

## Редакционная коллегия:

Кречетов А.А., гл. редактор, к.т.н. (РФ)  
Костюк С.Г., зам. гл. ред., к.т.н. (РФ)  
Блюменштейн В. Ю., д.т.н. (РФ)  
Голофастова Н. Н., к.э.н. (РФ)  
Зникина Л. С., д.п.н. (РФ)  
Исмагилов З. Р., член-корреспондент  
РАН, д.т.н. (РФ)  
Каширских В. Г., д.т.н. (РФ)  
Клишин В. И., член-корреспондент  
РАН, д.т.н. (РФ)  
Клубович В. В., академик НАН Белару-  
си, д.т.н. (Беларусь)  
Колесников В. Ф., д.т.н. (РФ)  
Конторович А. Э., академик РАН, д.т.н.  
(РФ)  
Коротков А. Н., д.т.н. (РФ)  
Мальшев Ю. Н., академик РАН, д.т.н.  
(РФ)  
Маметьев Л. Е., д.т.н. (РФ)  
Першин В. В., д.т.н. (РФ)  
Петрик П. Т., д.т.н. (РФ)  
Ренев А. А., д.т.н. (РФ)  
Смирнов А. Н., д.т.н. (РФ)  
Трубчанинов А. Д., к.т.н. (РФ)  
Угляница А. В., д.т.н. (РФ)  
Хямяляйнен В. А., д.т.н. (РФ)  
Цзяо Ви-го, д.т.н. (Китай)  
Черкасова Т. Г., д.т.н. (РФ)  
Шевченко Л. А., д.т.н. (РФ)  
Юй Шен-вэнь, д.т.н. (Китай)

Кемерово  
© Кузбасский государственный  
технический университет имени  
Т.Ф. Горбачева, 2016

## СОДЕРЖАНИЕ

### НАУКИ О ЗЕМЛЕ

<i>Жариков С.Н.</i> О способах изучения свойств грунтов для повыше- ния эффективности буровзрывных работ .....	3
<i>Аксенов В.В., Садовец В.Ю., Паиков Л.А.</i> Обоснование необходимос- ти создания исполнительного органа геохода для разрушения пород малой крепости .....	8
<i>Федотов А.А., Гарина Е.А., Кокурин Д.А.</i> Некоторые результаты расче- та потерь угля при отработке дизъюнктивных нарушений.....	15
<i>Пириева Н.Н.</i> Экспериментальная оценка геомеханического состоя- ния краевых частей пластов и целиков на шахтах АО «СУЭК- Кузбасс» .....	24
<i>Торро В.О., Кузнецов Е.В., Ремезов А.В.</i> Обоснование необходимос- ти создания комплексных механизированных систем из мехкрепей различных типов .....	30
<i>Шабанов Е.А., Простов С.М.</i> Натурные испытания метода контро- лируемой электрохимической очистки грунта от нефтезагрязнений. Ч.И. Изменение физических свойств грунтового массива.....	35
<i>Шабанов Е.А., Простов С.М.</i> Натурные испытания метода контро- лируемой электрохимической очистки грунта от нефтезагрязнений. Ч.II. Электрофизический контроль .....	44
<i>Катанов И.Б.</i> Модель для изучения процесса перемещения горной массы взрывом .....	51
<i>Новиньков А.Г., Протасов С.И., Самусев П.А., Таишинов А.С.</i> Опре- деление сейсмобезопасных расстояний при промышленных взрывах	56
<i>Селюков А.В.</i> Проектирование транспортной и бестранспортной технологий открытой разработки наклонных и крутопадающих зале- жей динамичностью рядов вариаций .....	62
<i>Баёв М.А., Хямяляйнен В.А.</i> Исследование закрепляющего материа- ла трещин гидроразрыва при извлечении метана из угольных пластов	68
<i>Мартынов В.Л., Колесников В.Ф.</i> Обоснование рационального порядка разработки сложноструктурных угольных месторождений....	73

### ТРАНСПОРТНОЕ, ГОРНОЕ И СТРОИТЕЛЬНОЕ

#### МАШИНОСТРОЕНИЕ

<i>Гилета В.П., Тищенко И.В., Ванаг Ю.В.</i> Повышение эффективности проходки скважин методом виброударного продавливания .....	82
<i>Герике П.Б., Блюменштейн В.Ю.</i> Результаты вибродиагностики обо- рудования центробежных насосов применительно к созданию единого критерия оценки фактического состояния .....	89
<i>Нейман Л.А.</i> Динамическая модель двухкатушечной синхронной электромагнитной машины ударного действия с комбинированным рабочим циклом .....	97
<i>Паначев И.А., Широколов Г.В., Кузнецов И.В., Широколова А.Г.</i> Обоснование эффективности эксплуатации большегрузных автоса- мосвалов на разрезах по критерию долговечности заднего моста .....	106
<i>Маметьев Л.Е., Нестеров В.И., Цехин А.М., Мухортиков С.Г., Бо- рисов А.Ю., Блюменштейн В.Ю.</i> Силовые характеристики реверсив- ных радиальных коронок с дисковым инструментом для проходче- ских комбайнов избирательного действия .....	114

#### МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

<i>Рябинин А.А.</i> Влияние предварительного термостатирования на оп- тические свойства синтетического моторного масла Mobil super 3000 5W-40 SJ/SL/SK/CF .....	123
<i>Блюменштейн В.Ю., Ферранти А.В.</i> Расчет и обоснование парамет- ров упрочняющей технологии изготовления валов редуктора буро- вого станка на основе механики технологического наследования.....	129

#### ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

<i>Глушкова А.И., Долгопол Т.Л., Воробьева Д.Ю.</i> Сравнительный ана- лиз способов повышения надежности электроснабжения угольных шахт Кузбасса .....	140
<i>Гужов С.В., Янченко С.А.</i> Анализ работоспособности функциони- рования электротехнических комплексов и систем в режимах несину- соидальности тока .....	145

<i>Захарова А.Г., Лобур И.А., Шаулева Н.М., Боровцов В.А.</i> . Оценка влияния горно-геологических условий угольных шахт Кузбасса на уровень их электропотребления .....	152
<i>Каширских В.Г., Гаргаев А.Н., Завьялов В.М., Семькина И.Ю.</i> . Компьютерная система для функциональной диагностики электроприводов карьерных экскаваторов .....	159
<b>ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ</b>	
<i>Вотолин К.С., Жеребцов С.И., Исмагилов З.Р.</i> . Технологии получения комплексных гранулированных гуматных удобрений и эффективность их применения .....	169
<i>Черкасова Т.Г., Субботин С.П., Неведров А.В., Папин А.В., Колмаков Н.Г., Васильева Е.В.</i> . Оценка показателя коксумости угольных концентратов на основе исследования прочности нелетучего остатка от определения выхода химических продуктов коксования.....	178
<i>Черкасова Т.Г., Васильева Е.В., Тихомирова А.В., Бобровникова А.А., Неведров А.В., Папин А.В.</i> . Угольные отходы как сырье для получения редких и рассеянных элементов .....	185
<i>Петров И.Я., Трясунов Б.Г.</i> . Получение мезитилена методом дегидроочистки с <sub>9</sub> -фракций углеводородов, выделяемых из продуктов пиролиза углей .....	190
<b>ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ</b>	
<i>Семенов Ю.Н., Семенова О.С.</i> . Применение методов кластеризации при организации междугородных перевозок грузов .....	201
<i>Самородова Л.Л., Любимов О.В., Якунина Ю.С.</i> . Применение SCADA-систем в угольной промышленности .....	206
<b>ХРОНИКА</b>	
Валерию Федоровичу Колесникову 80 лет.....	214
Вячеславу Андреевичу Ермолаеву 75 лет.....	215
Юрию Васильевичу Лесину 70 лет.....	216
<i>Вниманию авторам</i> .....	217

Журнал издается с 1997 г.

Учредителем является Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций – Свидетельство ПИ №77 -060779 от 11 февраля 2015г.

Входит в Перечень ВАК РФ – ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук. по направлениям 05.02.00 Машиностроение и машиноведение, 05.05.00 Транспортное, горное и строительное машиностроение, 05.09.00 Электротехника, 05.17.00 Химическая технология, 25.00.00 Науки о Земле

Полнотекстовой доступ к электронной версии журнала на сайте [www.elibrary.ru](http://www.elibrary.ru)

Подписной индекс 14299 по каталогу российской прессы «Почта России»

Ответственный редактор -  
к.ф.-м.н., профессор кафедры прикладных информационных технологий  
- М.А.Тынкевич

Технический редактор  
О.А.Останин.

Дизайн обложки  
Ю.Е.Волчков, Д.А.Бородин

Адрес редакции: 650000,  
Кемерово, ул. Весенняя 28,  
ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева», тел.: 39-63-14  
[www.vestnik.kuzstu.ru](http://www.vestnik.kuzstu.ru)

Подписано к печати 30.11.2016

Формат 60×84 /8.

Бумага офсетная.

Отпечатано на МФУ

. Уч.-изд. л. 27,25

Тираж 150 экз.

ООО «Типография»  
632867, НСО, г.Карасук,  
ул. Котовского, 10

УДК 621.3

**АНАЛИЗ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ  
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ И СИСТЕМ  
В РЕЖИМАХ НЕСИНУСОИДАЛЬНОСТИ ТОКА****EFFICIENCY ANALYSIS OF FUNCTIONING ELECTROTECHNICAL  
COMPLEXES AND SYSTEMS IN THE REGIMES  
OF NON-SINUSOIDAL VOLTAGES**

**Сергей Вадимович Гужов,**  
к.т.н., e-mail: [GuzhovSV@yandex.ru](mailto:GuzhovSV@yandex.ru)  
**Sergey V. Guzhov, Ph. D.,**  
**Сергей Александрович Янченко,**  
к.т.н., e-mail: [YanchenkoSA@mpei.ru](mailto:YanchenkoSA@mpei.ru)  
**Sergey V. Yanchenko, Ph. D.,**

ФГБОУ ВО НИУ «МЭИ», отдел энергоменеджмента, 111250, Россия, г. Москва, Красноказарменная улица, дом 14

National Research University "Moscow Power Engineering Institute", energy management department, 14 Krasnokazarmennaya street, Moscow, 111250, Russian Federation

**Аннотация:**

*В статье приведены основные понятия, основы анализа сетей с нелинейной нагрузкой. Изложены основы анализа влияния несинусоидальности тока на электропотребление оборудования сети. Рассмотрены некоторые источники высших гармоник тока, характерные для питающих сетей и сетей потребителей электрической энергии. Приведены результаты математического моделирования электротехнических систем на примере сети жилого здания в режимах несинусоидальности тока. Приведены результаты прогнозирования состава высших гармоник тока в групповых линиях с целью расчёта надёжности электрооборудования и сетей потребителя. Показана необходимость снижения объёмов потребляемой электроэнергии на счёт снижения уровня эмиссии гармонических составляющих для жилых зданий.*

