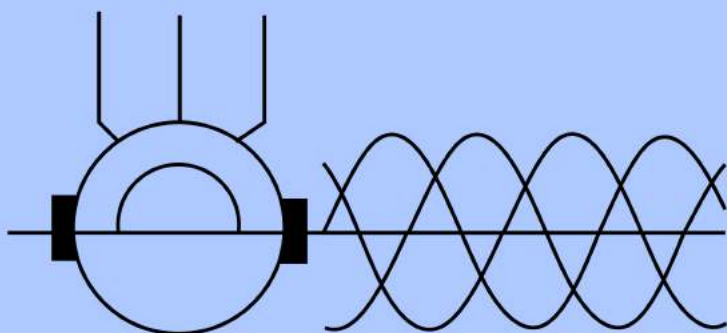
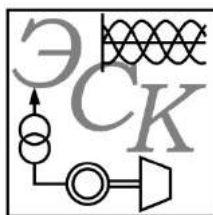


Электротехнические Системы и Комплексы





ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

ИЗДАЕТСЯ С ЯНВАРЯ 1996 Г.

№1(34), МАРТ 2017

Журнал входит в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, а также в базу данных Российского индекса научного цитирования (РИНЦ).

Редакционная коллегия

Председатель редакционной коллегии:

С.И. Лукьянов – проф., д-р техн. наук, МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия.

Главный редактор:

В.Р. Храмин – проф., д-р техн. наук, МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия.

Ответственный редактор:

Е.А. Панова – канд. техн. наук, МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия.

Секция теории и практики автоматизированного электропривода:

А. С. Сарваров – проф., д-р техн. наук, МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия;

А.Е. Козярук – проф., д-р техн. наук, Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, Россия;

О.А. Кравченко – доц., д-р техн. наук, ЮРГПУ (НПИ) им. М.И. Платова, г. Новочеркасск, Россия.

Секция электро- и теплоэнергетики:

А.В. Паздерин – проф., д-р техн. наук, УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия;

Е.Б. Агапитов – проф., д-р техн. наук, МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия;

Н.Ф. Джагаров – проф., д-р техн. наук, Высшее военно-морское училище им. Николы Вапцарова, г. Варны, Болгария.

Секция энерго- и ресурсосбережения:

Р.Г. Мугалимов – доц., д-р техн. наук, МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия;

О.И. Осипов – проф., д-р техн. наук, НИУ «МЭИ», г. Москва, Россия;

В.Н. Мещеряков – проф., д-р техн. наук, ЛГТУ, г. Липецк, Россия.

Секция электроснабжения:

Г.П. Корнилов – проф., д-р техн. наук, МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия;

Ю.П. Журавлев – канд. техн. наук, гл. энергетик ОАО «ММК», г. Магнитогорск, Россия.

Секция промышленной электроники, автоматики и систем управления:

О.С. Логанова – проф., д-р техн. наук, МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия;

С.М. Андреев – доц., канд. техн. наук, МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия;

Е.Н. Ишиметьев – д-р техн. наук, директор по стратегическому развитию ЗАО «КонсОМ СКС», г. Магнитогорск, Россия.

Секция электротехнологий в промышленности:

А.М. Зюзев – доц., д-р техн. наук, УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия;

А.Л. Карякин – с.н.с., д-р техн. наук, УГТУ, г. Екатеринбург, Россия;

И.В. Бочкарев – проф., д-р техн. наук, Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова, г. Бишкек, Кыргызстан.

Секция мониторинга, контроля и диагностики электрооборудования:

А.С. Карандаев – проф., д-р техн. наук, МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия;

И.М. Ячиков – проф., д-р техн. наук, МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия.

Технические редакторы:

Н.В. Кутекина – МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия;

Д.А. Савинов – МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия.

© ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2017

Подписной индекс издания 45083 в объединенном каталоге «Пресса России», том 1.

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-58181 от 29 мая 2014 г.

Адрес редакции:

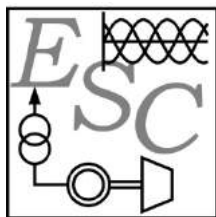
455000, Россия, Челябинская обл., г. Магнитогорск,
пр. Ленина, д. 38. ФГБОУ ВО «МГТУ»
e-mail: ecis.red@gmail.com

Журнал отпечатан на полиграфическом участке
МГТУ им. Г.И. Носова.

455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38.

Выход в свет 27.03.2017. Заказ 114 Тираж 500 экз.

Цена свободная.



ELECTROTECHNICAL SYSTEMS AND COMPLEXES

PUBLISHED SINCE JAN., 1996

NO.1(34) MAR., 2017

The journal is included in the List of peer-reviewed scientific issues publishing main results of Ph.D. thesis in Engineering Science, doctoral thesis, and in the database of Russian Scientific Citation Index (RSCI).

Editorial Board

Head of the Editorial Board:

S.I. Luk'yanov – Professor, D.Sc. (Engineering),
NMSTU, Magnitogorsk, Russia.

Editor in Chief:

V.R. Khrushin – Professor, D.Sc. (Engineering),
NMSTU, Magnitogorsk, Russia.

Executive Editor:

E.A. Panova – Ph.D. (Engineering), NMSTU,
Magnitogorsk, Russia.

Section of Theory and Practice of Automated Electric Drive:

A. S. Sarvarov – Professor, D.Sc. (Engineering),
NMSTU, Magnitogorsk, Russia;

A.E. Kozyaruk – Professor, D.Sc. (Engineering),
St. Petersburg Mining University, St. Petersburg,
Russia;

O.A. Kravchenko – Associate Professor, D.Sc.
(Engineering), SRSPU (NPI), Novocherkassk,
Russia.

Section of Power Engineering:

A.V. Pazderin – Professor, D.Sc. (Engineering),
UrFU named after the first President of Russia
B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia;

E.B. Agapitov – Professor, D.Sc. (Engineering),
NMSTU, Magnitogorsk, Russia;

N.F. Dzhangarov – Professor, D.Sc. (Engineering),
NVNA, Varna, Bulgaria.

Section of Energy- and Resources-Economy:

R.G. Mugalimov – Associate Professor, D.Sc.
(Engineering), NMSTU, Magnitogorsk, Russia;

O.I. Osipov – Professor, D.Sc. (Engineering),
MPEI, Moscow, Russia;

V.N. Meshcheryakov – Professor, D.Sc. (Engi-
neering), LSTU, Lipetsk, Russia.

Section of Electric Power Supply:

G.P. Kornilov – Professor, D.Sc. (Engineering),
NMSTU, Magnitogorsk, Russia;

Yu.P. Zhuravlev – Ph.D. (Engineering), chief
power engineer, MMK OJSC, Magnitogorsk, Rus-
sia.

Section of Power Electronics, Automation and Control Systems:

O.S. Logunova – Professor, D.Sc. (Engineering),
NMSTU, Magnitogorsk, Russia;

S.M. Andreev – Associate Professor, Ph.D. (Engi-
neering), NMSTU, Magnitogorsk, Russia;

E.N. Ishmet'ev – D.Sc. (Engineering), director on
strategic development, KonsOM SKS CJSC ,
Magnitogorsk, Russia.

Section of Industrial Electro Technology:

A.M. Zyuzev – Associate Professor, D.Sc. (Engi-
neering), UrFU named after the first President of
Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia;

A.L. Karyakin – Senior Research Associate, D.Sc.
(Engineering), UFMU, Ekaterinburg, Russia;

I.V. Bochkarev – Professor, D.Sc. (Engineering),
KSTU, Bishkek, Kyrgyzstan.

Section of Monitoring, Diagnostics and Control of Electric Equipment:

A.S. Karandaev – Professor, D.Sc. (Engineering),
NMSTU, Magnitogorsk, Russia;

I.M. Yachikov – Professor, D.Sc. (Engineering),
NMSTU, Magnitogorsk, Russia.

Technical Editors:

N.V. Kutekina – NMSTU, Magnitogorsk, Russia;

D.A. Savinov – NMSTU, Magnitogorsk, Russia.

© FSBEI HE NMSTU, 2017

The subscription index of the journal is 45083 in the «Pressa Rossii» union catalog, vol.1.

The journal is registered by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology, and Mass Media (Roskomnadzor).

Registration certificate PI No. FS77-58181 on May 29, 2014 .

The publisher:

455000, 38, Lenin ave., Magnitogorsk, Chelyabinsk region, Russia
The Publishing House of Nosov Magnitogorsk State Technical
University
e-mail: ecis.red@gmail.com

Printed by the NMSTU printing section,

38, pr. Lenina, city of Magnitogorsk, 455000, Russia.

Publication date: 27.03.2017. Order 114. Circulation: 500.

Open price.

СОДЕРЖАНИЕ

ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА, АВТОМАТИКА И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ..... 4

- Гасияров В.Р., Радионов А.А., Маклаков А.С.* Моделирование трехуровневого преобразователя частоты с фиксированной нейтралью при алгоритме ШИМ с удалением выделенных гармоник..... 4
- Климаш В.С., Лавренов А.С.* Многоуровневое регулирование напряжения трансформаторной подстанции10
- Сакович И.А., Черевко А.И., Платоненков С.В.* Комбинированный способ управления выпрямителем, построенным на базе трансформатора с вращающимся магнитным полем.....17

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ24

- Авербух М.А., Прасол Д.А., Хворостенко С.В.* Экспериментальное исследование несинусоидальных режимов цеховой системы электроснабжения при динамическом вибрационном формировании бетонных смесей.....24
- Паздерин А.А., Паздерин А.В.* Представление процесса передачи электроэнергии направленными потоками электроэнергии и стоимости в схеме сети .31

ЭЛЕКТРО- И ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА.....37

- Дёмин Ю.К., Хасанова Р.В., Нешпоренко Е.Г., Картавец С.В.* Совершенствование схемы промежуточного охлаждения сжимаемого газа в системе снабжения техническими газами металлургического производства.....37
- Коробатов Д.В., Мартыанов А.С., Бодрова Е.С., Четошников С.А.* Исследование аэродинамических характеристик микроветроэнергетической установки44

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ.....49

- Конесев С.Г., Хазиева Р.Т.* Анализ стабилизационных свойств индуктивно-емкостных преобразователей при различных способах подключения гибридных электромагнитных элементов.....49
- Хуснутдинов А.Н., Идиятуллин Р.Г., Аухадеев А.Э., Филина О.А.* Опыт эксплуатации электрощеток с повышенным ресурсом в реальных технологических условиях.....56
- Зюзов А.М., Метельков В.П.* Аналитический метод оценки нагрева обмотки ротора высоковольтных асинхронных двигателей в пусковых режимах.....60

