климатических факторов: сильный ветер, ураган, шквал, ед./год.

2) обрыв проводов магистральных ЛЭП свыше 220кВ (рис. 4):

$$y_2 = 26.026 x_1^{0.0216}$$

3) Омические потери в передающих сетях в периоды аномально холодной погоды:

$$y_3 = 0,273 x_3,$$

где x_3 – число суток аномально холодной погоды с учётом фактора эффективной температуры.

4) Омические потери в передающих сетях в периоды аномально жаркой погоды

$$y_4 = 5.468 x_4,$$

где x_4 – число суток аномально жаркой погоды с учётом волн городского тепла.

Таблица 1

Последствия воздействия ОПЯ на элементы электрической распределительной сети Москвы с учётом ТиНАО

№	Причина	Частота отказов						
		2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
1.	Число обрывов проводов в результате высоких ветровых нагрузок для ВЛЭП до 110кВ включительно, шт.	1784	1803	68	277	301	659	582
2.	Число обрывов проводов в результате высоких ветровых нагрузок для ВЛЭП 220кВ и 500 кВ, шт.	30	25	19	14	1	3	2
3.	Омические потери в сетях как следствие аномально холодной погоды, 10^6 кВт*ч	6.56	8.20	7.66	3.83	6.29	5.47	4.37
4.	Омические потери в сетях как следствие аномально жаркой погоды, 10^6 кВт*ч	262.5	87.5	43.7	32.8	76.6	32.8	27.3

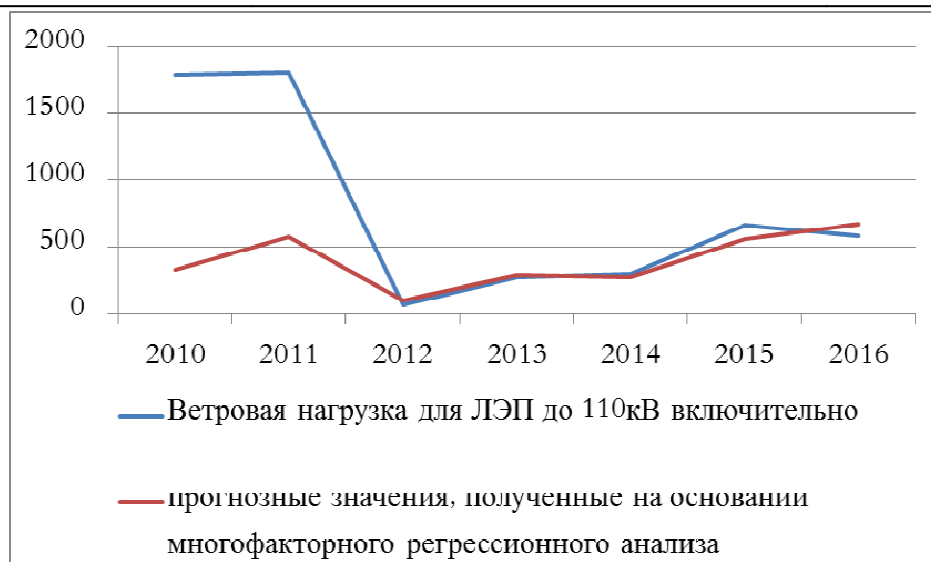


Рисунок 3. Прогнозное и фактическое значения частоты обрывов проводов высоковольтной распределительной сети до 110кВ

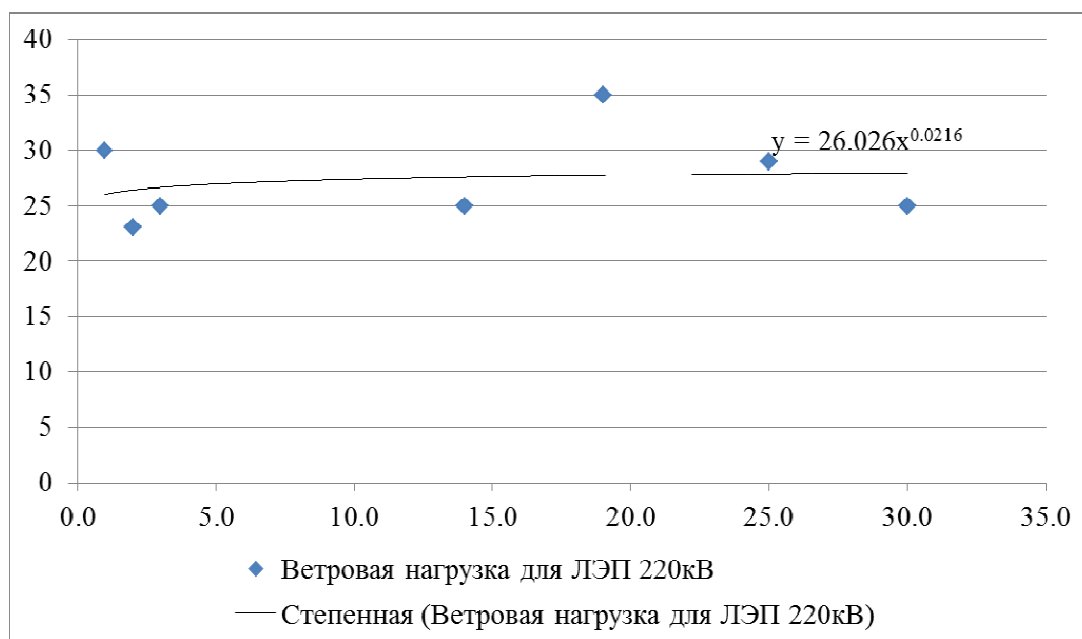


Рисунок 4. Прогнозное и фактическое значения частоты обрывов проводов высоковольтной распределительной сети выше 220кВ

Функциональные зависимости, выведенные для уровня достоверности 95%, позволяют провести оценку интенсивности отказов высоковольтных распределительных сети до 110кВ и магистральных сетей выше 220кВ вследствие обрывов проводов от ОПЯ. Полученные линейные зависимости дополнительных омических потерь в передающих сетях при волнах тепла и холода помимо статистических данных могут быть подтверждены корреляцией с законом Ома для участка цепи.

Полученные данные по числу отказов в работе линий в результате опасных погодных явлений, связанные с необходимостью замены проводов и изоляторов на ВЛЭП, могут быть использованы для количественной оценки уязвимости электросетевого хозяйства московского энергоузла к проявлениям изменения климата и связанного с ними ущерба.

Предложенный метод позволяет выполнять прогнозирование интенсивности отказов воздушных высоковольтных линий до 110кВ и выше 220кВ для московского энергоузла. По сравнению с существующими прогнозными моделями полученные зависимости позволяют быстро оценить граничные значения потоков отказов линий электропередач и дополнительных омических потерь и определить приоритетные адаптационные мероприятия по предотвращению и компенсации ущерба.

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда, проект № 16-19-10568: «Исследование общих закономерностей и особенностей развития городских энергосистем в различных социально-экономических и природно-климатических условиях».

Список литературы

1. Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации [Электронный ресурс] URL: <http://meteo.ru/data> (дата обращения 01.10.2017).
2. Публичное Акционерное Общество «Московская объединенная электросетевая компания», раздел «Отключения» [Электронный ресурс] URL: <http://www.moesk.ru/client/disconnection/#tab-otchet> (дата обращения 01.10.2017).
3. Доронина О.И. Информационно-измерительная система мониторинга надёжности воздушных линий электропередач: дис. канд. техн. наук. Волгоград, 2014. 137 с.
4. Охлаждающий эффект ветра. Влияние скорости ветра на ощущаемую (эффективную, действующую) температуру воздуха и конвекционный теплообмен [Электронный ресурс] URL: <http://tehtab.ru/Guide/GuideTricks/WindChillingEffect/> (дата обращения 01.10.2017).
5. Рыбаков Л.М., Иванова З.Г. Прогнозирование отказов и планирование резерва запасных элементов, аппаратов и оборудования распределительных электрических сетей 10кВ / Вестник Чувашского университета, 2015. № 1. С. 104-11.
6. Панасенко М.В., Ахмедова О.О., Сошинов А.Г. Анализ воздействия электромагнитного поля на образование гололёдных отложений на воздушных линиях электропередачи // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований, 2015. N 9. С. 210-214.

7. Панасенко М.В., Шевченко Н.Ю., Хромов Н.П., Сошинов А.Г. Мероприятия по снижению гололёдно-ветровых аварий в электрических сетях // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2014. N 8. С. 30-37.

8. Коржов А.В. Методы и модели оценки состояния изоляции и электробезопасности кабельных линий 6 (10) кВ городских электрических сетей: моногр. / А.В. Коржов, А.И. Сидоров. Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ, 2009. 252 с.

9. Шапаренко В.С. Краткий анализ статистики дефектов и случаев неправильной работы устройств релейной защиты и автоматики на разнотипной элементной базе в региональной сетевой компании // журнал Электро 2/2017. С. 28-35.

10. Министерство энергетики Российской Федерации. Ежемесячный отчет о функционировании электроэнергетики за январь 2017 года [Электронный ресурс] URL: <http://minenergo.gov.ru/system/download-pdf/4858/71664> (дата обращения 01.10.2017).

11. Пик электропотребления в Москве из-за жары сместился на середину дня [Электрон. ресурс] URL: <https://ria.ru/moscow/20100714/254680622.html> (дата обращения 01.10.2017).

12. Публичное Акционерное Общество «Московская объединенная электросетевая компания», раздел «Объём переданной электроэнергии» [Электрон. ресурс] URL: http://www.moesk.ru/client/electricity_transmission/index_OPE.php (дата обращения 01.10.2017).

13. Гужов С.В. Методы определения и способы подтверждения энергосберегающего эффекта при передаче и использовании электрической и тепловой энергии: учебно-методическое пособие. М.: Издательство МЭИ, 2016. 112 с.