**Abstract:**

*The article presents basic concepts, framework for the analysis of networks with nonlinear load. Framework for analysis of the effect of non-sinusoidal current, electropo-consumption of network equipment. Some sources are considered of higher current harmonics, characteristic of supply networks and electricity consumers. The results of mathematical modeling of electrical systems on the example network of a residential building in non-sinusoidal current. The results predict the composition of the higher harmonic current in the group lines for the purpose of calculation of reliability of electrical equipment and networks of the consumer. The necessity of reducing the amount of electricity consumed at the expense of reduction of emission of harmonic components for residential buildings.*

**Ключевые слова:** работоспособность, несинусоидальность тока, полупроводниковые преобразователи, коэффициент гармонических составляющих.

**Key words:** performance, non-sinusoidal current, semiconductor converters, harmonic distortion.

Электрический прибор - это техническое устройство, приводимое в действие с помощью электричества и выполняющее некоторую полезную работу. Каждый электроприбор сконструирован для работы при определенных параметрах электрической энергии: номинальном напряжении, частоте, токе и т.п. Для работы потребителя электрической энергии в паспортных условиях должно быть оговорено электроснабжение с требуемым уровнем качества электрической энергии. Гармонические составляющие напряжения возни-

кают в электрических сетях с подключенным электрооборудованием, потребляющим несинусоидальный ток. Примерами нелинейной нагрузки могут служить; циклоконвертеры, осуществляющие непосредственное преобразование частоты; статические компенсаторы реактивной мощности; выпрямители на основе полупроводниковых элементов, применяемые в электроприводе и электрохимическом производстве; блоки частотного регулирования электроприводе, а также практически все бытовые и офисные электропотребители.

В связи с высоким ростом доли нелинейных нагрузок в электрических сетях возрастает вероятность функционирования электротехнических комплексов и систем в режимах несинусоидальности напряжения и тока. В 2014 году установлены допустимые значения показателей качества электрической энергии (ПКЭ) для точек передачи электрической энергии в сетях низкого, среднего и высокого напряжения [1], а также нормы и методы испытаний технических средств с потребляемым током не более 16А в одной фазе [2]. Превышение допустимых значений ПКЭ приводит к ускоренному износу электрооборудования, ускоренному старению изоляции, сбоям в работе систем автоматического управления [3], возникновению дополнительных потерь электрической энергии.

Искаженный гармонический состав тока и напряжения в сети ухудшает работу всех электроприборов и потребителей электрической энергии. Уровень дополнительных потерь от несинусоидальности тока в питающих сетях промышленных предприятий составляет 2–4% номинальных потерь по сравнению с синусоидальным, во внутризаводских сетях они достигают 10–15% [4]. В целом по стране из-за повышенного гармонического состава при передаче и распределении электроэнергии дополнительно теряется 2,5–3% всей генерируемой мощности.

Целью настоящей статьи является математическое моделирование электротехнических систем на примере сети жилого здания в режимах несинусоидальности тока с целью последующего анализа работоспособности элементов сети, получения данных для оценки дополнительных потерь электрической энергии от несинусоидальности тока.

Под работоспособностью функционирования в статье понимается способность электротехнических комплексов и систем выполнять передачу и потребление электрической энергии с заданным качеством при минимальных потерях. Под данное определение подпадает и задача функционирования электротехнической системы в режимах несинусоидальности тока и напряжения с условием

потребления электрической энергии в паспортных условиях.

Кривые напряжений  $u(t)$  и токов  $i(t)$  для нелинейной нагрузки, работающей в продолжительном режиме математически могут быть представлены рядом Фурье:

$$i(t) = I_0 + \sum_k I_k \sin(k\omega t + \varphi_k), \quad (1)$$

где  $I_0$  — постоянная составляющая, практически всегда равная нулю в случае промышленных или бытовых сетей;  $I_k$  и  $\varphi_k$  — амплитуда и фазовый угол  $k$ -й гармонической составляющей, соответственно;  $\omega$  — частота сетевого напряжения, рад/с.

Для оценки несинусоидальности тока или напряжения используются спектр гармонических составляющих [ $I_1$ ; ...;  $I_k$ ; ...;  $I_{40}$ ] и суммарный коэффициент гармонических составляющих [5]:

$$K_I = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^n I_{k,d}^2}}{I_{1,d}} \quad (2)$$

где  $I_{k,d}$  и  $I_{1,d}$  — действующие значения  $k$ -й и основной гармоник,  $n$  — количество учитываемых гармоник. Аналогично определяется  $K_U$ .

Помимо  $K_I$  и  $K_U$  для оценки уровней отдельных гармонических составляющих тока или напряжения используются коэффициенты гармонических составляющих  $K_{I(k)}$ , которые представляют собой отношение действующих значений  $k$ -й гармоники к основной

$$K_{I(k)} = I_{k,d} / I_{1,d}.$$

Для различных нагрузок  $K_I$  варьируется от нескольких процентов до 100% и выше, в то время как суммарный коэффициент гармонических составляющих кривой напряжения  $K_U$  обычно не превышает 5%. Для коэффициентов  $K_U(k)$  и  $K_I(k)$  электрической нагрузки с потребляемым током в одной фазе до 16А [2] устанавливаются нормы, которые для отдельных гармонических составляющих напряжения не превышают 6%, а для гармоник тока могут составлять десятки процентов.