ХРОНИКА68

- Сарваров Анвар Сабулханович (к 65-летию со дня рождения)68
- Зюзов Анатолий Михайлович (к 70-летию со дня рождения)69
- Осипов Олег Иванович (к 75-летию со дня рождения)70

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ.....71

CONTENT

POWER ELECTRONICS, AUTOMATION AND CONTROL SYSTEMS4

- Gasiyarov V.R., Radionov A.A., Maklakov A.S.* Simulation of 3L NPC Converter with selective harmonic elimination PWM4
- Klimash V.S., Lavrenov A.S.* Multi-level Voltage Regulation of Transformer Substation 10
- Sakovich I.A., Cherevko A.I., Platonenkov S.V.* Combined Control Method of the Rectifier Based on a Transformer With Rotating Magnetic Field 17

ELECTRIC POWER SUPPLY.....24

- Averbukh M.A., Prasol D.A., Khvorostenko S.V.* Experimental Study of Non-sinusoidal Operating Mode of Workshop Power Supply System in Dynamic Vibrating Formation of Concrete Mixtures24
- Pazderin A.A., Pazderin A.V.* Representation of the Electric Energy Distribution Process in an Electric Network by Directed Energy and Cost Flows31

Power Engineering.....37

- Demin Yu.K., Khasanova R.V., Neshporenko E.G., Kartavtsev S.V.* Improvement of Intermediate Cooling Scheme of Compressed Gas in Industrial Gas Supply System at a Metallurgical Enterprise.....37
- Korobatov D.V., Mart'yanov A.S., Bodrova E.S., Chetoshnikov S.A.* Aerodynamic Study of Micro Wind Turbines..... 44

Industrial Electro Technology.....49

- Konesev S.G., Khazieva R.T.* Stabilization Properties of Inductive-Capacitive Converters with Different Connection Methods of Hybrid Electromagnetic Elements49
- Khusnutdinov A.N., Idiyatullin R.G., Aukhadееv A.E., Filina O.A.* Operating Experience of Collector Brushes with Improved Service Life in Real-life Operating Conditions56
- Zyuzev A.M., Metel'kov V.P.* Analytical Method for Evaluation of High-Voltage Induction Motor Rotor Winding Heating at Start-Up Mode.....60

CHRONICLES.....68

- Sarvarov Anvar Sabulkhanovich (to the 65-th Anniversary)68
- Zyuzev Anatoliy Mikhaylovich (to the 70- th Anniversary)69
- Osipov Oleg Ivanovich (to the 75- th Anniversary) ...70

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS 71

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРЕХУРОВНЕВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ С ФИКСИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ ПРИ АЛГОРИТМЕ ШИМ С УДАЛЕНИЕМ ВЫДЕЛЕННЫХ ГАРМОНИК

Статья посвящена вопросам моделирования трехуровневого преобразователя частоты с фиксированной нейтралью при алгоритме широтно-импульсной модуляции с удалением выделенных гармоник. Основное внимание уделено расчету углов переключений посредством численного метода Ньютона-Рафсона для алгоритма широтно-импульсной модуляции с удалением выделенных гармоник, основанного на четвертьволновой симметрии с сохранением постоянства заданного уровня первой гармоники. Получены решения нелинейных уравнений для двух вариантов удаления гармоник: 17 и 19; 17, 19, 35 и 37. Разработанные модели рассматриваемых алгоритмов модуляции позволяют проводить исследования показателей электромагнитной совместимости трехуровневых преобразователей частоты с фиксированной нейтралью на базе различных многопульсных схем соединения с питающей сетью. Полученные спектры напряжений при двух вариантах удаления гармоник удовлетворяют требованиям международного стандарта качества электроэнергии IEC 61000-2-12. На основе анализа результатов моделирования кривых линейных напряжений и фазных токов сети в условиях главного привода прокатной клетки при 18-пульсной схеме подключения показана хорошая работоспособность алгоритма широтно-импульсной модуляции с удалением выделенных гармоник.

Ключевые слова: силовая электроника, трехуровневый преобразователь частоты, широтно-импульсная модуляция, удаление выделенных гармоник.

ВВЕДЕНИЕ

В течение последних нескольких десятилетий алгоритмы модуляции находятся в центре внимания научных исследователей, так они напрямую влияют на эффективность силовых полупроводниковых преобразователей [1–6]. Главной задачей любого алгоритма модуляции является получение наилучших форм сигналов (напряжений и токов) преобразователя с оптимальными характеристиками в условиях соблюдения требований нагрузки. Второстепенными задачами являются минимизация влияния высших гармоник, снижение пульсации и разбаланса напряжения в звене постоянного тока, уменьшение уровня синфазного напряжения и скорости нарастания напряжения (du/dt). Получение требуемых характеристик работы преобразователя с помощью экспериментальных исследований – это сложный и дорогостоящий способ, поэтому актуальным становится математическое и имитационное моделирование [7–12].

Из всего разнообразия рассматриваемых топологий преобразователей трехуровневые преобразователи частоты с фиксированной нейтралью (ЗУ-ПЧ с ФН) являются наиболее промышленно применимыми. В отечественной литературе недостаточно полно рассмотрены вопросы моделирования и исследования данных преобразователей при ШИМ с удалением выделенных гармоник.

ПРИНЦИП РАБОТЫ ТРЕХУРОВНЕВОЙ МОСТОВОЙ СХЕМЫ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ С ФИКСИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ

В основе топологии ЗУ ПЧ с ФН лежит трехфазная мостовая схема, выполненная из 12 полностью управляемых полупроводниковых ключей VT_1 – VT_{12} , 12 обратных диодов VD_1 – VD_{12} , 6 фиксированных диодов

VD_{1c} – VD_{6c} и двух эквивалентных емкостей C_{dc1} и C_{dc2} , образующих нулевой потенциал преобразователя (рис. 1) [13–17].

В каждой фазной стойке моста преобразователя находится по 4 обратных диода и силовых ключа и 2 фиксированных диода. Сумма напряжений u_{dc1} и u_{dc2} на емкостях C_{dc1} и C_{dc2} определяет уровень напряжения в звене постоянного тока u_{dc} . Из 4 ключей в каждой стойке моста одновременно могут быть включены только 2, подключающие потенциалы u_{dc} к фазе нагрузки в трех точках «+», «0» и «-».

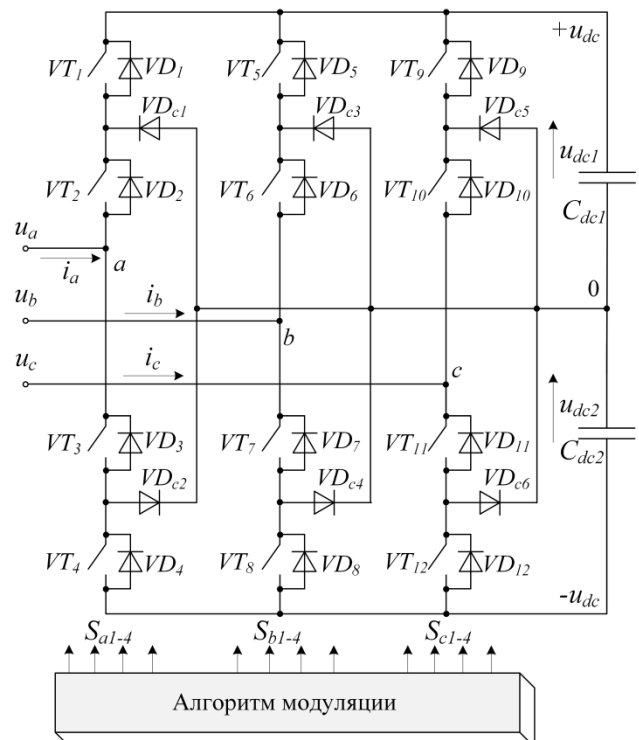


Рис. 1. ЗУ мостовая схема преобразователя с ФН

Различные комбинации подключения S_{abc1-4} моста формируют три состояния фазных напряжений u_a , u_b и u_c преобразователя: [P] – подключение к положительному полюсу «+», [O] – подключение к нейтральному полюсу «0» и [N] – подключение к отрицательному полюсу «-» [18–20]. Все состояния и уровни выходного фазного напряжения относительно нейтральной точки преобразователя представлены в **таблице**.

ПРИНЦИП РАБОТЫ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ
АЛГОРИТМА ШИМ
С УДАЛЕНИЕМ ВЫДЕЛЕННЫХ ГАРМОНИК

ШИМ с удалением выделенных гармоник является алгоритмом модуляции, который позволяет подавлять выбранные высшие гармоники в кривой выходного напряжения преобразователя. Количество удаляемых гармоник зависит от частоты переключения полупроводниковых модулей. При стандартной реализации данного алгоритма модуляции сигнал выходного фазного напряжения 3У мостового преобразователя с ФН будет симметричным относительно четверти периода. В силу симметрии относительно начала координат четные гармоники равны нулю, а высшие нечетные гармоники будут либо в фазе, либо в противофазе основной гармонике, как показано на **рис. 2**, где α_N – количество углов переключений за четверть периода выходного фазного напряжения преобразователя. Помимо возможности удаления выделенных гармоник, данный алгоритм модуляции позволяет обеспечить уровень первой гармоники выходного фазного напряжения преобразователя на уровне, задаваемом коэффициентом модуляции [21].

$$U_m(m) = (2/\pi) \cdot u_{dc} \cdot m, \quad (1)$$

где m – коэффициент модуляции; U_m – амплитуда гладкой составляющей первой гармоники выходного фазного напряжения; u_{dc} – напряжение звена постоянного тока.