Гашо Евгений Геннадьевич, канд. техн. наук, доц., 290461@bk.ru, Россия, Москва, Национальный исследовательский университет "МЭИ",

Гужов Сергей Вадимович, канд. техн. наук, доц., зам. начальника отдела, GuzhovSV@yandex.ru, Россия, Москва, Национальный исследовательский университет "МЭИ",

Кролин Александр Александрович, канд. экон. наук, начальник отдела, akrolin@mail.ru, Россия, Москва, Национальный исследовательский университет "МЭИ",

Началов Александр Владимирович, главный специалист, nachalov@mes-centra.ru, Филиал ПАО «ФСК ЕЭС» - МЭС Центра

CALCULATION OF DAMAGE TO THE ELECTRICAL COMPLEX OF THE MOSCOW
METROPOLIS FROM DANGEROUS CLIMATE CHANGES

E.G. Gasho, S.V. Guzhov, A.A. Krolin, A.V. Nachalov

Gasho Evgeniy Gennadievich, candidate of technical sciences, docent, 290461@bk.ru, Russia, Moscow, National Research University "MEI",

Guzhov Sergey Vadimovich, candidate of technical sciences, docent, deputy head of department, GuzhovSV@yandex.ru, Russia, Moscow, National Research University "MEI",

Krolin Alexander Aleksandrovich, candidate of economic sciences, head of department, akrolin@mail.ru, Russia, Moscow, National Research University "MEI",

Nachalov Alexander Vladimirovich, chief specialist, nachalov@mes-centra.ru, Branch of PJSC "FGC UES" - MES Center

УДК 621.31

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ ПОТРЕБЛЕНИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ УСТАНОВКАМИ ЭЛЕКТРОЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСОВ

В.А. Копырин, О.В. Смирнов

В статье представлены результаты определения оптимальных параметров внутрискважинного компенсатора реактивной мощности, при которых обеспечивается минимизация потребления активной мощности. Получены поверхности функции энергосбережения для различных параметров электротехнического комплекса установок электроцентробежных насосов. Установлено, что оптимальное значение реактивной мощности внутрискважинного компенсатора составляет 0,92 от мощности погружного электродвигателя. Расчетное значение функции энергосбережения варьируется от 1,4 % до 11,8 % в зависимости от мощности внутрискважинного компенсатора, мощности погружного электродвигателя, длины и сечения кабельной линии.

Ключевые слова: внутрискважинный компенсатор, погружной асинхронный электродвигатель.

В настоящее время доля трудноизвлекаемых запасов углеводородов в России и в мире продолжает увеличиваться [1-3]. В связи с этим возрастает количество нефтяных месторождений с обводненностью 30...50 %, а на некоторых месторождениях обводненность достигает 95 % [4]. Для поддержания запланированного объема добытой нефти нефтедобывающие компании повышают производительность насосных установок, что приводит к увеличению потребляемой электроэнергии погружным электрооборудованием.

Среди факторов, влияющих на улучшение энергетических показателей добычи пластовой жидкости, можно выделить снижение обводненности пластовой жидкости [5-7] и компенсацию потерь мощности в элементах установок для добычи нефти [8, 9].

Снижение обводненности добываемой жидкости достигается повышением качества строительства скважин, например электрообработкой воды затворения при цементировании скважин, совершенствованием систем заводнения, применением тампонирующих составов.

Повышение эффективности использования энергии при добыче нефти достигается применением энергоэффективного оборудования с максимально высоким коэффициентом полезного действия [10, 11], оптимизацией подбора скважинного оборудования [12, 13], управлением процессом добычи [14], повышением качества электроэнергии [15], снижением гидравлических потерь путем использования насосно-компрессорных труб максимально возможного диаметра [16, 17].

Снижение гидравлических потерь путем увеличения диаметра насосно-компрессорных труб позволяет уменьшить потребление активной мощности установками электроцентробежных насосов (УЭЦН). Тем не менее, данный способ ввиду высокого риска повреждения питающего кабеля, уменьшения затрубного пространства большинством нефтедобывающих компаний не применяется.

Использование погружных асинхронных электродвигателей (ПЭД) с повышенным напряжением позволяет повысить энергетическую эффективность добычи нефти за счет снижения потерь активной мощности в токопроводящих элементах электротехнического комплекса (ЭТК) УЭЦН. Данное техническое решение применяется в основном для двигателей номинальной мощностью до 70 кВт [8]. Это связано с тем, что увеличение номинальной мощности ПЭД приводит к повышению «базового» номинального напряжения, что не всегда возможно при использовании существующих изоляционных материалов обмоток. Поэтому для погружных электродвигателей номинальной мощностью свыше 70 кВт проблема повышения «базового» номинального напряжения остается актуальной.

При эксплуатации установок электроцентробежных насосов на высокодебитных скважинах (дебит по жидкости свыше 150 м³/сут) потребляемая активная мощность ПЭД может достигать 200 кВт и более, а рабочие токи варьируются от 50 А до 130 А [10, 13]. При работе УЭЦН коэффициент мощности, определяемый в основном коэффициентом мощности ПЭД, находится в пределах 0,7-0,85 при номинальной нагрузке и может снижаться до 0,5-0,7 при недогрузках. При эксплуатации фактический коэффициент мощности погружного асинхронного электродвигателя ниже номинального значения. Это связано с тем, что выбранное оборудование работает не в оптимальных рабочих зонах.

Разработанные на данный момент технические устройства для компенсации реактивной мощности устанавливаются только на поверхности. Тем не менее, такое решение не позволяет компенсировать реактивную мощность в питающих кабелях УЭЦН, длина которых может достигать 3500 м. Это приводит к необходимости увеличения сечения кабелей и к повышенным потерям мощности в них до 15%.

Вопросами рационального использования энергии в электроэнергетических системах путем оптимального подбора мест установки компенсирующих устройств, а так же их мощности, оптимизации процессов регулирования устройствами компенсации занимались многие отечественные и зарубежные ученые: Абрамович Б.Н., Веников В.А., Жежеленко В.И., Железко Ю.С., Шпиганович А.Н., Akagi H., Czarnecki L., Sharon D. и другие. В работах авторами предложены методики для определения реактивной мощности, описаны устройства компенсации реактивной мощности и способы управления данными устройствами.

Тем не менее, на сегодняшний день остаются не рассмотренными вопросы определения оптимальных параметров устройств индивидуальной компенсации реактивной мощности погружных асинхронных электродвигателей, ввиду отсутствия на рынке таких устройств.

Поэтому актуальной становится проблема определения оптимальных параметров внутрискважинного компенсатора реактивной мощности, при которых обеспечивается минимальное значение потребляемой активной мощности УЭЦН.

Теоретическая часть. Рассматриваемый электротехнический комплекс УЭЦН включает в себя: источник питания (шины комплектно-трансформаторной подстанции 10/0,4 кВ); станцию управления, питающий трансформатор, кабельную линию (КЛ), погружной асинхронный электродвигатель и внутрискважинный компенсатор реактивной мощности (ВКРМ).

Пусть активная мощность P_i , потребляемая УЭЦН, расходуется на совершение полезной работы погружным электродвигателем и потери в токопроводящих элементах электротехнического комплекса и зависит от мощности погружного электродвигателя и реактивной мощности компенсирующей установки:

$$P_i = P_\partial + \sum \Delta P = P_\partial + \Delta P_T + \Delta P_{КЛ} + \Delta P_\partial, \quad (1)$$

где P_∂ - активная мощность, потребляемая погружным электродвигателем; ΔP_T , $\Delta P_{КЛ}$, ΔP_∂ - потери активной мощности в трансформаторе, кабельной линии и погружном электродвигателе соответственно.

Учитывая изменение места установки компенсирующего устройства (в скважине) функцию $\mathcal{E}_P$, характеризующую энергосберегающий эффект от внедрения внутрискважинного компенсатора, предлагается определить как отношение полученной потребляемой активной мощности $P_{нов}$ к плановой $P_{план}$.

$$\mathcal{E}_P(P_\partial; \cos \varphi_c) = 1 - \frac{P_{нов}(P_\partial; \cos \varphi_c)}{P_{план}(P_\partial; \cos \varphi_c)}, \quad (2)$$

где $\cos \varphi_c$ - требуемые коэффициент мощности сети в точке подключения внутрискважинного компенсатора.

Для решения задачи оптимизации сформулирован критерий оптимальности $P_{нов} \rightarrow \min$, который отражает минимизацию потребляемой активной мощности УЭЦН, с учетом потерь активной мощности в электро-техническом комплексе, в зависимости от мощности внутрискважинного компенсатора.

В данном исследовании диапазон мощностей рассматриваемых погружных электродвигателей принят от 100 кВт до 250 кВт.

Анализ энергетических показателей работы УЭЦН на некоторых объектах нефтедобывающих компаний показал, что среднее значение коэффициента мощности погружных асинхронных электродвигателей составляет 0,735. Данное обстоятельство связано с тем, что средний коэффициент загрузки ПЭД составляет 0,65. Поэтому для расчета необходимой мощности ВКРМ коэффициент мощности ПЭД принимается $\cos \varphi_d = 0,735$.

Потери активной мощности в питающем трансформаторе определяются по выражению:

$$\Delta P_T = 3 \cdot i_T^2 \cdot (R_{1T} + R'_{2T}), \quad (3)$$

где i_T - ток, протекающий через обмотки трансформатора; R_{1T}, R'_{2T} - активное и приведенное активное сопротивления первичной и вторичной обмоток питающего трансформатора, соответственно.

Эквивалентное активное сопротивление питающего трансформатора определяется по выражению:

$$R'_{экT} = R_{1T} + R'_{2T} = \frac{\Delta P_K \cdot U_{вн.ном}^2 \cdot 10^3}{S_{ном}^2}, \quad (4)$$

где ΔP_K - потери короткого замыкания, кВт; $U_{вн.ном}$ - номинальное напряжение высшей ступени трансформатора, кВ; $S_{ном}$ - полная мощность трансформатора, кВА.

Кабельная линия состоит из основного питающего кабеля и соединенного с ним кабеля-удлинителя. Потери активной мощности в кабельной линии определяются по выражению:

$$\Delta P_{KL} = 3 \cdot i_{KL}^2 \cdot R_{KL}, \quad (5)$$

где i_{KL} - ток, протекающий по кабельной линии; R_{KL} - активное сопротивление токопроводящих жил кабельной линии.