Повышенный фон гармонических составляющих вызывает дополнительные потери в элемен-

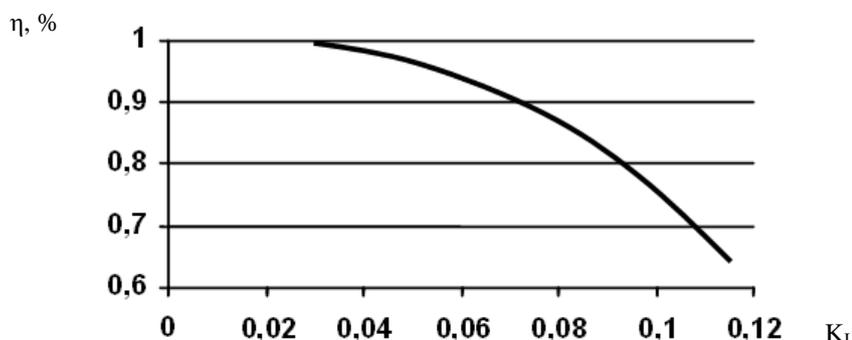


Рисунок 1. Зависимость обеспечиваемой механической мощности асинхронного электродвигателя от суммарного коэффициента гармонических составляющих тока ( $K_I$ ) [7]

Figure 1. Dependence provide mechanical power of the asynchronous e-tradigital of the total harmonic distortion of current

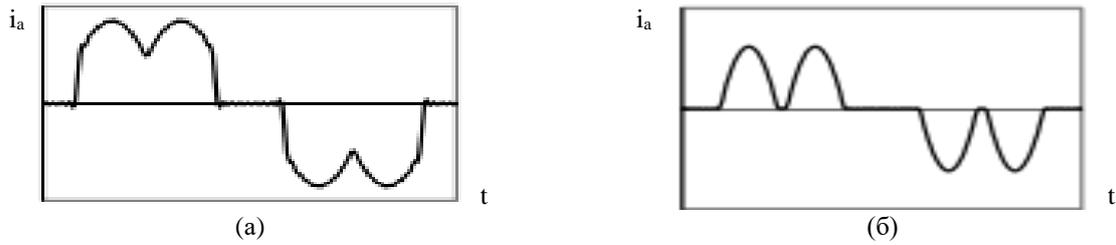


Рисунок 2. Кривые тока  $i_a$  при высоком  $K_I=55.3\%$  (а) и низком  $K_I= 77.4\%$  (б) уровнях загрузки преобразователя, включённого по схеме «треугольник-треугольник»

Figure 2. The curves of the current  $i_a$  at high  $KI=55.3\%$  (a) and low  $KI= 77.4\%$  (b) levels of the Converter included in the scheme "triangle-triangle"



Рисунок 3. Кривые тока  $i_a$  при высоком  $K_I=25,6\%$  (а) и низком  $K_I=37,4\%$  (б) уровнях загрузки преобразователя, включённого по схеме «треугольник-звезда»

Figure 3. The curves of the current  $i_a$  at high  $KI=25,6\%$  (a) and low  $KI=37.4\%$  (b) of the Converter included in the scheme "triangle-star"

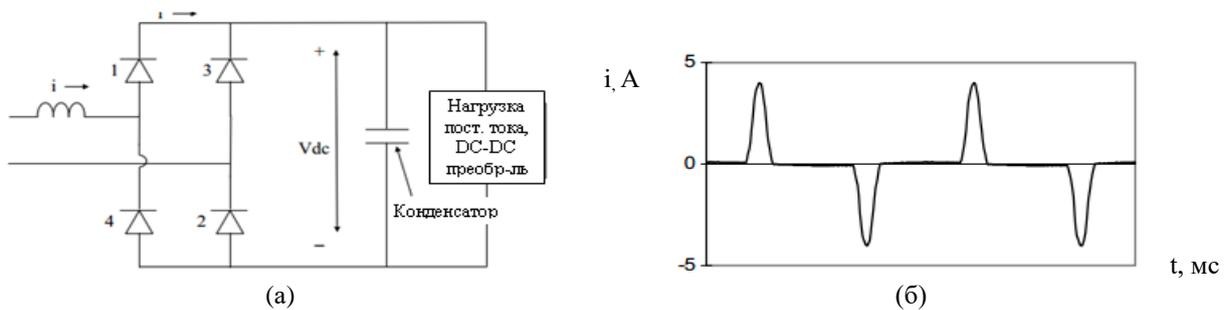


Рисунок 4. Однофазный импульсный источник питания (а) и форма кривой тока питания (б)

Figure 4. Single-phase switching power supply (a) and waveform of current of power (b)

Таблица 1. Амплитудный гармонический спектр тока питания некоторых потребителей электроэнергии

Table 1. The amplitude of the harmonic spectrum of the supply current of some electrical consumers

Амплитудный гармонический спектр тока питания	$I_1, A$	$I_3/I_1, \%$	$I_5/I_1, \%$	$I_7/I_1, \%$	$I_9/I_1, \%$	$K_I, \%$
телевизор 125 Вт	0.53	92.2	79.7	63.3	45.3	149.2
системный блок ПК 100 Вт	0.4	75.5	39.1	15	9.4	87.5
холодильник 400 Вт	2.12	0	0	0	0	0
источник света КЛЛ-20Вт	0.046	79.5	53.8	28.7	16.7	110.4

тах электротехнических комплексов.