**Возможные состояния и уровни
выходного фазного напряжения 3У мостовой схемы с ФН**

Стойка фазы A			
S_{a1}	on	off	off
S_{a2}	on	on	off
S_{a3}	off	on	on
S_{a4}	off	off	on
u_a	$+u_{dc}/2$	0	$-u_{dc}/2$
	[P]	[O]	[N]
Стойка фазы B			
S_{b1}	on	off	off
S_{b2}	on	on	off
S_{b3}	off	on	on
S_{b4}	off	off	on
u_b	$+u_{dc}/2$	0	$-u_{dc}/2$
	[P]	[O]	[N]
Стойка фазы C			
S_{c1}	on	off	off
S_{c2}	on	on	off
S_{c3}	off	on	on
S_{c4}	off	off	on
u_c	$+u_{dc}/2$	0	$-u_{dc}/2$
	[P]	[O]	[N]

Последнее становится возможным, если выполняется равенство

$$k = N - 1,$$

где N – количество переключений полупроводниковых модулей за четверть периода выходного фазного напряжения; k – количество удаляемых гармоник.

Для **рис. 2** разложение в ряд Фурье фазного напряжения выглядит как

$$u = \sum_{n=1}^{\infty} (U_m \cdot \sin(n \cdot \omega \cdot t)), \quad (2)$$

где U_m определяется на основе выражения

$$U_m = \frac{4}{\pi} \int_0^{\pi/2} u(\omega t) \cdot \sin(n \cdot \omega t) d(\omega t) = \frac{4}{\pi \cdot n} \cdot \frac{u_{dc}}{2} \cdot \sum_{k=1}^N (-1)^k \cdot \cos(n \cdot \alpha_k), \quad (3)$$

где α_k – угол переключения при удалении k -й гармоники.

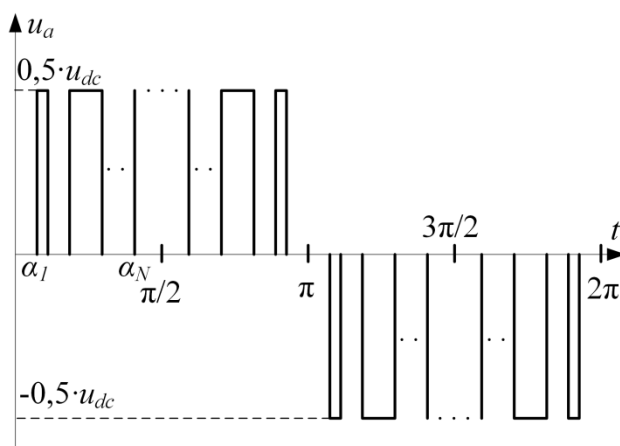
Если подставить (3) в (2), то получим выражения для фазного напряжения 3У ПЧ с ФН в виде

$$u = \sum_{n=1,3,\dots,\infty} \frac{2 \cdot u_{dc}}{\pi \cdot n} \cdot \left[\sum_{i=1}^N (-1)^{i+1} \cdot \cos(n \cdot \alpha_i) \right] \times \sin(\omega t \cdot n). \quad (4)$$

Анализ выражения (4) позволяет определить связь между углами переключений и спектральным составом выходного напряжения посредством системы нелинейных уравнений

$$\begin{cases} \sum_{k=1}^N (-1)^k \cdot \cos(\alpha_k) = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{2}{u_{dc}} \cdot U_m \\ \sum_{k=1}^N (-1)^k \cdot \cos(n \cdot \alpha_k) = 0, n = 5, 7, 11, \dots \end{cases} \quad (5)$$

При условии постоянства напряжения звена постоянного тока, введем в систему (5) коэффициент модуляции



**Рис. 2. Типовое выходное напряжение
3У преобразователя при ШИМ с удалением
выделенных гармоник**

$$m = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{2}{u_{dc}} \cdot U_m, \text{ при } m \in [0; 1],$$

после чего получим

$$\begin{cases} \sum_{k=1}^N (-1)^k \cdot \cos(\alpha_k) = m; \\ \sum_{k=1}^N (-1)^k \cdot \cos(n \cdot \alpha_k) = 0, n = 5, 7, 11, \dots \end{cases} \quad (6)$$

Нелинейная система (6) имеет несколько решений, зависящих от начальных приближений. Для отыскания всех возможных решений используется метод перебора начальных приближений. Среди полученных результатов выделяют варианты, удовлетворяющие условию

$$0 < \alpha_1 < \alpha_2 < \alpha_3 < \dots < \alpha_N < \pi/2. \quad (7)$$

Нелинейная система уравнений (6) решена с помощью численного алгоритма Ньютона–Рафсона [6] для:

- удаления 17 и 19 гармоник (**рис. 3**);
- удаления 17, 19, 35 и 37 гармоник (**рис. 4**).

ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ И РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

В качестве объекта исследований была принята схема подключения ЗУ ПЧ с ФН к питающей сети главного электропривода прокатной клетки толстолистного стана

5000 ЛПЦ №9 ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (**рис. 5**). Исследование влияния на сеть работы привода при алгоритме ШИМ с удалением выделенных гармоник проводилось на математической модели, разработанной авторами в программе Matlab/Simulink. Эта логико-математическая модель позволяет в полном объеме проводить исследования статических и динамических характеристик ЗУ ПЧ с ФН и показателей электромагнитной совместимости [22, 23]. Результаты моделирования кривых переходных процессов токов и напряжений при ШИМ с удалением 17 и 19 гармоник представлены на **рис. 6** и 17, 19, 35 и 37 гармоник – на **рис. 7**.

Гармонический анализ **рис. 6** показал, что при удалении 17 и 19 гармоник в видимом спектре тока сети наибольший уровень по отношению к основной гармонике показывают только 35 и 37. В свою очередь, тот же анализ для **рис. 7** при удалении 17, 19, 35 и 37 гармоник показал абсолютно чистый видимый спектр. Полученные спектры напряжений при двух вариантах удаления гармоник удовлетворяют требованиям международного стандарта качества электроэнергии ИЕС 61000-2-12. Это доказывает достаточно хорошую работоспособность алгоритма ШИМ с удалением выделенных гармоник в составе многопульсных схем подключения ЗУ ПЧ с ФН к питающей сети.

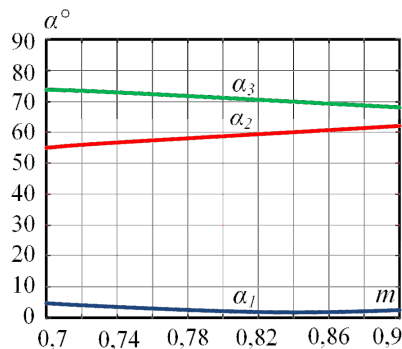


Рис. 3. Зависимости углов переключений от коэффициента модуляции для удаления 17 и 19 гармоник

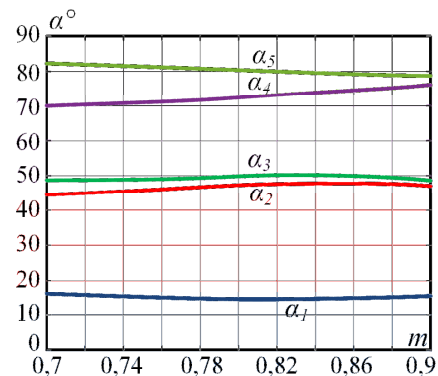


Рис. 4. Зависимости углов переключений от коэффициента модуляции для удаления 17, 19, 35 и 37 гармоник

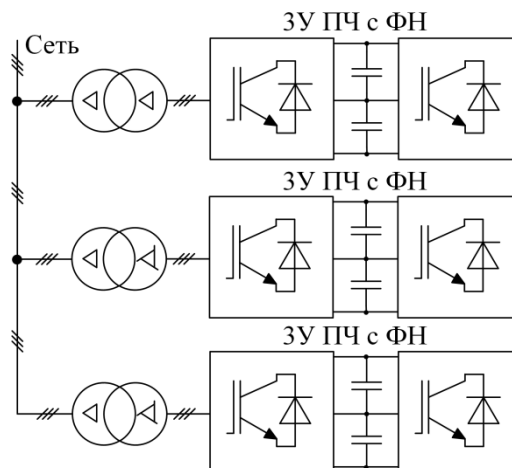


Рис. 5. Имитационная модель исследуемого объекта

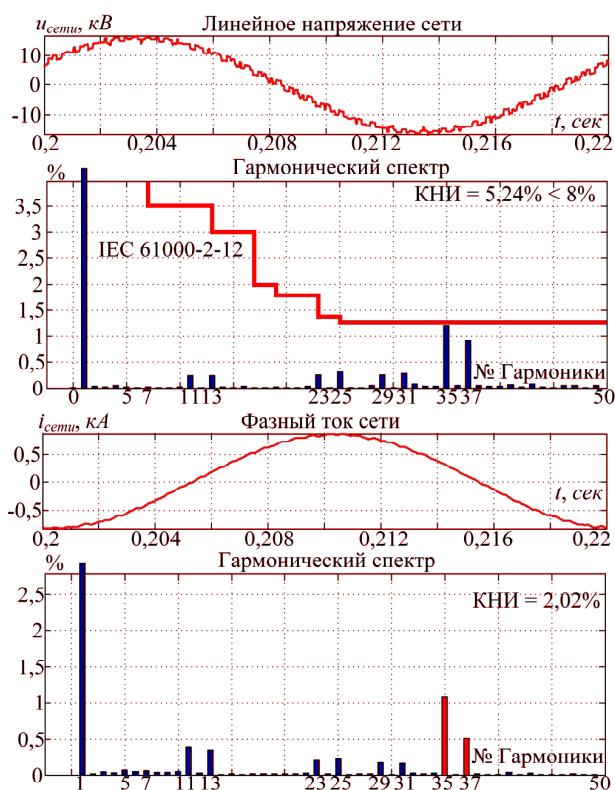


Рис. 6. Формы и спектры сетевого тока и напряжения при удалении 17 и 19 гармоник

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе полученных результатов можно сделать вывод, что разработанная математическая модель позволяет проводить исследования электромагнитной совместимости ЗУ ПЧ с ФН при алгоритме ШИМ с удалением выделенных гармоник на базе многопульсных схем соединения с питающей сетью. Модель может быть использована при исследовании влияния на внутризаводские сети электроснабжения активных выпрямителей напряжения в составе различных технологических объектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Abu-Rub H., Bayhan S., Malinowski M., Moinoddin S., Guzinski J. Medium-voltage drives: Challenges and the existing technology. *IEEE Power Electronics Magazine*. 2016. Vol. 3(2). P. 29–41.
2. Kouro S., Rodriguez J., Wu B., Bernet S., Perez M. Powering the future of industry: High-power adjustable speed drive topologies. *IEEE Power Electronics Magazine*. 2012. Vol. 18(4). P. 26–39.
3. Храмин Т.Р., Крубцов Д.С., Корнилов Г.П. Оценка методов широтно-импульсной модуляции напряжения активных выпрямителей прокатных станов // *Машиностроение: сетевой электронный научный журнал*. 2013. №2. С. 48–52.
4. Пьей Пью Тун. Совершенствование импульсных преобразователей в составе автономных систем электропитания электротехнических комплексов: дис. ... кан. техн. наук / Пьей Пью Тун. Санкт-Петербург, 2014. 188 с.
5. Радионов А.А., Маклаков А.С. Трехуровневый активный двунаправленный преобразователь частоты в составе реверсивных электроприводов среднего напряжения: современное состояние и способы управления // *Известия высших учебных заведений. Электромеханика*. 2015. №6(542). С. 80–87.
6. Leon J.I., Kouro S., Franquelo L.G., Rodriguez J., Wu B. The