Активное сопротивление токопроводящих жил кабелей определяется по выражению:

$$R_{KL} = 10^3 \cdot \rho \cdot \left(\frac{l_1}{S_1} + \frac{l_2}{S_2} \right) \cdot [1 + 0,004 \cdot (T - 20)], \quad (6)$$

где ρ – удельное сопротивление проводника при 20 °С, для меди $\rho = 0,0172$ Ом·мм²/м; l_1, l_2 – длина основного кабеля и кабеля-удлинителя соответственно, км; S_1, S_2 – сечение токопроводящей жилы основного кабеля и кабеля-удлинителя соответственно, мм²; T – температура токопроводящих жил кабелей, °С.

За расчетную температуру токопроводящих жил кабелей принимается температура наиболее нагретого участка кабельной линии. Если сечение токопроводящих жил основного кабеля и кабеля-удлинителя отличаются не более чем на один порядок (например, 16 мм² и 10 мм²), то активное сопротивление жилы кабельной линии рассчитывается как для основного кабеля.

Необходимую мощность внутрискважинного компенсатора предлагается определять по выражению:

$$Q_{BKPM} = P_{\text{д.ном}} \cdot \left(\sqrt{\frac{1}{\cos^2 \varphi_d} - 1} - \sqrt{\frac{1}{\cos^2 \varphi_c} - 1} \right). \quad (7)$$

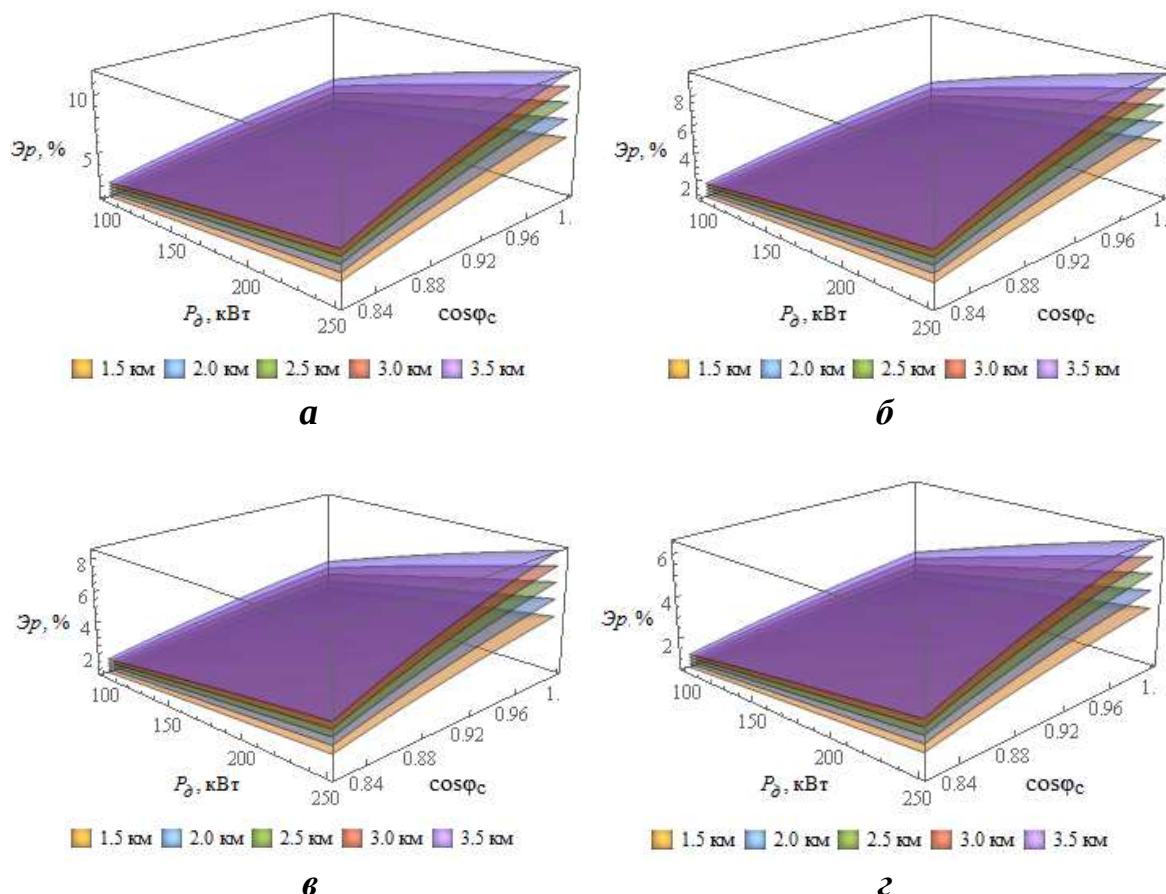
Для определения оптимальных параметров внутрискважинного компенсатора реактивной мощности зададим ограничения требуемого коэффициента мощности сети $0,80 \leq \cos \varphi_c \leq 1$.

Результаты расчетов. В исследуемом электротехническом комплексе УЭЦН погружной электродвигатель получает питание от трансформатора марки ТМПН-250/3, паспортные данные которого приведены в таблице.

Технические характеристики трансформатора ТМПН-250/3

Мощность, кВА	Сочетание напряжений, кВ		Схема и группа соединения обмоток	Потери, кВт		Напряжение к.з., %	Ток холостого хода, %
	ВН	СН		холостого хода	короткого замыкания		
250	2,5	0,4	УН/У-0	0,65	3,7	6,0	1,5

В настоящее время с увеличением доли трудноизвлекаемых запасов углеводородов длина кабельных линий, питающих УЭЦН, может достигать 3500 м, а температуры пластовых жидкостей до 150 °С. Поэтому для оценки влияния длины кабельной линии на величину энергосберегающего эффекта $\mathcal{E}_p$ диапазон длин КЛ принимается 1500 м, 2000 м, 2500 м, 3000 м, 3500 м. В качестве питающего кабеля выбран кабель марки КПБП с медными жилами. Температура пластовой жидкости принимается 70 °С. Поверхности функции $\mathcal{E}_p$ энергосбережения приведены на рисунке.



Поверхности функции энергосбережения $\mathcal{E}_p(P_\delta; \cos\varphi_c)$: а - $S_{KL} = 16 \text{ м}^2$; б - $S_{KL} = 21,5 \text{ м}^2$; в - $S_{KL} = 25 \text{ м}^2$; г - $S_{KL} = 35 \text{ м}^2$

Обсуждение результатов. Анализ поверхностей показал, что максимальное значение функции $\mathcal{E}_p$ энергосбережения достигается при $\cos\varphi_c = 1$ для всех диапазонов изменения мощности погружных асинхронных электродвигателей, длин и сечений кабельных линий. При $\cos\varphi_c = 1$ оптимальное значение реактивной мощности внутрискважинного компенсатора составляет $0,92 \cdot P_{\delta, \text{ном}}$ при принятом среднем коэффициенте мощности ПЭД 0,735. Например, для УЭЦН, оснащенной погружным электродвигателем мощностью 200 кВт, кабельной линией длиной 2000 м

сечением токопроводящей жилы 16 мм^2 и внутрискважинным компенсатором мощностью 184 квар расчетный показатель энергосбережения составил 6,4 %.

Выводы. Оптимальное значение реактивной мощности внутрискважинного компенсатора составляет $0,92 \cdot P_{\text{д.ном}}$ при принятом среднем коэффициенте мощности ПЭД 0,735. Расчетный энергосберегающий эффект ΔP при внутрискважинной компенсации реактивной мощности варьируется от 1,4 % до 11,8 % в зависимости от мощности погружного электродвигателя, длины и сечения кабельной линии.

Список литературы

1. Мартынов В.Г., Ипатов А.И., Кременецкий М.И., Гуляев Д.Н., Кричевский В.М. Развитие геофизического и гидродинамического мониторинга на этапе перехода к разработке трудноизвлекаемых запасов нефти // Нефтяное хозяйство, 2014. № 3. С. 106-109.
2. Яценко И.Г. Трудноизвлекаемые нефти: физико-химические свойства и экологические последствия их добычи // Экспозиция Нефть Газ, 2014. №1. С. 30–35.
3. Смирнов О.В., Козярук А.Е., Кусков К.В., Портнягин А.Л., Сафонов А.В. Использование электрообработки для увеличения нефтеотдачи // Известия вузов. Нефть и газ, 2015. №5. С. 67-73.
4. Салимов Ф.С. Вовлечение в разработку слабодренируемых, трудноизвлекаемых запасов нефти путём изменения направления трещин ГРП // Экспозиция Нефть Газ, 2017. № 6. С. 47–51.
5. Хабиббулин А.Р., Лобков Ю.А., Диков В.И. Интеллектуальное месторождение компании «Лукойл» // Нефть. Газ. Новации, 2015. № 12. С. 27–30.
6. Родионов А.В. Проведение ГРП с предварительной закачкой тампонирующих составов на месторождениях ООО «ЛУКОЙЛ-Западная Сибирь» // Инженерная практика, 2015. № 9. С. 74–78.
7. Обухов С.Л., Кунаев Д.С. Управление заводнением на поздней стадии разработки месторождений на примере северного участка Ижевского месторождения // Инженерная практика, 2016. № 7. С. 4–8.
8. Якимов С.Б. Проблема больших токов. Поиск оптимальных путей решения // Инженерная практика, 2016. № 3. С. 14–19.
9. Невоструев В.А. Опыт эксплуатации энергоэффективных УЭЦН «Новомет» // Инженерная практика, 2017. № 8. С. 28–32.
10. Якимов С.Б., Каверин М.Н., Тарасов В.П. О новых перспективах применения ПЭД с повышенным напряжением питания для снижения капитальных и операционных затрат // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса, 2015. № 4. С. 34–38.