Например, электрические машины с увеличением фона гармонических составляющих тока снижают механическую мощность на валу (рис. 1). При использовании схемы соединения обмоток статора «треугольник» гармоники прямой последовательности: 7, 13, 19 – разгоняют двигатель, обратной последовательности: 5, 11, 17 – тормозят с частотой  $f_k$ :

$$f_k = k \cdot f, \quad (4)$$

где  $k$  – номер гармоники;  $f=50\text{Гц}$  – частота первой гармоники. Потери, обусловленные наличием

высших гармоник тока в статорной обмотке во вращающихся машинах, определяются как

$$\Delta P_{(v)STAT} = \Delta P_{НОМ} \left( 1 + \frac{1}{K_{r1}} \sum_{v=2}^{\infty} [K_{I(v)}^2 K_{r(v)}] \right) \quad (5)$$

где  $\Delta P_{НОМ}$  – потери в меди обмотки при синусоидальном токе;  $K_{I(v)}$  – коэффициент  $v$ -й гармоники тока;  $K_{r(1)}$  и  $K_{r(v)}$  – коэффициенты увеличения потерь (коэффициенты вытеснения) для 1-й и  $v$ -й гармоник тока, определяемые в зависимости от конструкции машины [12].

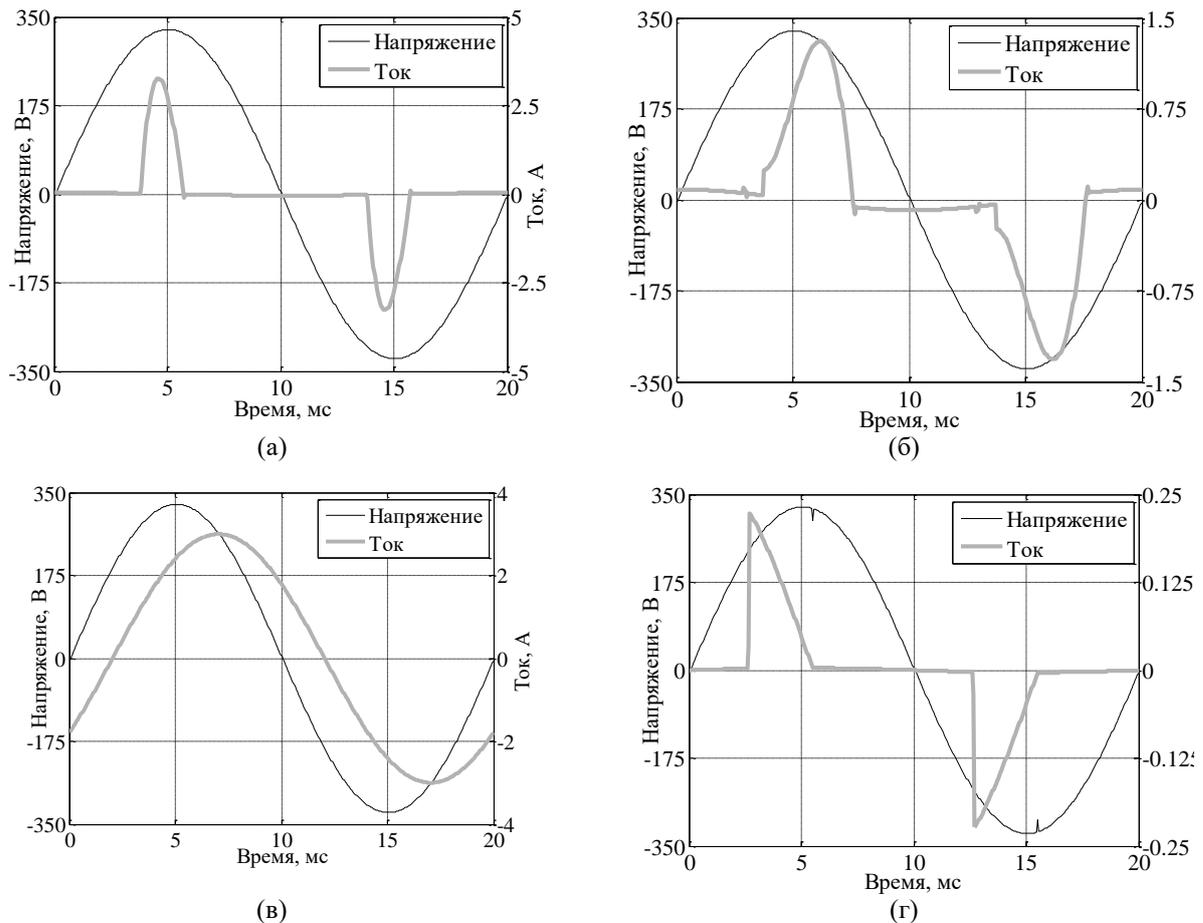


Рисунок 5. Кривые тока питания телевизора (а); системного блока персонального компьютера (б), холодильника (в), питания источника света КЛЛ (г)

Figure 5. Curves supply current TV (a); the system unit of a personal computer (b) refrigerator (c), the power of the light source CFLs (g)

В фазах обмоток статора гармониками создаётся пульсирующая магнитодвижущая сила, приводящая к появлению в зазоре несинхронных магнитных полей, создающих дополнительные потери. Наличие гармоник могут привести к значительной вибрации вала.