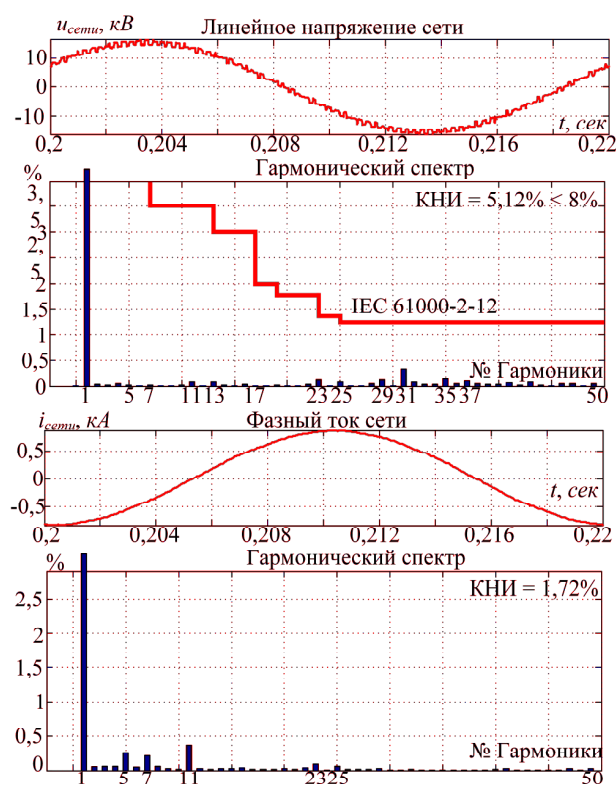


Рис. 7. Формы и спектры сетевого тока и напряжения при удалении 17, 19, 35 и 37 гармоник

essential role and the continuous evolution of modulation techniques for voltage-source inverters in the past, present, and future power electronics. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2016. Vol. 63, no. 5. P. 2688–2701.

7. Wu Bin High-power converters and AC drives. Wiley-IEEE Press, 2006. 333 p.
8. Брованов С.В. Многоуровневые полупроводниковые преобразователи частоты с емкостным делителем напряжения для автономных систем генерирования электрической энергии: дис. ... д-ра техн. наук / С.В. Брованов. Новосибирск, 2012. 452 с.
9. Храмин Т.Р., Крубцов Д.С., Корнилов Г.П. Оценка Математическая модель силовой схемы главных электроприводов прокатных станов // *Электротехника: сетевой электронный научный журнал*. 2014. Вып. 1., №1. С. 3–7.
10. Пронин М.В., Воронцов А.Г. Силовые полностью управляемые полупроводниковые преобразователи. СПб.: Электросила, 2003. 172 с.
11. Шрейнер Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты. Екатеринбург: УРО РАН, 2000. 654 с.
12. Ефимов А.А. Активные преобразователи в регулируемых электроприводах переменного тока: Теория, математическое моделирование, управление: дис. ... д-ра техн. наук / А.А. Ефимов. Новоуральск, 2002. 426 с.
13. Радионов А.А., Маклаков А.С., Чернышев А.Д. Использование мощных электроприводов на базе активных двунаправленных преобразователей в составе промышленной Smart Grid системы // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика»*. 2015. Т. 15, № 1. С. 74–81.
14. Храмин Т.Р., Крубцов Д.С., Корнилов Г.П. Методы широтно-импульсной модуляции мощных активных выпрямителей при несимметрии напряжения // *Машиностроение: сетевой электронный научный журнал*. 2014. № 4. С. 7–13.
15. Храмин Т.Р., Крубцов Д.С., Корнилов Г.П. Математическая модель активного выпрямителя в несимметричных

- режимах работы // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. 2014. Т.1, № 2. С. 3–9.
16. Храмшин Т.Р., Абдулвелеев И.Р., Корнилов Г.П. Математическая модель силовой схемы мощного СТАТКОМа // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. 2015. Т.2., № 1. С. 38–46.
 17. Маклаков А.С., Радионов А.А. Энергоэффективное управление двунаправленным преобразователем частоты в составе электропривода ветрогенератора // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. 2015. Т.2., № 4. С. 21–26.
 18. Маклаков А.С., Радионов А.А. Исследование векторной ШИМ с различными таблицами переключения силовых ключей трехуровневого преобразователя // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. 2015. Т.2., № 1. С. 30–37.
 19. Маклаков А.С., Гасияров В.Р., Белый А.В. Энергосберегающий электропривод на базе двухзвенного преобразователя частоты с активным выпрямителем и автономным инвертором напряжения // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. 2014. Т.1., № 1. С. 23–30.
 20. Радионов А.А., Маклаков А.С. О возможности компенсации реактивной мощности в сети посредством электропривода на базе АС-DC-АС преобразователя // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2014. №2. С. 78–83.
 21. Маклаков А.С., Радионов А.А. Влияние на сеть трёхфазного мостового двухуровневого активного выпрямителя напряжения при различных видах ШИМ // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2013. № 2. С. 40–47.
 22. Маклаков А.С., Маклакова Е.А. Анализ электромагнитной совместимости 18-пульсной схемы соединения трехуровневых АВН при использовании метода ШИМ с удалением выделенных гармоник // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2016. Т.4, №1. С. 66–73.
 23. Маклаков А.С. Имитационное моделирование главного электропривода прокатной клетки толстолистного стана 5000 // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2014. № 3. С. 16–25.

Поступила в редакцию 09 января 2017 г.

INFORMATION IN ENGLISH

SIMULATION OF 3L NPC CONVERTER WITH SELECTIVE HARMONIC ELIMINATION PWM

Vadim R. Gasiyarov

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Head of Department «Mechatronics and Automation», South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia.

Andrey A. Radionov

Dr.Sc. (Engineering), Professor, Vice rector, South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia.

Alexander S. Maklakov

Ph.D. student, «Mechatronics and Automation» department, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.

This article is devoted to the simulation of a three-level neutral point clamped converter with a selective harmonic elimination pulse-width modulation technique. The main attention was focused on calculation of switching angles using of the Newton-Raphson algorithm for the selective harmonic elimination pulse-width modulation. Solutions of nonlinear equations were obtained for two elimination harmonic cases: 17 and 19; 17, 19, 35 and 37. As an example, the simulation results of phase current and voltage curves and total harmonic distortion at the point of connection to the grid of three three-level neutral point clamped converters with 18-pulse connection circuit are shown. The model allows us to research the electromagnetic compatibility of the three-level neutral point clamped converters with the selective harmonic elimination pulse-width modulation technique based on different multipulse connection circuits to the grid.

Keywords: Power electronics, neutral point clamped, three-level converter, pulse-width modulation, selective harmonic elimination.

REFERENCES

1. Abu-Rub H., Bayhan S., Malinowski M., Moinoddin S., Guzinski J. Medium-voltage drives: Challenges and the existing technology. IEEE Power Electronics Magazine. 2016. Vol. 3(2). P. 29–41.
2. Kouro S., Rodriguez J., Wu B., Bernet S., Perez M. Powering the future of industry: High-power adjustable speed drive topologies. IEEE Power Electronics Magazine. 2012. Vol. 18(4). P. 26–39.
3. Khamshin T.R., Krutsov D.S., Kornilov G.P. Evaluation of Methods PWM Voltage Active Rectifiers Rolling Mills. *Mashinostroenie: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal* [Russian Internet Journal of Industrial Engineering], 2013, no.2, pp. 48–52. (in Russian)
4. P'ey P'o Tun. *Sovershenstvovanie impulsnykh preobrazovateley v sostave avtonomnykh sistem elektropitaniya elektrotehnicheskikh kompleksov*. Kand. Tekhn. Nauk Dis. [Improving of switching converters in autonomous power electrical systems. Ph.D. Diss.]. St. Petersburg, 2014. 188 p.
5. Radionov A.A., Maklakov A.S. Three Level Back to Back Converters as Part of Medium Voltage AC Drives: Contemporary Condition and Control Methods. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika* [Russian Electromechanics], 2015, no.6, pp. 80–87. (in Russian)
6. Leon J.I., Kouro S., Franquelo L.G., Rodriguez J., Wu B. The essential role and the continuous evolution of modulation techniques for voltage-source inverters in the past, present, and future power electronics. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2016. Vol. 63, no. 5. P. 2688–2701.
7. Wu Bin High-power converters and AC drives. Wiley-IEEE Press, 2006. 333 p.
8. Brovanov S.V. *Mnogourovnevye poluprovodnikovye preobrazovateli chastoty s emkostnym delitelem*