11. Хузин А.Р. Оценка энергоэффективности погружных асинхронных и вентильных электродвигателей с повышенным напряжением // Инженерная практика, 2017. №01-02. С. 80–82.
12. Махиня А. Система энергоэффективного дизайна // Нефтегазовая вертикаль, 2014. № 17-18. С. 84–86.
13. Тарасов В.П., Куряев С.В., Голубь И.М. Использование специализированного ПО для расчета энергопотребления на механизированном фонде скважин // Инженерная практика, 2016. № 3. С. 22–26.
14. Haicong Z., Jianxiong Y., Qingyue J. Liguao W., Dianguo X.. Research on intelligent power supply control based on sensor-less temperature identification of Electric Submersible Motor // 2015 9th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE-ECCE Asia) (Seoul, South Korea, 1-5 June 2015). DOI: 10.1109/ICPE.2015.7168168.
15. Pragale Ritchie, Ship D.D. Investigation of premature ESP failures and oil field harmonic analysis // IEEE Transactions on Industry Applications. 2016. Vol. 53. Issue. 3. P. 3175-3181. DOI: 10.1109/TIA.2016.2608958.
16. Зуев А.С. Повышение энергетической эффективности в ОАО «НК «Роснефть». Цели и задачи // Инженерная практика, 2016. № 3. С. 4–9.
17. Байков И.Р. Кузнецова М.И. Китаев С.В. Повышение эффективности использования оборудования в нефтяной отрасли // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья, 2013. № 2. С. 18–20.

*Копырин Владимир Анатольевич специалист отдела развития научных инициатив
Департамента научно-исследовательской деятельности,
kopyrinva@gmail.com, Россия, Тюмень, Тюменский индустриальный университет,*

*Смирнов Олег Владимирович, д-р техн., наук, проф.,
oleg_smirnov_1940@mail.ru, Россия, Тюмень, Тюменский индустриальный университет*

OPTIMISATION OF REACTIVE POWER CONSUMPTION REGIMES BY THE ELECTRIC CENTRIFUGAL PUMPS INSTALLATIONS

V.A. Kopyrin, O.V. Smirnov

The purpose of the article is to determine the optimal parameters of the in-hole reactive power compensator, at which the consumption of active power is minimized. The surface of the power saving E_E of the power saving for various parameters of the electrical engineering complex of the installations of the electric centrifugal pumps is obtained. It has been found that the optimal value of the reactive power of the in-well compensator is $0.92 \cdot P_{m.nom}$ for the received parameters of the submersible motor. The calculated value of the energy saving function E_E varies from 1.4% to 11.8% depending on the power of the intra-well compensator, power of the submersible motor, length and cross-section of the cable line.

Key words: downhole compensator, reactive power, submersible induction motor.

Kopyrin Vladimir Anatolevich, specialist of the department for the development of scientific initiatives of the department of scientific and research activities, kopyrinva@gmail.com, Russia, Tyumen, Federal State Budget Educational Institution of Higher Education «Industrial University of Tyumen»,

Smirnov Oleg Vladimirovich, doctor of technical science, professor, oleg_smirnov_1940@mail.ru, Russia, Tyumen, Federal State Budget Educational Institution of Higher Education «Industrial University of Tyumen»

УДК 53.088.24

ПРИМЕНЕНИЕ ВОЛНОВОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ РЕАКТИВНОЙ ЭНЕРГИИ ПРИ НАРУШЕНИИ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

А.И. Смирнов, А.С. Лутонин

В настоящей работе исследуются характеристики электронных счетчиков реактивной мощности путем оценки различий, возникающих в результате четких принципов работы счетчика и наличия стационарных и нестационарных нарушений качества электроэнергии. В статье проводится сравнительное исследование для определения эффективности использования ортогональных, биортогональных или обратных биортогональных вейвлетов для определения реактивной мощности. Кроме того в документе представлены рекомендации по измерению реактивной мощности и энергии для будущих поколений интеллектуальных счетчиков.

Ключевые слова: гармоники, реактивная мощность, качество электроэнергии, вейвлет преобразование.

В современных условиях доля нелинейных нагрузок имеет значительную составляющую среди общего числа потребителей электроэнергии. В перспективе развития электротехнических комплексов предусмотрено внедрение энергосберегающих технологий и повышение автоматизации процесса производства. В этой связи увеличивается количество преобразователей частоты, силовых выпрямителей, а также иных нагрузок, ухудшающих качество электроэнергии.

Это приводит к неправильному учету реактивной мощности приборами, входящими в систему автоматизированного контроля и учета электроэнергии, что затрудняет управление её потребления в процессе работы нагрузки предприятия. Измерение реактивной мощности важно для определения потребности в реактивной мощности и для содействия улучшению профиля напряжения. Однако недавние исследования [1] - [3] показали, что характеристики счетчиков реактивной энергии зависят от того, выполняются ли измерения в чистой или искаженной электрической среде. Это является результатом отсутствия универсального определения реактивной мощности, которое учитывает условия эксплуатации, которые не являются чисто синусоидальными. В идеальном случае определение должно учитывать гармонические искажения в дополнение к искажениям напряжения, мерцанию и другим нарушениям качества мощности, которые распространяются в современных сетях электроснабжения.

Споры по приемлемому определению подходов к реактивной мощности и измерениям имеют долгую историю и преимущественно могут быть разделены на три подхода. В результате измерители реактивной мощности и энергии, доступные в настоящее время на рынке, которые основаны на различных подходах, будут обеспечивать различные измерения при наличии одного и того же искажения.

В этой статье используется вейвлет преобразование для оценки характеристик счетчиков реактивной энергии и исследуется пригодность различных типов вейвлетов, включая ортогональные и биортогональные для измерения реактивной мощности.

Определения и подходы к измерению реактивной мощности были разработаны во временной области [4], [5]; Частотная область [6] - [9]; И частотно-временной области [10], [11], [12]. Ограничение определения на основе временной области заключается в том, что реактивная мощность или энергия в отдельных частотных компонентах не могут быть измерены. Ограничение определения на основе частотной области состоит в том, что некоторые величины реактивной мощности могут привести к результату, не имеющему физического смысла [13], [14]. Впоследствии появились новые определения на основе частотно-временной области с использованием вейвлет преобразования. За последнее десятилетие применение волновых преобразований в исследованиях энергосистем получило более широкое признание.

Вейвлет-пакетное преобразование представляет обобщенную версию вейвлет-декомпозиции и, следовательно, способно обеспечить равномерные полосы частот. В ряде работ [6], [9] приводится подробный справочный материал по теории вейвлетов, комплекту вейвлет-фильтров и вейвлет-пакетному преобразованию.

Математическая формулировка. В этом разделе представлен обзор основных трех подходов к измерению реактивной мощности и энергии, доступных в настоящее время в электронных счетчиках реактивной мощности и энергии.

Фундаментальный реактивный энергетический подход

Реактивная мощность на основной частоте (50Гц) может быть рассчитана:

$$Q_1 = U_1 I_1 \sin \varphi_1,$$

где U_1 – напряжение, В; I_1 – ток, А; φ_1 – фазовый сдвиг на основной частотной составляющей, град. Эта формула рекомендована в [15], и эта реактивная мощность представляет собой амплитуду колебательной составляющей мгновенной мощности на основной частоте. Когда Q_1 интегрируется в течение времени kT (k является целым числом и $T=1/f$ период), то реактивная энергия может быть получена на основной частоте. Следует отметить, что основная реактивная мощность представляет собой полную реактивную мощность, которая существует при синусоидальных рабочих

условиях; Однако при наличии гармонических искажений и нарушений качества мощности может существовать и другая реактивная мощность, такая как «фиктивная» мощность или мощность «искажения». Чтобы измерить реактивную мощность / энергию на основной частоте, ее необходимо извлечь, идентифицировать и затем количественно определить; В противном случае, активные мощности, связанные с другими частотами будут наложены поверх Q_1 , что приведет к ошибкам.

Реактивная мощность, подход основанный на 90° фазном

Этот подход отделяет реактивную мощность от мгновенной мощности путем введения сдвига фазы 90° к напряжению или току следующим образом [16]:

$$Q_{90} = \frac{1}{T} \int_0^T u_{t-90} \cdot i_t dt$$

При синусоидальной работе, когда напряжение и ток являются чистыми синусоидами, реактивная мощность Q_{90} будет иметь то же значение, что и Q_1 . Однако при наличии гармонических искажений или нарушений качества мощности, поскольку фазовый сдвиг применяется к искаженной форме волны напряжения или тока, получают разные значения. Это ограничивает применение этого подхода к случаям, когда нет искажений; В противном случае реактивная мощность, полученная в этом случае, не имеет прямого физического смысла и поэтому не может быть отнесена к какой-либо реактивной мощности, рекомендованной в [15].

Реактивная мощность на основе полной мощности

В этом подходе ток разлагается на активные и неактивные составляющие. Активная мощность извлекается путем усреднения произведения тока и напряжения, тогда реактивная мощность, а именно неактивная мощность, может быть рассчитана на основе полной мощности S :

$$N = Q_F = \sqrt{S^2 - P^2}$$

Этот подход введен в работах [17] и [18]. Расчет неактивной мощности, как векторной разности между полной мощностью и активной мощностью рекомендуется в [15]. Неактивная мощность N даст те же результаты, что и Q_1 при синусоидальной работе; Однако при наличии искажений этот подход приводит к другим искаженным составляющим мощности на разных частотах. Поэтому такой подход не способен обеспечить реактивную мощность на основной частоте.

Ортогональные и биоорганические вейвлеты. В дополнение к противоречивости подхода, который используется для измерения реактивной мощности и энергии, возникает еще одна проблема, которая возникает из-за ограничений времени и анализа частотной области, используемых для измерения этих величин. Временной подход не может обеспечить реактивную мощность на отдельных частотах; С другой стороны, подход в частотной области может привести к реактивной мощности, которая не

имеет прямой физической интерпретации. Чтобы преодолеть эти ограничения, возникло вейвлет-преобразование с возможностью предоставления временного или частотно-временного спектра (если масштаб преобразуется в частоту) для нестационарных сигналов. Искажения энергосистемы, такие как провал, скачок и мерцание, являются нестационарными и менее подходят для анализа на основе Фурье.