Искажённый состав тока и напряжения может подаваться и со стороны питающей сети. Наиболее часто встречающимися генераторами высших гармоник тока в городских системах электроснабжения является полупроводниковые преобразователи электрической энергии. Различают неуправляемые и управляемые преобразователи. Электрооборудование с управляемыми выпрямителями наиболее широко применяется для питания мощных электроприемников. Неуправляемые выпрямители (рис. 3) с широтно-импульсным управлением (ШИМ) часто применяются для электрооборудования малой и средней мощности для организации регулируемого электропривода. Уровень искажений кривой тока на стороне питающей сети для неуправляемых диодных выпрямителей выше, чем для управляемых тиристорных. Форма кривой тока меняется с изменением уровня нагрузки: на рис. 2 показаны кривые токов  $i_a$  для

схем соединения обмоток трансформатора «треугольник-треугольник» или «звезда-звезда», на рис. 3 – для схем соединения обмоток трансформатора «треугольник-звезда» или «звезда-треугольник». Высокая степень искажений кривой тока, как правило, ограничивает применение неуправляемых выпрямителей для нагрузок мощностью не более 300 кВт [10]. Приведённые кривые тока демонстрируют факт наличия высших гармоник тока в питающей сети с мощным вентиляльным преобразователем даже при низкой нагрузке рассматриваемого преобразователя, а значит для любого режима питающей сети.

Бытовые и офисные потребители электрической энергии, подключённые к сетям потребителя, как правило содержат маломощные импульсные источники питания преобразующие ток сети в ток, параметры которого наиболее благоприятны для эффективной работы нагрузки. В качестве «входного каскада» импульсного источника питания чаще всего выступает мостовой выпрямитель со сглаживающим конденсатором, который обеспечивает снижение пульсаций выпрямленного сетевого напряжения (рис. 4). Чем ниже уровень пульсаций постоянного напряжения конденсатора, тем

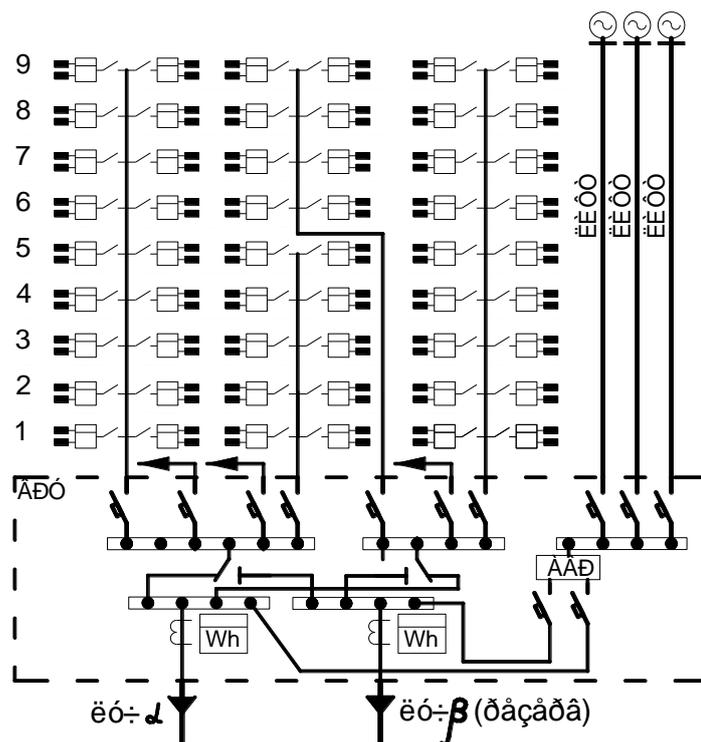


Рисунок 6. Схема питания нагрузки от двух трансформаторной КТП  
Figure 6. The scheme of load power supply from two transformer substations

короче интервал его зарядки от сети переменного тока, а значит интервал протекания тока, что вызывает высокие уровни гармонических составляющих тока питания [8].

В качестве примера приведены формы кривых тока телевизора и монитора (рис. 5а), системного блока персонального компьютера (рис. 5б), холодильника (рис. 5в), источника света КЛЛ-10Вт (рис. 5г). полученные методом математического моделирования на основании измеренных амплитудных гармонических спектров тока (табл. 1)

В связи с наличием в питающей сети и сети потребителя значительного числа источников несинусоидальных помех возникает необходимость расчёта уровней гармонических составляющих тока и напряжения в сетях с целью последующего поиска способов снижения потерь электроэнергии от несинусоидальности тока, а также в устранении источников и механизмов распространения высших гармонических составляющих тока по элементам электрической сети.

Решение задачи технико-экономического расчёта потерь электрической энергии для городских сетей уличного освещения, оснащённых однотипной нагрузкой с нелинейными характеристиками, подробно описаны в [9]. В рамках данной статьи ставится задача расчёта уровня гармонических составляющих тока жилого дома, содержащего нелинейную нагрузку.

На рис. 6 приведён пример упрощенной принципиальной однолинейной схемы вводно-распределительного устройства жилого девяти-

этажного трёхподъездного дома на 108 квартир. Ввод  $\alpha$  используется в качестве основного, ввод  $\beta$  находится в резерве.