- napryazheniya dlya avtonomnykh sistem generirovaniya elektricheskoy energii*. Dokt. Diss. [Multilevel converters with a direct voltage for autonomous electric power generation systems. Dokt. Diss.]. Novosibirsk, 2012, 452 p.
9. Khramshin T.R., Krubtsov D.S., Kornilov G.P. A Mathematical Model of the Power Circuit of Main Electric Drives of Rolling Mills. *Elektrotehnika: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal* [Russian Internet Journal of Electrical Engineering], 2014, vol. 1, no.1, pp. 3–7. (in Russian)
 10. Pronin M.V., Vorontsov A.G. *Silovye polnostyu upravlyаемые полупроводниковые преобразователи* [Power converters]. St. Petersburg, Elektrosila Publ., 2003. 172 p.
 11. Shreyner R.T. *Matematicheskoe modelirovanie elektroprivodov peremennogo toka s poluprovodnikovymi preobrazovatelyami chastoty* [Mathematical modeling of AC drives based on semiconductor frequency converters]. Yekaterinburg, URO RAN, 2000. 654 p.
 12. Efimov A.A. *Aktivnye preobrazovateli v reguliruemyykh elektroprivodakh peremennogo toka: Teoriya, matematicheskoe modelirovanie, upravlenie*. Dokt. Diss. [PWM converters for AC motor drives: The theory, mathematical modeling, control. Dokt. Diss.]. Novouralsk, 2002. 426 p.
 13. Radionov A.A., Maklakov A.S., Chernyshev A.D. Powerful Electric Drives Based on Active Bidirectional Converters within Industrial Smart Grid. *Vestnik YuUrGU. Seriya «Energetika»* [Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering], 2015, vol. 15, no. 1, pp. 74–81. (in Russian)
 14. Khramshin T.R., Krubtsov D.S., Kornilov G.P. Methods PWM of Large Power Active Rectifier under Unbalanced Voltage Operating Conditions. *Mashinostroenie: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal* [Russian Internet Journal of Industrial Engineering], 2014, vol. 2, no.4, pp. 7–13. (in Russian)
 15. Khramshin T.R., Krubtsov D.S., Kornilov G.P. Mathematical Model of the Active Rectifier under Unbalanced Voltage Operating Conditions. *Elektrotehnika: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal* [Russian Internet Journal of Electrical Engineering], 2014, vol. 1, no.2, pp. 3–9. (in Russian)
 16. Khramshin T.R., Abdulvelev I.R., Kornilov G.P. Mathematical Model of the Power Circuit of STATCOM of Large Capacity. *Elektrotehnika: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal* [Russian Internet Journal of Electrical Engineering], 2015, vol. 2, no.1, pp. 18–46. (in Russian)
 17. Maklakov A.S., Radionov A.A. Energy-efficient Control of Active Converters in Wind Generator Electric Drive Systems. *Elektrotehnika: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal* [Russian Internet Journal of Electrical Engineering], 2015, vol. 2, no.4, pp. 21–26. (in Russian)
 18. Maklakov A.S., Radionov A.A. Study of SVPWM with Various Vector Selection Tables of Three Level Converter. *Elektrotehnika: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal* [Russian Internet Journal of Electrical Engineering], 2015, vol. 2, no.1, pp. 30–37. (in Russian)
 19. Maklakov A.S., Gasiyarov V.R., Belyi A.V. Energy-Saving Electric Drive on the basis of Back to Back Converter. *Elektrotehnika: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal* [Russian Internet Journal of Electrical Engineering], 2014, no.1, pp. 23–30. (in Russian)
 20. Radionov A.A., Maklakov A.S. Possibility of reactive power compensation in the grid by the electric drive based on AC-DC-AC converter. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika* [Russian Electromechanics], 2014, no. 2, pp. 78–83. (in Russian)
 21. Maklakov A.S., Radionov A.A. Influence of AFE Rectifier with Different Types of PWM on Supply Power. *Russian Mashinostroenie: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal* [Russian Internet Journal of Industrial Engineering], 2013, no.2, pp. 40–47. (in Russian)
 22. Maklakov A.S., Maklakova E.A. EMC Analysis of 18-pulse Connection Circuit based on 3L-AFE with SHEPWM. *Mashinostroenie: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal* [Russian Internet Journal of Industrial Engineering], 2016, vol. 4, no.1, pp. 66–73. (in Russian)
 23. Maklakov A.S. Simulation of the Main Electric Drive of the Plate Mill Rolling Stand. *Mashinostroenie: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal* [Russian Internet Journal of Industrial Engineering], 2014, no. 3, pp. 16–25. (in Russian)

Гасияров В.Р., Радионов А.А., Маклаков А.С. Моделирование трехуровневого преобразователя частоты с фиксированной нейтралью при алгоритме ШИМ с удалением выделенных гармоник // Электротехнические системы и комплексы. 2017. № 1 (34). С. 4 - 9. doi: 10.18503/2311-8318-2017-1(34)-4-9

Gasiyarov V.R., Radionov A.A., Maklakov A.S. Simulation of 3L NPC Converter with selective harmonic elimination PWM. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2017, no. 1 (34), pp. 4 - 9. (In Russian) doi: 10.18503/2311-8318-2017-1(34)-4-9

Климаш В. С., Лавренов А. С.

ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет»

МНОГОУРОВНЕВОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРНОЙ ПОДСТАНЦИИ

Приведен принцип каскадного построения многоуровневых регулирующих устройств на входе высоковольтных трансформаторных подстанций для поддержания напряжения у потребителей на заданном уровне. Аналитическими соотношениями выявлен алгоритм управления, на основе которого в среде MatLab апробировано функционирование системы управления и всего устройства в целом.

Ключевые слова: специальный алгоритм и сигнал управления, система управления, многоуровневое напряжение, импульсно-фазовое регулирование и широтно-импульсная модуляция, вольтодобавочный каскад, трансформаторная подстанция.

ВВЕДЕНИЕ

Каскадное построение вольтодобавочных устройств [2] позволяет регулировать напряжение на входе трансформаторной подстанции (ТП) от 6 кВ и выше на основе IGBT модулей. Преимуществами таких регулирующих устройств являются: высокие энергетические показатели, линейность регулировочной характеристики и жесткость внешней характеристики, высокая частота модуляции при относительно низкой частоте переключения транзисторов. Регулирование производится практически без искажений входного тока, а несинусоидальность выходного напряжения значительно ниже величин установленного ГОСТ и составляет не более 3 %.

ФОРМИРОВАНИЕ ПЕРЕМЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ
ТРАНСФОРМАТОРНОЙ ПОДСТАНЦИИ

Схема содержит силовой трансформатор (СТ), нагрузку (Н), блоки вольтодобавочных трансформаторов (ВДТ) с блоками инверторов напряжения (БИН), питаемых от источника постоянного напряжения (ИПН), формируют вольтодобавочные устройства, совокупность которых образует вольтодобавочный каскад (ВДК). Каскад включен последовательно между сетью и СТ. Для инвертора напряжения (ИН) предложен специальный способ и алгоритм управления. В состав системы управления (СУ) входит формирователь сигнала управления (ФСУ) с углом α для каждого ИН, синхронизированный от трехфазного трансформатора (ТС) канал регулирования напряжения (КРН) с углом β в цепи обратной связи от датчика отклонения напряжения (ДОН). Схема трансформаторной подстанции с вольтодобавочным каскадом для бесконтактной стабилизации напряжения приведена на **рис. 1**.

В основе формирования переменного напряжения ТП лежит суммирование напряжения сети и напряжения ВДК. Формирование добавочного напряжения основано на 150-градусном управлении ИН [4], совместном согласованном управлении каскадом и межфазном взаимодействии напряжений в цепи первичной обмотки силового трансформатора с изолированной нейтралью.

Принцип регулирования напряжения ВДК без сдвига первой гармонической составляющей относительно напряжения сети иллюстрирует векторная диаграмма, приведенная на **рис. 2**.

Вектора напряжений $\vec{U}_{ВД1}$, $\vec{U}_{ВД2}$ при $\beta = 0$

$$\vec{U}_{ВД1} = U_d \cdot K_{\text{и}} \cdot e^{i\alpha}, \vec{U}_{ВД2} = U_d \cdot K_{\text{и}} \cdot e^{-i\alpha}, \quad (1)$$

где U_d – напряжение питания инверторов; $K_{\text{и}} = 0,9$ – коэффициент передачи напряжения мостовым однофазным инвертором; α и $-\alpha$ – аргументы векторов $\vec{U}_{ВД1}$ и $\vec{U}_{ВД2}$ соответственно.

Напряжение ВДК на основании (1):

$$\vec{U}_{ВДК} = \vec{U}_{ВД1} + \vec{U}_{ВД2} = U_d \cdot K_{\text{и}} \cdot e^{i\alpha} + U_d \cdot K_{\text{и}} \cdot e^{-i\alpha}$$

или

$$\vec{U}_{ВДК} = U_d \cdot K_{\text{и}} \cdot (e^{i\alpha} + e^{-i\alpha}). \quad (2)$$

С учётом преобразования Эйлера $e^{i\alpha} + e^{-i\alpha} = 2 \cdot \cos \alpha$ выражение (2) преобразуется к виду

$$\vec{U}_{ВДК} = U_{ВДК} = U_d \cdot K_{\text{и}} \cdot 2 \cdot \cos \alpha. \quad (3)$$

Вольтодобавочные трансформаторы, исполняя роль силовых сумматоров, прибавляют напряжение каскада к напряжению сети и формируют напряжение питания ТП: $U_1 = U_C + U_{ВДК}$, где U_1 – напряжение на первичной обмотке СТ.

С учётом (3) и коэффициента трансформации ВДК $K_{КТ}$ получим

$$U_1 = U_C + 2 \cdot K_{КТ} \cdot K_d \cdot K_{\text{и}} \cdot 2 \cdot \cos \alpha. \quad (4)$$

Здесь $K_{КТ} = 2 \cdot K_{ВТ} = 2 \cdot U_{1ВТ} / U_{2ВТ}$, где $U_{1ВТ}$, $U_{2ВТ}$ – напряжение на первичной и вторичной обмотке ВДТ соответственно.