Для ортогональных вейвлетов на этапе декомпозиции (или анализа) и реконструкции (или синтеза) используются одна и та же функция масштабирования, и функция вейвлета. Для любого сигнала, процессы анализа и синтеза могут быть математически выражены в виде [7].

$$c_{j,k} = \int s(x) \psi_{j,k}(x) dx, \quad s(x) = \sum_{j,k} c_{j,k} \psi_{j,k},$$

где $c_{j,k}$ - коэффициенты вейвлетов на уровне разложения « j » и времени выборки « k ».

Представление волновых форм напряжения и тока в области пакетных вейвлет-преобразований было введено в [4], как

$$u_{orth}(t) = \sum_{k=0}^{2^{N-j}-1} d_j^0(k) \phi_{j,k}(t) + \sum_{n=1}^{2^j-1} \left(\sum_{k=0}^{2^{N-j}-1} d_j^n(k) \psi_{j,k}^n(t) \right)$$

$$i_{orth}(t) = \sum_{k=0}^{2^{N-j}-1} d_j'^0(k) \phi_{j,k}(t) + \sum_{n=1}^{2^j-1} \left(\sum_{k=0}^{2^{N-j}-1} d_j'^n(k) \psi_{j,k}^n(t) \right),$$

где нижний индекс « $orth$ » относится к ортогональным вейвлетам и « j » представляет уровень вейвлет-декомпозиции, в то время как « d » и « d' » являются коэффициентами вейвлета напряжения и тока. Длина сигнала « 2^N » для индекса « n » относится к номеру узла пакета вейвлета. Реактивная мощность, основанная на фундаментальном частотном подходе, может быть получена в нулевом узле:

$$Q_{j(orth)}^0 = \sqrt{\left(S_{j(orth)}^0\right)^2 - \left(P_{j(orth)}^0\right)^2} \quad S_{j(orth)}^0 = U_{j(orth)}^0 \cdot I_{j(orth)}^0,$$

где $S_{j(orth)}^0$ - полная мощность, ВА; $P_{j(orth)}^0$ - активная мощность, Вт; $U_{j(orth)}^0$ - среднеквадратичное напряжение в нулевом узле, В; $I_{j(orth)}^0$ - среднеквадратичный ток в нулевом узле, А; как определено в [9].

Неактивная мощность, то есть реактивная мощность, основанная на подходе полной мощности, может быть сформулирована, как

$$N_{(orth)} = \sqrt{S_{(orth)}^2 - P_{(orth)}^2} \quad S_{(orth)} = U_{(orth)} \cdot I_{(orth)},$$

где $S_{(orth)}$ - полная мощность, ВА; $P_{(orth)}$ - суммарная активная мощность, Вт; $U_{(orth)}$ - общее напряжение (среднеквадратичное значение), В; $I_{(orth)}$ - суммарный ток (среднеквадратичное значение), А. Реактивная мощность, основанная на подходе 90° фазового сдвига, может быть получена из

$$Q_{j(orth)s}^0 = \frac{1}{2^N} \left(u_{j(orth)s}^0 \cdot i_{j(orth)s}^0 \right),$$

где индекс «s» используется для обозначения, что $u_{j(orth)s}^0$ имеет сдвиг по фазе 90° относительно оригинального напряжения.

Для биортогональных вейвлетов используются две функции масштабирования $\phi, \tilde{\phi}$, и две функции вейвлета $\psi, \tilde{\psi}$, используются вместо одной функции масштабирования и одной вейвлет-функции, как в ортогональных вейвлетах. Анализ / синтез любых сигналов, может быть представлен, как

$$a_{j,k} = \int s(x) \tilde{\psi}_{j,k}(x) dx, \quad s(x) = \sum_{j,k} a_{j,k} \psi_{j,k}$$

Из-за биортогональности фильтров с двойным сдвигом функции масштабирования и вейвлета, также являются биортогональными со следующими свойствами:

$$\langle \phi(t-n), \tilde{\phi}(t-m) \rangle = \begin{cases} 1 & \text{если } n=m \\ 0 & \text{если } n \neq m \end{cases} \quad (1)$$

$$\langle \phi(t-n), \tilde{\psi}(t-m) \rangle = \begin{cases} 0 & \text{если } n=m \\ 0 & \text{если } n \neq m \end{cases} \quad (2)$$

$$\langle \psi(t-n), \tilde{\psi}(t-m) \rangle = \begin{cases} 1 & \text{если } n=m \\ 0 & \text{если } n \neq m \end{cases} \quad (3)$$

$$\langle \psi(t-n), \tilde{\phi}(t-m) \rangle = \begin{cases} 0 & \text{если } n=m \\ 0 & \text{если } n \neq m \end{cases}, \quad (4)$$

где $\langle, \rangle$ – обозначает скалярное произведение.

Для любого сигнала напряжения и тока с длиной 2^N после прохождения стадии анализа можно восстановить, как

$$u_{biorth}(t) = \sum_{k=0}^{2^{N-j}-1} a_j^0(k) \phi_{j,k}(t) + \sum_{n=1}^{2^j-1} \left(\sum_{k=0}^{2^{N-j}-1} a_j^n(k) \psi_{j,k}^n(t) \right)$$

$$i_{biorth}(t) = \sum_{k=0}^{2^{N-j}-1} b_j^0(k) \tilde{\phi}_{j,k}(t) + \sum_{n=1}^{2^j-1} \left(\sum_{k=0}^{2^{N-j}-1} b_j^n(k) \tilde{\psi}_{j,k}^n(t) \right),$$

где a и b - коэффициенты вейвлета напряжения и тока, а нижний индекс «biorth» обозначает биортогональный вейвлет. Мгновенная мощность, P_{biorth} может быть получена из

$$\begin{aligned}
 p_{biorth} = & \left[\sum_{k=0}^{2^{N-j}-1} a_j^0(k) \phi_{j,k}(t) \right] \times \left[\sum_{k=0}^{2^{N-j}-1} b_j^0(k) \tilde{\phi}_{j,k}(t) \right] + \\
 & + \left[\sum_{k=0}^{2^{N-j}-1} a_j^0(k) \phi_{j,k}(t) \right] \times \left[\sum_{n=0}^{2^j-1} \left(\sum_{k=0}^{2^{N-j}-1} b_j^n(k) \tilde{\psi}_{j,k}^n(t) \right) \right] + \\
 & + \left[\sum_{k=0}^{2^{N-j}-1} b_j^0(k) \tilde{\phi}_{j,k}(t) \right] \times \left[\sum_{n=1}^{2^j-1} \left(\sum_{k=0}^{2^{N-j}-1} a_j^n(k) \psi_{j,k}^n(t) \right) \right] + \\
 & + \left[\sum_{n=1}^{2^j-1} \left(\sum_{k=0}^{2^{N-j}-1} a_j^n(k) \psi_{j,k}^n(t) \right) \right] \times \left[\sum_{n=1}^{2^j-1} \left(\sum_{k=0}^{2^{N-j}-1} b_j^n(k) \tilde{\psi}_{j,k}^n(t) \right) \right]
 \end{aligned}$$

основываясь на свойствах (1) - (4), выражение для мгновенной мощности и средней мощности может быть сведено к

$$\begin{aligned}
 p_{biorth} &= \sum_{k=0}^{2^{N-j}-1} a_j^n(k) \cdot b_j^n(k) + \sum_{n=1}^{2^j-1} \left(\sum_{k=0}^{2^{N-j}-1} a_j^n(k) \cdot b_j^n(k) \right) \\
 P_{biorth} &= \frac{1}{2^N} \left[\sum_{k=0}^{2^{N-j}-1} a_j^0(k) \cdot b_j^0(k) + \sum_{n=1}^{2^j-1} \left(\sum_{k=0}^{2^{N-j}-1} a_j^n(k) \cdot b_j^n(k) \right) \right]
 \end{aligned}$$

Биортогональная полная мощность и биортогональная полная мощность узла нуль могут быть получены из

$$S_{biorth} = U_{biorth} \cdot I_{biorth}, S_{j(biorth)}^0 = U_{j(biorth)}^0 \cdot I_{j(biorth)}^0,$$

где

$$\begin{aligned}
 U_{biorth} &= \sqrt{\frac{1}{2^N} \left[\sum_{k=0}^{2^{N-j}-1} \left(a_j^0(k) \right)^2 \right] + \sum_{n=1}^{2^j-1} \left(\sum_{k=0}^{2^{N-j}-1} \left(a_j^n(k) \right)^2 \right)} = \\
 &= \sqrt{\left(U_{j(biorth)}^0 \right)^2 + \sum_{n=1}^{2^j-1} \left(U_{j(biorth)}^n \right)^2} \\
 I_{biorth} &= \sqrt{\frac{1}{2^N} \left[\sum_{k=0}^{2^{N-j}-1} \left(b_j^0(k) \right)^2 \right] + \sum_{n=1}^{2^j-1} \left(\sum_{k=0}^{2^{N-j}-1} \left(b_j^n(k) \right)^2 \right)} = \\
 &= \sqrt{\left(I_{j(biorth)}^0 \right)^2 + \sum_{n=1}^{2^j-1} \left(I_{j(biorth)}^n \right)^2}
 \end{aligned}$$

Ноль биортогонального узла содержит реактивную мощность на частоте силовой сети (50 Гц) и поэтому может быть классифицирован в соответствии с фундаментальным подходом, основанным на реактивной мощности:

$$Q_{j(biorth)}^0 = \sqrt{\left(S_{j(biorth)}^0\right)^2 - \left(P_{j(biorth)}^0\right)^2}$$

$$S_{j(biorth)}^0 = U_{j(biorth)}^0 \cdot I_{j(biorth)}^0$$

Биортогональная неактивная мощность N , которую можно было бы отнести к реактивной мощности на основе подхода с полной мощностью, является

$$N_{biorth} = \sqrt{S_{biorth}^2 - P_{biorth}^2}$$

Биортогональная реактивная мощность, основанная на подходе с фазовым сдвигом 90° , может быть выражена, как

$$Q_{j(biorth)s}^0 = \frac{1}{2N} \left(u_{j(biorth)s}^0 \cdot i_{j(biorth)s}^0 \right),$$

где $u_{j(biorth)s}^0$ сдвинуто на 90° по фазе от оригинального напряжения.