В рамках настоящего расчёта приняты следующие допущения:

- моделирование тока питания многоквартирного жилого дома проведено в программном комплексе Matlab/Simulink с помощью разработанных компьютерных моделей гармонической эмиссии тока наиболее распространенных нелинейных электроприемников [10], [11], [12];
- поскольку в целях обеспечения симметричного распределения нагрузок по фазам квартиры здания делятся на три равных группы, рассмотрение несинусоидального режима нагрузок производится только для одной фазы, что снижает число моделируемых квартир до 36 в одной фазе;
- расчёт производится для вечерних часов, что говорит о практически полном объёме используемых в квартирах и местах общего пользования светильниках;
- во всех светильниках применяются компактные люминесцентные источники света;
- в каждой квартире включён холодильник, эксплуатирующийся на средней загрузке;
- в каждой квартире включено по одному телевизору и одному компьютеру в комплекте с отдельно включённым монитором;
- в расчётный период не используется ни одного лифта;
- в здании нет единой системы климатизации и принудительной вентиляции;

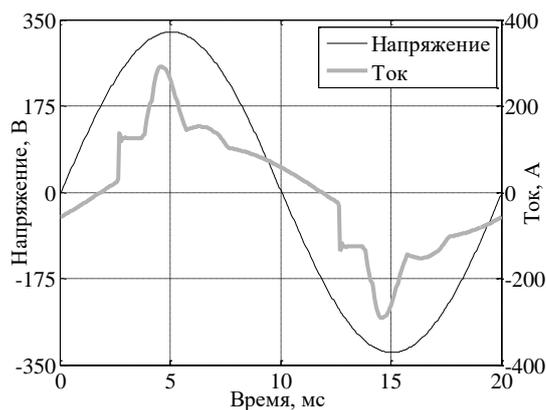


Рисунок 7. Результаты моделирования для 36 квартир с минимальной нагрузкой  
Figure 7. Simulation results for 36 apartments with minimum loading

Таблица 2. Амплитудный гармонический спектр тока питания некоторых потребителей электроэнергии  
Table 2. The amplitude of the harmonic spectrum of the supply current of some electrical consumers

$I_1, A$	$I_3/I_1, \%$	$I_5/I_1, \%$	$I_7/I_1, \%$	$I_9/I_1, \%$	$K_1, \%$
126	29.4	12.7	7.2	9.7	36.7

- в здании нет ИТП, горячая вода поступает от ЦТП, не получающего электрической энергии от ВРУ здания;

- в здании нет и к зданию не подключены суб. абоненты, магазины, комбинаты предоставления услуг и пр.;

- в здании не производится ремонт квартир;

- в здании не производится кап. ремонт, либо ремонт мест общего пользования;

- рассматриваемая часть электрической сети содержит ВРУ и отходящую от него питающую линию, которые могут быть представлены в виде источника синусоидального напряжения с внутренним сопротивлением. Питающая линия от ВРУ до этажных распределительных щитов прокладывается кабелем 4x50 мм с допустимой величиной тока 167А, удельным активным сопротивлением 0.36 Ом/км, удельным индуктивным сопротивлением 0.063 Ом/км. Принимая длину питающей линии 100 м, получаем величины внутреннего сопротивления равными 36 мОм и 6.3 мОм;

- моделирование осуществляется по методу наихудшего случая с целью анализа максимально возможного уровня несинусоидальности;

- кривые тока и напряжения питающей сети имеют идеальную синусоиду.

На основе однолинейной схемы жилого дома и данных о гармонических спектрах токов нагрузки рассчитаем, используя (1)-(5) суммарные суммарные коэффициенты гармонических составляющих кривых тока на основном вводном кабеле.

Результаты моделирования (рис. 7, табл. 2),

характеризуются существенным уровнем несинусоидальности, который практически полностью обусловлен 3-й и 5-й гармониками. В то же время наличие суммарной мощности линейных нагрузок (холодильник и т.д.) над мощностью нелинейных обеспечивает подавление 5-й и 7-й гармоник низких порядков [10].

На основании показанного расчёта можно сделать вывод о наличии существенных гармонических искажений кривых тока даже при наличии простейшей нагрузки, характерной для зданий жилищного хозяйства. Полученные результаты могут быть использованы для зданий с преобладающей офисной нагрузкой.

Проведённое математическое моделирование электротехнических систем на примере сети жилого здания в режимах несинусоидальности тока позволяет прогнозировать состав высших гармоник тока в групповых линиях с целью расчёта надёжности электрооборудования и сетей потребителя, оценки дополнительных потерь, проведения технико-экономического обоснования целесообразности установки компенсирующих устройств, упрощения процедуры выбора фильтров высших гармонических составляющих тока. Предложенная методика также может быть использована при проектировании вновь создаваемых электротехнических комплексов, а также для прогноза состава высших гармоник тока для различных режимов использования электротехнических установок с целью оценки их работоспособности.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 32144–2013. совместимость технических средств электро- магнитная. нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. — М.: Стандартинформ, 2014.
2. ГОСТ 30804.3.2–2006. Совместимость технических средств электромагнитная. Эмиссия гармонич-

ческих составляющих тока техническими средствами с потребляемым током не более 16 а (в одной фазе). Нормы и методы испытаний. — М.: Стандартинформ, 2014.

3. Гармоники в электрических системах / Дж. Арриллага [и др.]. — М.: Энергоатомиздат, 1990.