При $\beta = \alpha/2$ вектора напряжений вольтодобавки имеют вид:

$$\vec{U}_{ВД1} = 2 \cdot U_d \cdot K_{\text{и}} \cdot \cos \alpha \cdot e^{i\beta}, \vec{U}_{ВД2} = 2 \cdot U_d \cdot K_{\text{и}} \cdot \cos \alpha \cdot e^{-i\beta}. \quad (5)$$

Напряжение вольтодобавки с учётом $K_{КТ}$

$$\vec{U}_{ВДК} = \vec{U}_{ВД1} + \vec{U}_{ВД2} = 2 \cdot U_d \cdot K_{\text{и}} \cdot K_{КТ} \cdot \cos \alpha \cdot (e^{i\beta} + e^{-i\beta})$$

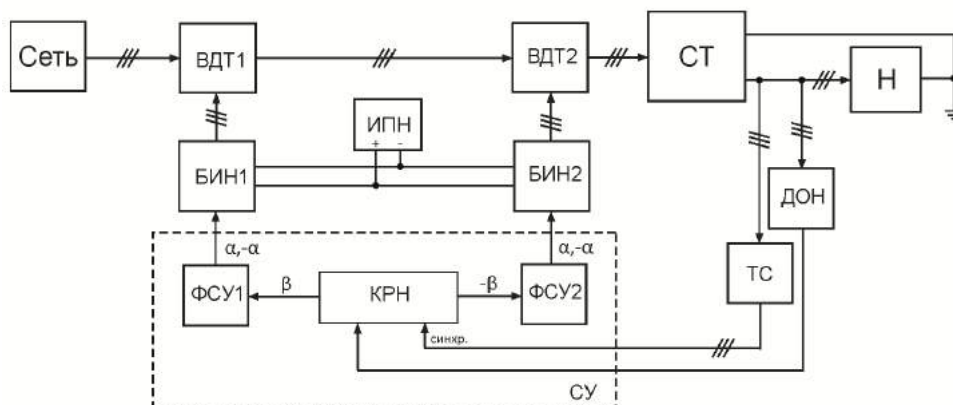


Рис. 1. Структурная схема ВДК-ТП

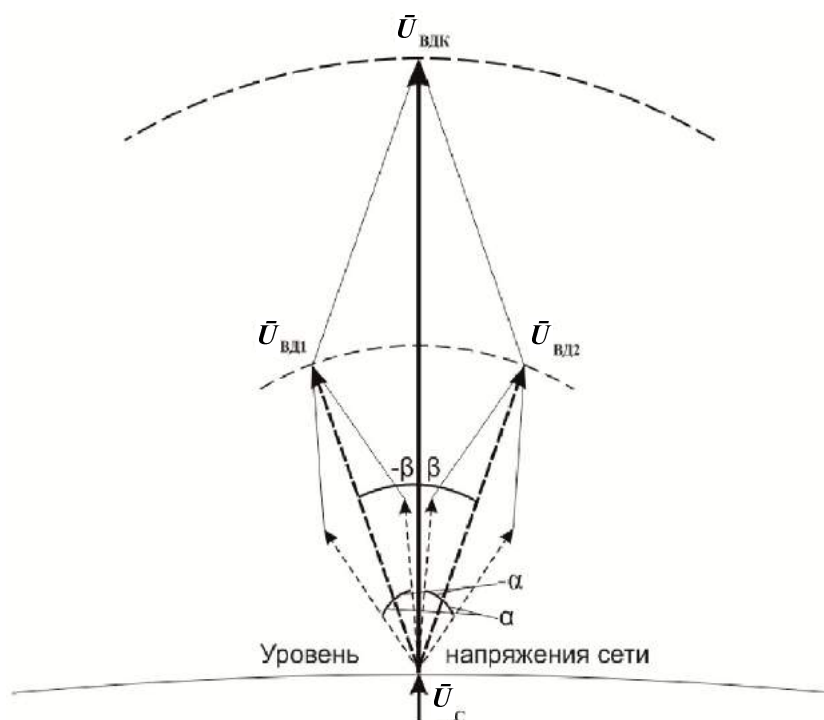


Рис. 2. Векторная диаграмма напряжений ВДК:

$\vec{U}_{ВД1}$, $\vec{U}_{ВД2}$ - векторы напряжений первого и второго устройств вольтодобавки; $\vec{U}_{ВДК}$ - вектор напряжения каскада; β - угол регулирования напряжения между двумя вольтодобавочными устройствами каскада; α - угол управления для 150-градусного алгоритма управления ИН; $\vec{U}_с$ - верхняя часть вектора напряжения сети

при совпадении по фазе $U_{ВДК}$ и $U_с$

$$U_{ВДК} = U_d \cdot K_{и} \cdot K_{КТ} \cdot 2 \cos \alpha \cdot 2 \cos \beta$$

или

$$U_{ВДК} = 4 \cdot U_d \cdot K_{и} \cdot K_{КТ} \cdot \cos \alpha \cdot \cos \beta. \quad (6)$$

На основании выражений (5) и (6) напряжение на выходе СТ

$$U_2 = \frac{U_с + 4 \cdot U_d \cdot K_{и} \cdot K_{КТ} \cdot \cos \alpha \cdot \cos \beta}{K_{СТ}},$$

где $K_{СТ}$ - коэффициент трансформации СТ.

Блочно-модульное построение ВДК с СУ

Математические модели ВДК и СУ в составе ТП, реализованные в среде MatLab/Simulink, представлены на рис. 3. ВДК содержит 6 однофазных мостовых

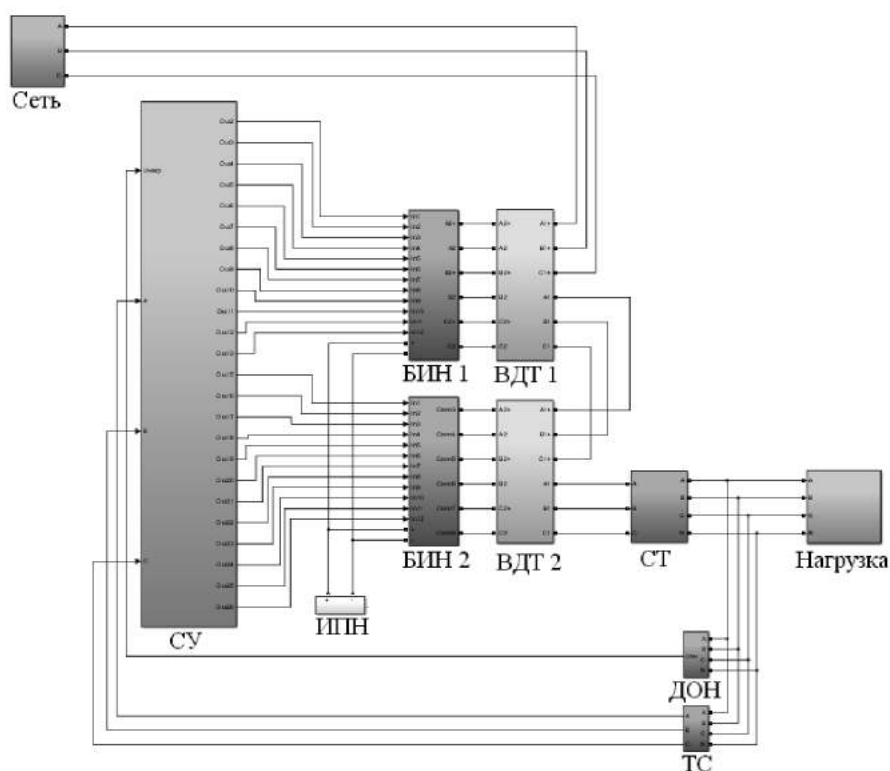
IGBT модулей и трехфазные вольтодобавочные трансформаторы. Силовой трансформатор подстанции имеет схему соединения Y/Y с нулевым проводом на вторичной обмотке.

ФОРМИРОВАТЕЛЬ СПЕЦИАЛЬНОГО СИГНАЛА

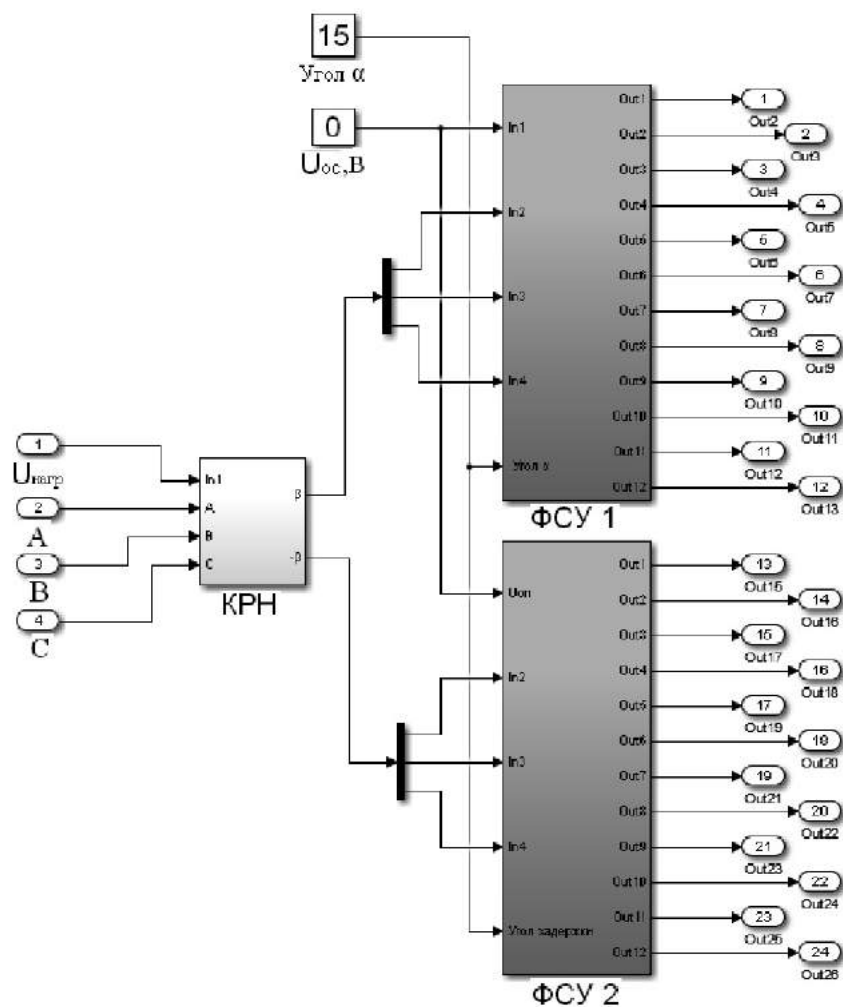
Устройство формирования специального сигнала [3], реализующее 150-градусный алгоритм [1] управления ИН в трехфазной системе электроснабжения, представлено на рис. 4.

Модель формирователя построена на основе блока *Dead Zone Dynamic* (рис. 4, а) в программной среде MatLab, а его физическая реализация возможна на основе операционного усилителя (ОУ) и подстроечного резистора (рис. 4, б).