В этом исследовании также рассматриваются обратные биортогональные Сплайн вейвлеты, в которых функции декомпозиции оптимизированы для получения наилучшей регулярности, а функции восстановления строятся так, чтобы получить наибольшее число исчезающих моментов. В случае ортогональных всплесков сплайна функции декомпозиции оптимизированы для наибольшего числа исчезающих моментов, а функции восстановления оптимизированы для регулярности.

Исследования и результаты. Вейвлет-пакетное преобразование применяется к четырем ситуационным исследованиям с использованием трех уровней разложения и частоты дискретизации 1,92 кГц. Этот выбор гарантирует, что нечетные гармоники центрируются в каждой полосе частот и является важным соображением, поскольку нечетные гармоники доминируют в сигналах напряжения и тока в электроэнергетической системе.

Добеши с порядком 10 и 43 выбраны в качестве ортогональных вейвлетов, поскольку они доказали превосходную вычислительную скорость и точность над другими семействами ортогональных вейвлетов. Вейвлет-анализ используется в качестве инструмента для более глубокого понимания и интерпретации к измерению реактивной мощности при наличии нарушений качества энергии.

Когда используются синтетические сигналы, есть полное знание априорной информации о времени и частоте напряжения и тока. В этом случае истинные значения различных компонентов реактивной мощности

можно вычислить, используя концепцию временной области и, следовательно, использовать в качестве эталона для расчета процентной погрешности.

Постоянное напряжение и линейная нагрузка. Это тестовый случай, представляющий линейную нагрузку, такую как (асинхронный двигатель), без устройств на основе силовой электроники, поступающих от чистой синусоидальной волны, как это предусмотрено генератором переменного тока. На рис. 1 и рис. 2 показана абсолютная процентная погрешность измерения реактивной энергии для трех разных подходов в зависимости от вейвлет-преобразований, перечисленных в табл. 1, 2.

Таблица 1

**Номер вейвлет преобразования для Добешей,
Биортогональных сплайн вейвлетов**

Номер вейвлет преобразования	Название вейвлета	Номер вейвлет преобразования	Название вейвлета
1	ДБ 43	10	БИОР 3.1
2	ДБ 10	11	БИОР 3.3
3	БИОР 1.1	12	БИОР 3.5
4	БИОР 1.3	13	БИОР 3.7
5	БИОР 1.5	14	БИОР 3.9
6	БИОР 2.2	15	БИОР 4.4
7	БИОР 2.4	16	БИОР 4.5
8	БИОР 2.6	17	БИОР 6.8
9	БИОР 2.8		

Таблица 2

**Номер вейвлет преобразования для Добешей,
обратных Биортогональных сплайн вейвлетов**

Номер вейвлет преобразования	Название вейвлета	Номер вейвлет преобразования	Название вейвлета
1	ДБ 43	9	ОБИОР 2.8
2	ДБ 10	10	ОБИОР 3.3
3	ОБИОР 1.1	11	ОБИОР 3.5
4	ОБИОР 1.3	12	ОБИОР 3.7
5	ОБИОР 1.5	13	ОБИОР 3.9
6	ОБИОР 2.2	14	ОБИОР 4.4
7	ОБИОР 2.4	15	ОБИОР 4.5
8	ОБИОР 2.6	16	ОБИОР 6.8

Обратите внимание, что Q30, N и Q3090 относятся к реактивной мощности на третьем уровне декомпозиции и нулевому узлу, неактивной мощности и реактивной мощности на третьем уровне декомпозиции с нулевым узлом на основе подхода с фазовым сдвигом 90^0 . Поскольку это

синтетический случай, истинные значения известны априори и поэтому используются в качестве эталонных значений для вычислений абсолютной процентной погрешности.

Результаты, показанные на рис. 1 показывают, что случаи 1, 2 и 17 (Добеши 43, Добеши 10 и биортогональные 6.8) дают точные результаты по сравнению с другими вейвлетами.

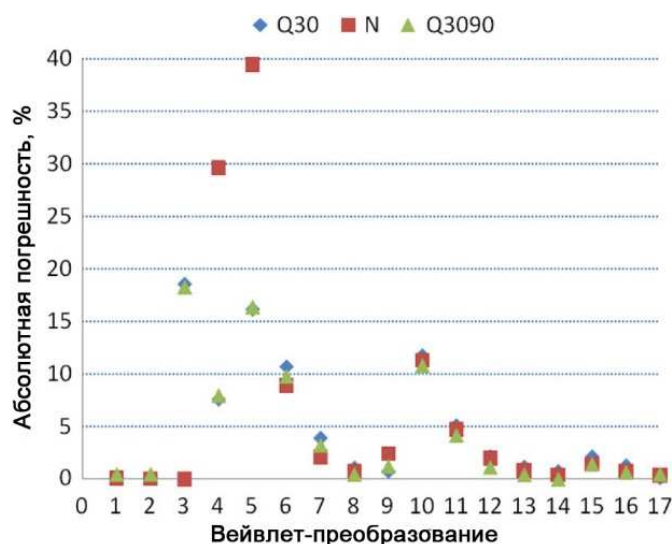


Рис. 1. Абсолютная процентная погрешность реактивной мощности между Добеши и биортогональными сплайн вейвлетами

На рис. 2 показано, что случаи 1, 2, 9, 13 и 16 (Добеши 43, Добеши 10, Обратный биортогональный 2.8, обратный биортогональный 3.9 и обратный биортогональный 6.8) обеспечивают наилучшие результаты. В общем и целом ДБ 43, ДБ 10, БИОР 6.8, и ОБИОР 6.8 обеспечивают более точные показания.

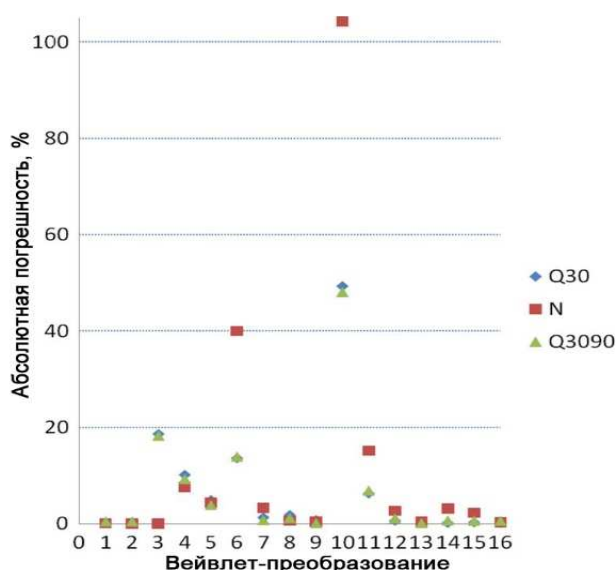


Рис. 2. Абсолютная процентная погрешность реактивной мощности между Добеши и обратными биортогональными сплайн вейвлетами

Не постоянное напряжение и линейная нагрузка. Этот случай представляет линейную нагрузку и $L=0.053788\text{Гн}$ подаваемого от источника напряжения в точке общего соединения. Если существует провал напряжения, то напряжение и результирующий ток полученные в результате процентной погрешности в энергии, измеренной с использованием разных подходов, представлены на рис. 3 и 4. Этот тест может возникнуть в результате запуска большого мотора, вызывающего падение напряжения в точке общего соединения, где подключена линейная нагрузка.

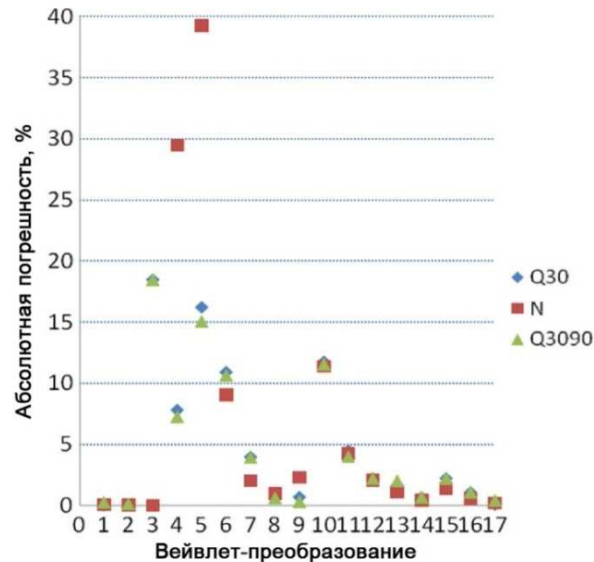


Рис. 3. Абсолютная процентная погрешность реактивной мощности между Добеши и биортогональными сплайн вейвлетами

На рис. 3 показано, что ДБ 43, ДБ 10, и БИОР 6.8 осуществляют наименьшую процентную погрешность.

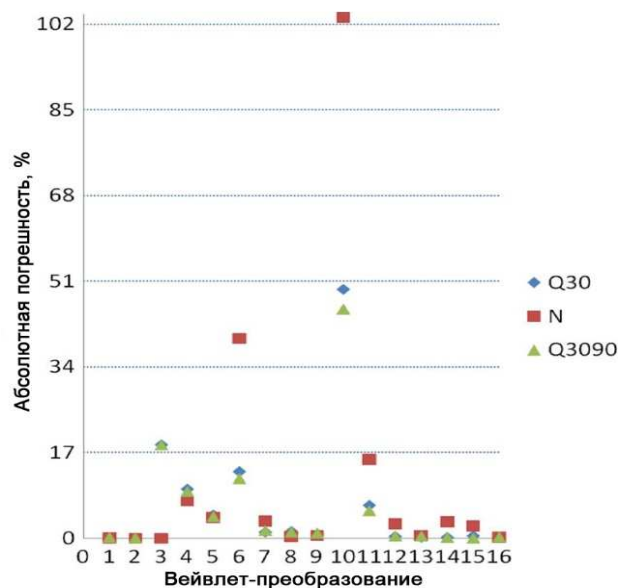


Рис. 4. Абсолютная процентная погрешность реактивной мощности между Добеши и обратными биортогональными сплайн вейвлетами

На рис. 4 показано, что ДБ 43, ДБ 10, ОБИОР 3.9 и ОБИОР 6.8 осуществляют наименьшую ошибку и лучше результаты показывают ортогональные вейвлеты ДБ43, ДБ 10 и биортогональные или обратные биортогональные 6.8.