4. Жежеленко, И.В. Избранные вопросы несинусоидальных режимов в электрических сетях предприятий / И.В. Жежеленко. — М.: Энергоатомиздат, 2007.

5. Жежеленко, И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промышленных предприятий / И.В. Жежеленко. — М.: Энергоатомиздат, 1984.

6. Качество электроэнергии в электрических сетях и способы его обеспечения В. Г. Федченко [и др.]. // Учебное пособие по курсу «Передача и распределение электрической энергии». М.: Издательство МЭИ, 1992. — 102 с.

7. Austin H. Bonnett. The Impact that Voltage and Frequency Variations have on AC Induction Motor Performance and Life in Accordance with NEMA MG-1 Standards / Austin H. Bonnett, // October. 1998.

8. Работоспособность и качество функционирования электротехнических комплексов и систем в режимах несинусоидальности напряжения: учебно-методическое пособие. - М.: Изд-во МЭИ, 2016 г.- 36 стр.

9. Гужов, С.В. Разработка методики расчета установившихся режимов электрических сетей наружного освещения с учетом нелинейных характеристик светодиодных светильников: дисс. ... канд. техн. наук: 05.09.03: защищена 18.06.09: утв. 09.10.09 / С.В. Гужов. — М., 2009 — 147 с.

10. Цырук, С. А. Моделирование основных источников несинусоидальности в бытовых электросетях / Цырук, С. А.; Янченко, С. А.; Рыжкова, Е.Н. // Вестник МЭИ №3 2013, с.67-71.

11. A. M. Blanco. Schegner Impact of supply voltage distortion on the current harmonic emission of non-linear loads / A. M. Blanco, S. Yanchenko, J. Meyer, P. // Dyna, August 2015, Vol. 82 Issue 192, p. 150.

12. S. Yanchenko. Harmonic emission of household devices in presence of typical voltage distortions / S. Yanchenko, J. Meyer // Powertech Eindhoven 2015 Conference, June 29 – July 3, Eindhoven, Netherlands, pp.1-6.

## REFERENCES

1. GOST 32144–2013. Sovmestimost' tehnikeskikh sredstv jelektro- magnitnaja. normy kachestva jelektricheskoy jenerгии v sistemah jelektrosnabzhenija obshhego naznachenija. — М.: Standartinform, 2014.

2. GOST 30804.3.2–2006. Sovmestimost' tehnikeskikh sredstv jelektromagnitnaja. Jemissija garmonicheskikh sostavljajushhih toka tehnikeskimi sredstvami s potrebljaemym tokom ne bolee 16 a (v odnoj faze). Normy i metody ispytaniy. — М.: Standartinform, 2014.

3. Garmoniki v jelektricheskikh sistemah / Dzh. Arrillaga [i dr.]. — М.: Jenergoatomizdat, 1990.

4. Zhezhelenko, I.V. Izbrannye voprosy nesinusoidal'nyh rezhimov v jelektricheskikh setjah predpriyatij / I.V. Zhezhelenko. — М.: Jenergoatomizdat, 2007.

5. Zhezhelenko, I.V. Vysshie garmoniki v sistemah jelektrosnabzhenija promyshlennyh predpriyatij / I.V. Zhezhelenko. — М.: Jenergoatomizdat, 1984.

6. Kachestvo jelektrojenerгии v jelektricheskikh setjah i sposoby ego obespechenija V. G. Fedchenko [i dr.]. // Uchebnoe posobie po kursu «Peredacha i raspredelenie jelektricheskoy jenerгии». М.: Izdatel'stvo MJeI, 1992. — 102 s.

7. Austin H. Bonnett. The Impact that Voltage and Frequency Variations have on AC Induction Motor Performance and Life in Accordance with NEMA MG-1 Standards / Austin H. Bonnett, // October. 1998.

8. Rabotosposobnost' i kachestvo funkcionirovanija jelektrotehnikeskikh kompleksov i sistem v rezhimakh nesinusoidal'nosti naprjazhenija: uchebno-metodicheskoe posobie. - М.: Izd-vo MJeI, 2016 g.- 36 str.

9. Guzhov, S.V. Razrabotka metodiki rascheta ustanovivshijsja rezhimov jelektricheskikh setej naruzhnogo osveshhenija s uchetom nelinejnyh karakteristik svetodiodnyh sve-til'nikov: diss. ... kand. tehn. nauk: 05.09.03: zashhishhena 18.06.09 : utv. 09.10.09 / S.V. Guzhov. — М., 2009 — 147 s.

10. Cyruk, S. A. Modelirovanie osnovnyh istochnikov nesinusoidal'nosti v bytovykh jelektrosetjah / Cyruk, S. A.; Janchenko, S. A.; Ryzhkova, E.N. // Vestnik MJeI №3 2013, s.67-71.

11. A. M. Blanco. Schegner Impact of supply voltage distortion on the current harmonic emission of non-linear loads / A. M. Blanco, S. Yanchenko, J. Meyer, P. // Dyna, August 2015, Vol. 82 Issue 192, p. 150.

12. S. Yanchenko. Harmonic emission of household devices in presence of typical voltage distortions / S. Yanchenko, J. Meyer // Powertech Eindhoven 2015 Conference, June 29 – July 3, Eindhoven, Netherlands, pp.1-6.

Поступило в редакцию 25.11.2016

Received 25 November 2016