Нестационарное напряжение и нелинейная нагрузка. В этом случае ток третьей гармоники увеличивается со стороны нагрузки с источником напряжения. Напряжение моделируется с падением напряжения вместе с результирующим током. Этот тестовый случай представляет падение напряжения, который может быть вызван большим мотором, начинающимся в окрестности точки общего соединения, в то же время поддерживая третью гармонику с нелинейной нагрузкой.

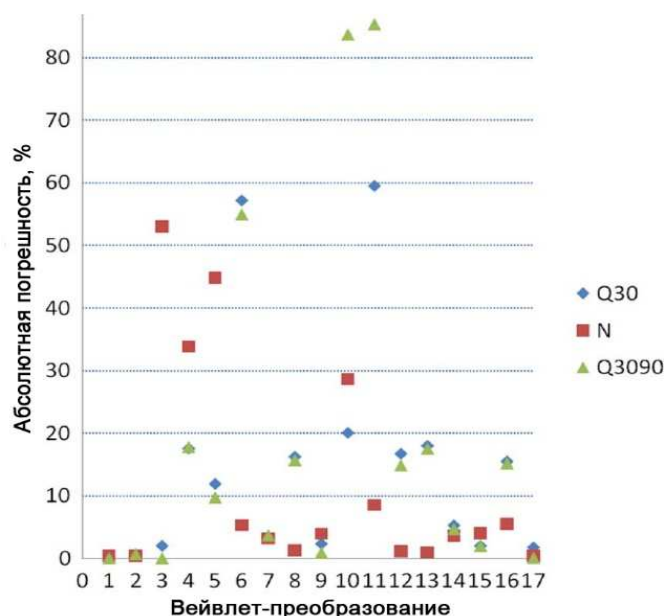


Рис. 5. Абсолютная процентная погрешность реактивной мощности между Добеши и биортогональными сплайн вейвлетами.

Наиболее известными нелинейными нагрузками в качестве источника гармоник являются силовые электронные преобразователи, используемые в качестве приводов с переменной скоростью. Более того, поскольку большинство подключаемых гибридных электромобилей оснащены силовыми электронными преобразователями, ожидается, что гармонические искажения будут увеличиваться по мере увеличения числа этих автомобилей в ближайшем будущем.

Процентная погрешность показана на рис. 5 показывает, что ДБ 43, ДБ 10, БИОР 6.8 и ОБИОР 2.8 обеспечивают самую низкую абсолютную процентную погрешность. Абсолютная процентная погрешность для неактивной мощности составляет 0.4122% для ДБ43, 0.4512% для ДБ10, 0.398191 для БИОР6.8 и 0.4120% для ОБИОР2.8.

Выводы и рекомендации. В данной работе исследованы характеристики электронных счетчиков реактивной энергии на основе трех различных принципов работы. Вейвлет-пакетное преобразование применяется

к ситуационным исследованиям, которые рассматривают стационарные и нестационарные нарушения качества мощности. В статье также была установлена полезность ортогональных, биортогональных или обратных биортогональных вейвлетов для такого анализа.

Результаты показывают, что ортогональные вейвлеты типа Добеши с порядком 10 или 43 способны обеспечить наиболее точные результаты во всех тематических исследованиях, рассмотренных в этой статье. Биортогональные и обратные биортогональные вейвлеты 6.8 также показывают точность в случае линейных нагрузок; Однако ошибки возникают, когда нагрузка становится нелинейной. Также обратный биортогональный 2.8 хорошо работает в рассмотренных исследованиях; Однако в нестационарных случаях возникают ошибки в неактивной мощности.

Результаты этого исследования позволяют сделать выводы об использовании вейвлет-анализа для измерения реактивной мощности и энергии. Одна из концепций заключается в замене существующих подходов на основе использования фундаментальных преобразований в частотной области с помощью вейвлет-анализа на основе нулевого узла. Можно сделать вывод, что если используются некоторые ортогональные вейвлеты, то оба подхода, а именно реактивная мощность узла нуль и подход с фазовым сдвигом 90 в узле нуль, дают одинаковые результаты. Существует некоторый выбор в вейвлет-преобразовании. Например, Добеши 10 можно выбрать, если требуется меньшее количество коэффициентов для ускорения времени вычисления. Эти два подхода обеспечивают реактивную мощность / энергию на основной частоте (50 Гц).

С другой стороны, реактивная мощность, измеренная с помощью ортогональных вейвлетов на основе метода полной мощности, обеспечивает точность для неактивной мощности. Неактивная мощность представляет собой активную мощность на вейвлет-пакетных узлах, отличных от узла ноль.

Результаты этого исследования показывают, что интеллектуальные счетчики следующего поколения должны обеспечивать отдельные измерения: реактивной мощности на узле нуля (либо на основе разделения реактивной мощности в этом узле, либо путем применения подхода с фазовым сдвигом 90), и неактивной мощности с использованием ортогональных вейвлетов. Выбор Добеши порядка 10 уменьшит вычислительную нагрузку за счет уменьшения количества коэффициентов.

Список литературы

1. Cataliotti A., Cosentino V., Nuccio S. The measurement of reactive energy in polluted distribution power systems: An analysis of the performance of commercial static meters // IEEE Trans. Power Del., 2008. Vol. 23. No. 3. P. 1296–1301.

2. Cataliotti A., Cosentino V., Nuccio S. Metrological characterization and operating principle identification of static meters for reactive energy: An experimental approach under non sinusoidal test conditions // *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 2009. Vol. 58. No. 5. P. 1427–1435.
3. Cataliotti A., Cosentino V., Nuccio S. Static meters for the reactive energy in the presence of harmonics: An experimental metrological characterization // *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 2009. Vol. 58. No. 8. P. 2574–2579.
4. Filipski P. A new approach to reactive current and reactive power measurement in non-sinusoidal systems // *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 1980. Vol. 29. No. 4. P. 423–426.
5. Wyatt J.L., Llic M. Time-domain reactive power concepts for nonlinear, non-sinusoidal or non-periodic networks // in *Proc. IEEE Int. Symp. Circuits and Systems*, 1990. Vol. 1. P. 387–390.
6. Czarnecki L.S. Measurement of the individual harmonics reactive power in non-sinusoidal systems // *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 1983. Vol. IM-32. No. 2. P. 383–384.
7. Czarnecki L.S. New power theory of the 3-phase non-linear asymmetrical circuits supplied from non-sinusoidal voltage sources // in *Proc. IEEE Int. Symp. Circuits and Systems*, 1988. Vol. 2. P. 1627–1630.
8. Czarnecki L.S., Lasicz A. Active, reactive and scattered current in circuits with non-periodic voltage of a finite energy // *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 1988. Vol. 37. P. 398–402.
9. Czarnecki L.S., Swietlicki T. Powers in non-sinusoidal networks: Their interpretation, analysis and measurement // *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 1990. Vol. 39. No. 2. P. 340–345.
10. Weon-Ki Y., Devaney M.J. Reactive power measurement using the wavelet transform // *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 2000. Vol. 49. No. 2. P. 246–252.
11. Croes T., Gherasim C., Keybus J. V., Ghijselen J., Driesen J., Belmans R. Power measurement using the wavelet transform of analytic signals // in *Proc. 11th Int. Conf. Harmonics and Quality of Power*, 2004. P. 338–342.
12. Morsi W.G., El-Hawary M.E. A new reactive, distortion and non-active power measurement method for non-stationary waveforms using wavelet packet transform // *Elect. Power Syst. Res.*, 2009. Vol. 79. No. 10. P. 1408–1415.
13. Emanuel A.E. Powers in non-sinusoidal situations-a review of definitions and physical meaning // *IEEE Trans. Power Del.*, 1990. Vol. 5. No. 3. P. 1377–1389.
14. Makram E., Haines R.B., Girgis A.A. Effect of harmonic distortion in reactive power measurement // *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 1992. Vol. 28. No. 4. P. 782–787.

15. IEEE Trial-Use Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Non-Sinusoidal, Balanced or Unbalanced Conditions, IEEE Std. 1459-2000, 2010.

16. Morsi W.G., EL-Hawary M.E. A new perspective for the IEEE Standard 1459-2000 via stationary wavelet transform in the presence of non-stationary power quality disturbance // IEEE Trans. Power Del., 2008. Vol. 23. No. 4. P. 2356–2365.

17. Page C.I. Reactive power in non-sinusoidal situations // IEEE Trans. Instrum. Meas, 1980. Vol. 29. P. 420–426.

18. Fryze S. Active, reactive and apparent power in networks with non-sinusoidal waveforms of voltage and current // ETZ, 1932. Vol. 53. No. 25. P. 596–99. No. 26. P. 625–27. No. 27. P. 700–702.

Смирнов Артем Иванович, асп., smiartem@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский горный университет,

Лутонин Александр Сергеевич, асп., lutonin93@mail.ru, Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский горный университет

APPLICATION OF WAVE ANALYSIS FOR MEASURING REACTIVE ENERGY WITH POWER QUALITY DISTURBANCES

A.I. Smirnov, A.S. Lutonin

In this paper, the characteristics of electronic reactive power meters are explored by estimating the differences that result from clear operating principles of the meter and the presence of stationary and non-stationary quality of power disturbances. The article, a comparative research is conducted to determine the efficiency of using orthogonal, biorthogonal or inverse biorthogonal wavelets to determine the reactive power. In addition, the document presents recommendations for measuring reactive power and energy for future generations of smart meters.

Key words: Harmonics, reactive power, power quality, wavelet transform.

Smirnov Artem Ivanovich, postgraduate, smiartem@mail.ru, Russia, Saint Petersburg, Saint Petersburg mining university,

Lutonin Alexander Sergeevich, postgraduate, lutonin93@mail.ru, Russia, Saint Petersburg, Saint Petersburg mining university

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕХНОЛОГИИ И МАШИНЫ ОБРАБОТКИ ДАВЛЕНИЕМ

Грязев М.В., Ларин С.Н., Исаева А.Н.

Исследование влияния анизотропии материала на повреждаемость материала при вытяжке с фланцем через радиальную матрицу 3

Ларин С.Н., Платонов В.И.

Модель изотермического свободного деформирования титановых сплавов 9

Ларин С.Н., Нуждин Г.А., Трегубов В.И.

Силовые режимы и предельные возможности деформирования трехслойных конструкций с каналами трапецевидной формы в режиме кратковременной ползучести 14

Яковлев С.С., Герасимова О.М.

Определение силовых параметров при многооперационной вытяжке с локальным пластическим деформированием 21

Крутиков П.В., Поцелуев К.О., Тесаков Д.М.

Особенности изменения силовых параметров процесса стесненного прямого выдавливания 26

Лавриненко В.Ю., Фам Х.Ф.

Разработка технологии восстановления чашки дифференциала грузового автомобиля пластическим деформированием 33

ВОЕННО-СПЕЦИАЛЬНЫЕ НАУКИ

Пятакович В.А., Василенко А.М.

Методы расчетной и экспериментальной оценки первичного гидроакустического поля морской цели 41

Лупанчук В.Ю., Кулешов В.В., Гончаров В.М.

Пути снижения погрешностей в системе наземной навигации специального транспортного средства 56

Зеленко В.К.

Как сбивать беспилотные летательные аппараты 72

<i>Хвостов А.А., Синюков В.В., Казьмин И.А., Пономарев С.В.</i> Контроль развития дефектов клапанов компрессоров воздухоразделительных установок методом вибродиагностики	75
<i>Мандрица Д.П.</i> Определение параметров стойкости бетона специальных сооружений при импульсных нагрузках взрыва	85
<i>Рубцов Н.С.</i> Алгоритм защиты от спуффинга аппаратуры потребителей спутниковых навигационных систем	92
<i>Лупанчук В.Ю., Гончаров В.М.</i> Способ обработки информации в комплексированной системе наземной навигации специального транспортного средства	102
<i>Хвостов А.А., Ряжских В.И., Синюков В.В., Журавлев А.А.</i> Повышение точности контроля параметров теплового режима групповой системы обогрева военной автомобильной техники в условиях низких температур	114
<i>Емельянов А.В., Левко И.В., Легков К.Е.</i> Методика оперативного решения информационно-расчетных задач программно-техническим комплексом на основе рационального распределения информационно-вычислительных ресурсов	129
<i>Емельянов А.В., Легков К.Е.</i> Имитационная модель процесса функционирования программно-технического комплекса при решении разнородных информационно-расчетных задач	135
<i>Калиниченко С.В., Корчагин П.В., Платонов В.К.</i> Подход к защите цифровой информации в автоматизированных системах специального назначения на основе применения скрытых метящих средств	141

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

<i>Витчук П.В., Трухов Н.В., Усачев А.В.</i> Методика расчета лифтовых ловителей резкого торможения	150

<i>Ивченко Т.Г., Петряева И.А., Михайлов А.Н.</i> Повышение эффективности сверления труднообрабатываемых материалов за счет использования СОТС	162
<i>Фирсанов В.В.</i> Изгиб композитной балки с учётом сдвиговой деформации	168
<i>Кузнецов В.С., Болтунов А.В., Пантюхина Е.В.</i> Анализ производительности модернизированного шнекового стекателя для отделения сусла-самотека	175
<i>Гидаснов В.Ю., Северина Н.С.</i> Численное моделирование рабочего цикла однотрубного импульсного детонационного двигателя	180
<i>Осипов К.Н., Заморенов М.В., Круговой А.Н.</i> К вопросу оценки измерительной информации в автоматизированном производстве в условиях априорной неопределенности	193
<i>Заярный С.Л., Логвинов А.А., Грачев Г.Ю.</i> Исследование имитационной модели растянутого композитного стержня	202
<i>Гринчар Н.Г., Сорокин П.А., Чалова М.Ю., Федасов Д.С.</i> Влияние конструктивных параметров на энергетические показатели модернизированного вырезающего устройства щебнеочистительных машин	210
<i>Родионова Е.Н., Матвеев И.А.</i> Исследование точности токарной обработки сложнопрофильных поверхностей корпуса блока системы управления	214
<i>Ляхов А.В., Гадалов В.Н., Макарова И.А., Ельников Е.А., Ерохин Р.Ю., Гвоздев А.Е., Кутепов С.Н., Пантюхин О.В.</i> Исследование влияния термоциклической обработки на спеченные псевдо- α -титановые сплавы	219
<i>Формалев В.Ф., Колесник С.А., Кузнецова Е.Л.</i> Математическое моделирование тепломассопереноса при фазовых превращениях композиционных материалов при высоких температурах	227

<i>Мельниченко Н.В., Парфёнов Н.И., Кошелев Д.И.</i> Структурообразование при отпуске низкоуглеродистой бейнитной стали	236
<i>Давыдов И.Б.</i> Анализ отказов и причин их возникновения в автомате для упаковки отпрессованных бульонных кубиков в фольгу	241
<i>Крицкая А.Р., Силаева Н.А., Лысенко А.Л., Горбунов А.К.</i> Вывод критериального уравнения термодинамики для прогнозирования развития машиностроения	246
<i>Маликов А.А., Сидоркин А.В., Разуваев М.Л., Смолянинов Н.С.</i> Некоторые аспекты конструкторско-технологического обеспечения экспериментального исследования теплофизических параметров процесса шевингования-прикатывания цилиндрических зубчатых колес	254
<i>Грубка Р.М., Михайлов А.Н., Петряева И.А.</i> Аппроксимация профиля зуба дисковой зуборезной модульной фрезы сплайнами Безье	262
<i>Голубничая Я.Р., Проскуряков Н.Е.</i> Технологии аутентификации защитных элементов полиграфической продукции	272
<i>Болтунов А.В., Кузнецов В.С., Пантюхина Е.В.</i> Автоматическая загрузка корковых пробок в автоматические линии розлива вин	281
<i>Бахишян Р.М.</i> К численному решению статических задач термоупругих оболочек ...	288
<i>Нестер А.А.</i> Влияние меди из сточных вод машиностроительного предприятия	295
<i>Маликов А.А., Сидоркин А.В., Рахметов С.Л.</i> Маршрутная технология зубообработки венца шевера-прикатника для обработки цилиндрических колес с круговыми зубьями	301
<i>Голубничая Я.Р., Проскуряков Н.Е.</i> Применение радиочастотной идентификации в защищенной полиграфии	308

<i>Агровиченко Д.В., Ковальский Б.И., Безбородов Ю.Н.</i> Результаты исследования влияния доливов на термоокислительную стабильность синтетических моторных масел	315

<i>Чубич В.М., Прокофьева А.Э.</i> Робастная процедура активной параметрической идентификации стохастических линейных дискретных систем	323

<i>Крюков В.А., Плясов А.В.</i> Многопоточность в планетарных передачах 2К-Н, 3К и 3К-2G-Н	335

<i>Сергеев Н.Н., Сергеев А.Н., Кутепов С.Н., Гвоздев А.Е., Стариков Н.Е., Пантюхин О.В.</i> Использование водородных ловушек для контроля процесса водородного растрескивания сварных соединений высокопрочных сталей	344

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

<i>Майоров Е.Е., Машек А.Ч., Цыганкова Г.А., Писарева Е.А.</i> Исследование спектрофотометра ультрафиолетовой области длин волн для анализа спектров пропускания дисперсных сред	357

<i>Зыкин С.И., Ивахно Н.В.</i> Результаты экспериментальных исследований и алгоритм калибровки датчика MPU6000	366

<i>Распопов В.Я., Малютин Д.М.</i> Измерительные приборы и системы для ориентации, стабилизации и управления	372

<i>Майоров Е.Е., Машек А.Ч., Цыганкова Г.А., Поликарпова А.А., Константинова А.А., Хохлова М.В.</i> Исследование интерферометра Майкельсона с когерентно- ограниченным источником излучения для контроля диффузно отражающих объектов	387

<i>Войтюк И.Н., Максимова О.С.</i> Исследование статистических характеристик системы для контроля состава нефтегазоводяной смеси в трубопроводе	398

Журбенко С.В.

Анализ показателей количества поданных заявок на изобретения по тематике «микромеханические гироскопы» в ведущих странах мира	409

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Шклярский Я.Э., Барданов А.И.

Управление активным выпрямителем напряжения в составе частотно-регулируемого привода при провалах напряжения	414

Гребеньков Д.В.

Подбор объёмных насосов для гидросистемы инерционного гидродифференциального трансформатора вращающего момента	426

Разоков Ф.М.

Оптимизация режима работы пенджикентской РЭС при нормированном коэффициенте загрузки трансформаторов	432

Гашио Е.Г., Гужов С.В., Кролин А.А., Началов А.В.

Расчёт ущерба электротехнического комплекса московского мегаполиса от опасных климатических изменений	439

Копырин В.А., Смирнов О.В.

Оптимизация режимов потребления реактивной мощности установками электроцентробежных насосов	450

Смирнов А.И., Лутонин А.С.

Применение волнового анализа для измерения реактивной энергии при нарушении качества электроэнергии	458

Научное издание

ИЗВЕСТИЯ
ТУЛЬСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Выпуск 4

Редактор С.Г. Лихачева

*Компьютерная правка и верстка – К.А. Александрович, М.С. Шевков,
Б.С. Яковлев*

Учредитель:

ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»
300012, г. Тула, просп. Ленина, 92

Изд. лиц. ЛР № 020300 от 12.02.97

Подписано в печать 23.04.18. Дата выхода в свет 27.04.18

Формат бумаги 70×100 1/8. Бумага офсетная

Усл. печ. л. 77,67

Тираж 500 экз. Заказ

Цена свободная

Адрес редакции и издателя:

300012, г. Тула, просп. Ленина, 95

Отпечатано в Издательстве ТулГУ

300012, г. Тула, просп. Ленина, 95