Выходной сигнал устройства формируется действием отрицательной обратной связи операционного усилителя и потенциометра. При помощи потенциометра регулируется степень смещения положительной



а



б

Рис. 3. Математические модели в среде MatLab:
а – ВДК в составе ТПИ; б – СУ с импульсно-фазовым регулированием

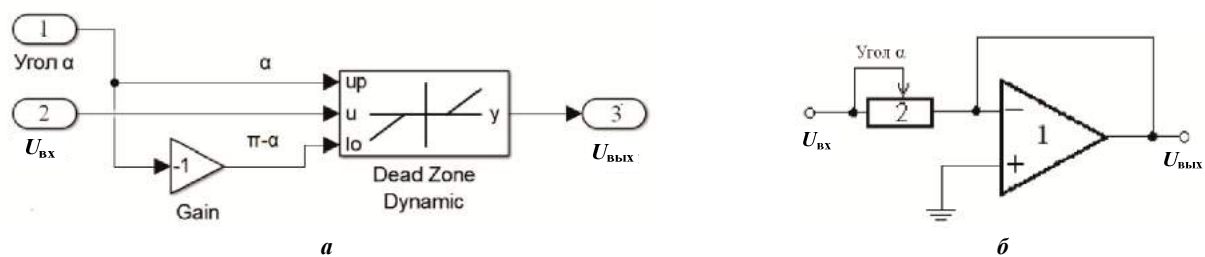


Рис. 4. Модель формирователя сигнала специальной формы:
а – в среде MatLab; б – схема на ОУ

и отрицательной полуволны выходного сигнала усеченной синусоидальной формы, как показано на рис. 5. При указанном смещении выходного сигнала устройства угол управления α изменяется от 0 до 90° .

Формирователь сигнала специальной формы имеет простую реализацию и обладает высокой точностью регулирования. Изменение параметров этого сигнала в системе управления (СУ) позволяет реализовать несколько алгоритмов управления ИН.

Осциллограмма многоуровневого напряжения при работе одного вольтодобавочного устройства и 150-градусном управлении ИН отображена на рис. 6.

АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Рассмотрим два алгоритма формирования напряжения применительно к трехфазной системе электроснабжения. При формировании добавочного многоуровневого напряжения с ШИМ однофазным ИН на входы компаратора подаются противофазные сигналы управления и опорный сигнал, формы которых показаны на рис. 7, а кривые 1, 2, 3 соответственно. Для улучшения качества ШИМ в момент $U_{\text{вых}} = 0$ В блок опорного сигнала формирует запрет на генерирование напряжения.

При этом частота модуляции на выходе ИН минимальна (рис. 7, б). После межфазного взаимодействия добавочное напряжение имеет кратное числу раз фаз и числу каскадов модуляцию, кривая 1 на рис. 7, в. Угол β между $U_{\text{ВД1}}$ и $U_{\text{ВД2}}$ равен $\alpha/2$. С увеличением устройств вольтодобавки первая гармоника добавочного напряжения стремится к синусоидальной форме, кривая 2 на рис. 7, в.

Преимуществом в формировании добавочного многоуровневого напряжения на основе 150-градусного алгоритма в сравнении с известным 180-градусным алгоритмом заключается в меньшем гармоническом искажении и низкой частоте модуляции. Недостатком является искажение добавочного напряжения с ШИМ при амплитуде, близкой к нулю.

Другой алгоритм формирования напряжения представлен на рис. 8.

Его отличием является то, что опорный сигнал равен нулю, в связи с чем отсутствует ШИМ (рис. 8, а). Отсутствие ШИМ сокращает число коммутаций транзисторных ключей ИН (рис. 8, б). В этом случае регулирование напряжения вольтодобавки осуществляется встречным изменением угла β (рис. 8, в). Увеличение устройств вольтодобавки увеличивает количество уровней напряжения.

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ СТАБИЛИЗАТОРА НАПЯЖЕНИЯ

На основе приведенных алгоритмов опишем работу

СУ (см. рис. 3, б) для системы электроснабжения с импульсно-фазовым регулированием.

Синхронизация системы управления ВДК производится от напряжения на низкой стороне СТ. Регулирование угла β блоком КРН меняет величину добавочного напряжения в зависимости от информации, полученной с датчика отклонения напряжения на нагрузке. Синхронизированный с сетью сигнал через блок ФСУ поступает на фазный компаратор, где сравнивается с нулевым опорным напряжением. Полученные управляющие импульсы подаются на вход драйвера IGBT модуля.

При регулировании угла от 0 до 90° , напряжение ВДК изменяется от максимального до нулевого значения, а в диапазоне $90-180^\circ$, от нулевого до минимального значения соответственно. Процесс регулирования напряжения ВДК в положительную и отрицательную полуволну происходит в 6 поддиапазонах, а общее регулирование осуществляется в 12-поддиапазонах.

Преимущества в формировании напряжения предложенным способом для системы электроснабжения заключаются в следующем:

- регулирование угла α дает точную настройку сигнала управления при формировании алгоритма управления ИН;
- каскадное построение уменьшает требуемую мощность вольтодобавочного устройства;
- импульсно-фазовое регулирование позволяет уменьшить количество переключений ключей инвертора, что снижает тепловые потери ИН в сравнении с ШИМ;
- упрощается алгоритм формирования управляющих импульсов за счет отсутствия синхронизированного опорного сигнала и создания временной паузы относительно сигнала управления.

Многоуровневое напряжение практически не искажает форму тока нагрузки в трансформаторах и сети. Это показано на осциллограммах математической модели подстанции [5], представленных на рис. 9.

Приведенные выше алгоритмы формирования сигналов для управления ИН позволяют получить следующие виды регулируемого многоуровневого напряжения:

- с ШИМ при фиксированном значении углов α , β . Амплитуда напряжения ВДК зависит от амплитуды сигнала управления;
- с широтно-импульсным 12-поддиапазонным регулированием напряжения, где амплитуда напряжения ВДК зависит от значения угла β ;
- с широтно-импульсной модуляцией (12-поддиапазонным регулированием напряжения), где изменение амплитуды напряжения ВДК возможно как

углом β , так и амплитудой специального сигнала управления.

Общим блоком при формировании сигналов управления в описанных способах является наличие блока формирования специального сигнала управления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Численные эксперименты показали, что представленные алгоритмы и структура СУ вместе с силовой

схемой в составе ТП дают возможность формирования многоуровневого регулируемого напряжения для стабилизации её величины в нагрузке СТ с высокими энергетическими показателями, линейным регулированием характеристик и сравнительно жесткую внешнюю характеристику, при этом частота модуляции добавочного напряжения в 6 раз выше частоты коммутации транзисторов.

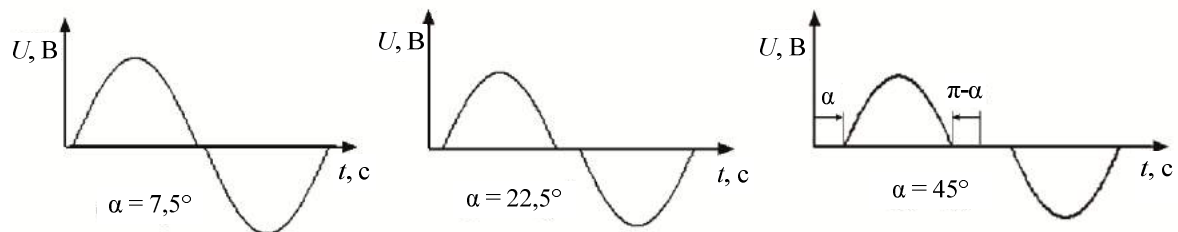


Рис. 5. Форма сигнала при разных углах управления

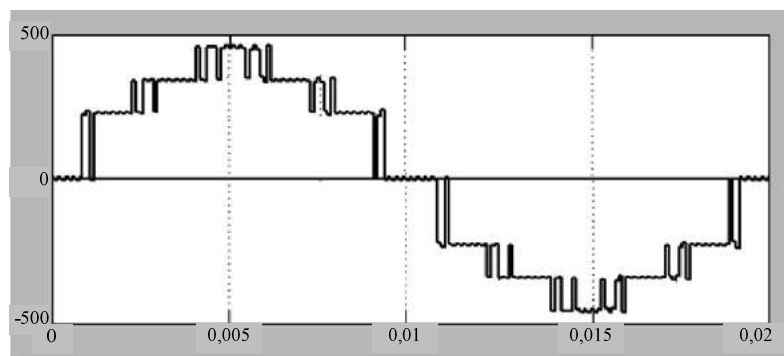


Рис. 6. Напряжение вольтодобавочного устройства

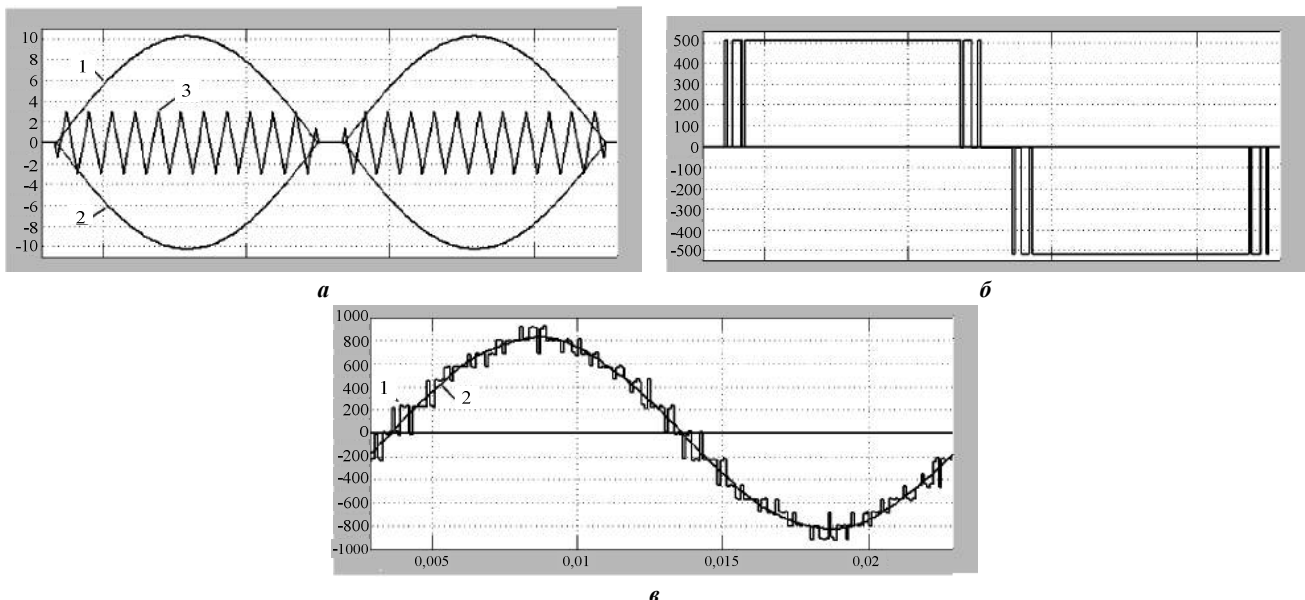


Рис. 7. Фазные напряжения с ШИМ:

а – 1, 2 - прямой и обратный сигнал управления для однофазного ИН, 3 - опорный сигнал;

б – напряжение на выходе однофазного ИН;

в – 1 - напряжение ВДК, 2 – первая гармоника напряжения

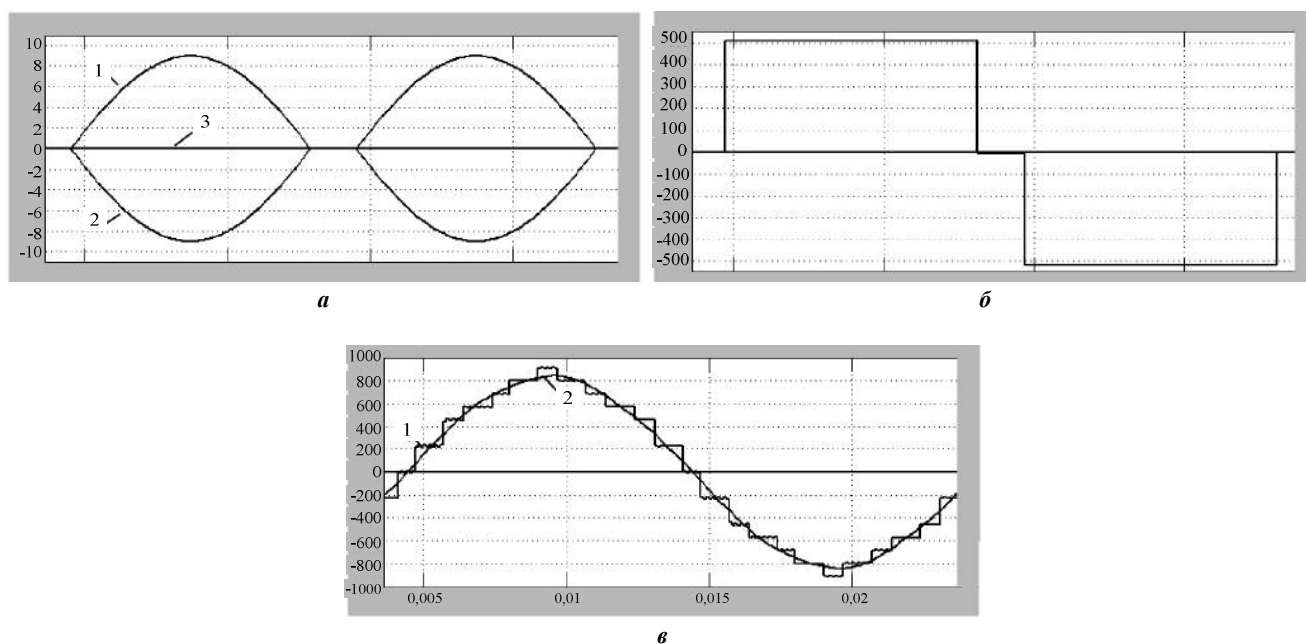


Рис. 8. Фазные напряжения с импульсно-фазовым регулированием:

а – 1, 2 – прямой и обратный специальный сигнал управления для однофазного ИН, 3 – опорный сигнал $U_{OC} = 0$ В;

б – напряжение на выходе однофазного ИН;

в – 1 – напряжение ВДК, 2 – первая гармоника напряжения

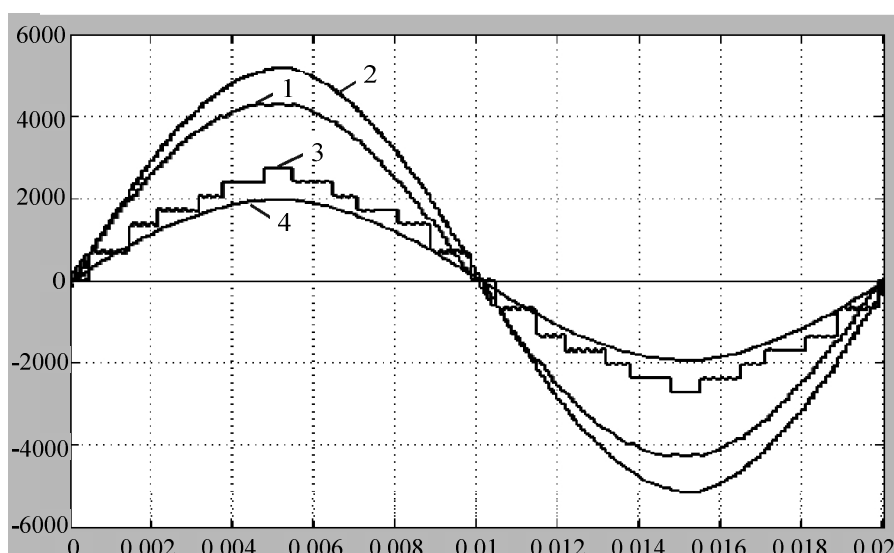


Рис. 9. Осциллограммы напряжения и тока сети при работе СТ на RL-нагрузку с импульсно-фазовым регулированием напряжения ВДК на входе ТП:

1 – напряжение сети; 2 – напряжение на входе СТ; 3 – увеличенное напряжение вольтодобавки ВДК; 4 – ток сети

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Климаш В.С. Инверторы напряжения с широтно-импульсной модуляцией. Комсомольск-на-Амуре: ГОУВПО «КНАГТУ», 2010. С. 12–13.
2. Климаш В.С. Вольтодобавочные устройства для компенсации отклонений напряжения и реактивной энергии с амплитудным, импульсным и фазовым регулированием: монография. Владивосток: Дальнаука, 2002. С. 8–11.
3. Устройство для формирования сигнала специальной формы: пат. 2570032 Рос. Федерация; МПК H03K4/92 / Климаш В.С., Лавренов А.С., Коротков И.И.; заявитель и патентообладатель Климаш В.С., Лавренов А.С. № 2014126993/07; заявл. 01.07.2014; опубл. 10.12.2015, Бюл. № 34.
4. Система 150-градусного управления ведомым инвертором напряжения с широтно-импульсной модуляцией: пат. 135862 Рос. Федерация; МПК H02M7/539 / Климаш В.С., Лавренов А.С.; заявитель и патентообладатель Комсомольский-на-Амуре гос. техн. ун-т. 2013121213/07; заявл. 07.05.2013; опубл. 20.12.2013, Бюл. №35.
5. Модель вольтодобавочного каскада с многоуровневым напряжением в среде MatLab: свид. 2016611781 Рос. Федерация / В.С. Климаш, А.С. Лавренов.; заявитель и патентообладатель Комсомольский-на-Амуре гос. техн. ун-т. 2015619802; заявл. 16.10.2015; опубл. 20.03.2016, Бюл. №3.

Поступила в редакцию 15 августа 2016 г.

INFORMATION IN ENGLISH

MULTI-LEVEL VOLTAGE REGULATION OF TRANSFORMER SUBSTATION

Vladimir S. Klimash

D.Sc. (Engineering), Professor, Federal State-financed Educational Institution of Higher Learning "Komsomolsk-na-Amure State Technical University", Komsomolsk-na-Amure, Khabarovsk Krai, Russia.

Alexander S. Lavrenov

Ph.D. student, Federal State-financed Educational Institution of Higher Learning "Komsomolsk-na-Amure State Technical University", Komsomolsk-na-Amure, Khabarovsk Krai, Russia.

The paper describes the principle of cascaded design of multi-level control devices at the input side of high-voltage transformer substations to maintain the preset voltage level for consumers. Analytical relationships were used to find the control algorithm, and the operation of the control system and the control device based on that algorithm was tested in MatLab environment.

Keywords: Special control algorithm and control signal, control system, multi-level voltage, pulse-phase control and pulse-width modulation, booster cascade/chain, transformer substation.

REFERENCES

1. Klimash V.S. *Invertory napryazheniya s shirotno-impulsnoy modulyatsiey* [Voltage-Source Inverters with Pulse-Width Modulation]. Komsomolsk-on-Amur, KnAGTU Publ., 2010. pp. 12–13
2. Klimash V.S. *Voltodobavochnye ustroystva dlya kompensatsii otkloneniy napryazheniya i reaktivnoy energii s amplitudnym, impulsnym i fazovym regulirovaniem* [Voltage Booster Aimed at Compensation of Voltage Fluctuations and Reactive Energy Fluctuations with Amplitude, Pulse and Phase Control]. Vladivostok, Dalnauka Publ., 2002. pp. 8–11.
3. Klimash V.S., Lavrenov A.S., Korotkov I.I. *Ustroystvo dlya formirovaniya signala spetsial'noy formy* [A device aimed at forming signals of special shape]. Patent RF, no. 2014126993/07, 2015.
4. Klimash V.S., Lavrenov A.S. *Sistema 150-gradusnogo upravleniya vedomym invertorom napryazheniya s shirotno-impul'snoy modulyatsiey* [150-degree control system of controlled voltage-source inverter with pulse-width modulation]. Patent RF, no. 2013121213/07, 2013.
5. Klimash V.S., Lavrenov A.S. *Model' vol'todobavochnogo kaskada s mnogourovnevnyim napryazheniem v srede MatLab* [Model of voltage booster cascade with multi-level voltage in MatLab environment]. Patent RF, no. 2015619802, 2016.

Климаш В. С., Лавренов А. С. Многоуровневое регулирование напряжения трансформаторной подстанции // Электротехнические системы и комплексы. 2017. № 1 (34). С. 10 – 16. doi: 10.18503/2311-8318-2017-1(34)-10-16

Klimash V. S., Lavrenov A. S. Multi-level Voltage Regulation of Transformer Substation. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2017, no. 1 (34), pp. 10 – 16. (In Russian) doi: 10.18503/2311-8318-2017-1(34)-10-16

Сакович И.А.¹, Черевко А.И.², Платоненков С.В.²¹ЗАО «Биус»²ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова»

КОМБИНИРОВАННЫЙ СПОСОБ УПРАВЛЕНИЯ ВЫПРЯМИТЕЛЕМ, ПОСТРОЕННЫМ НА БАЗЕ ТРАНСФОРМАТОРА С ВРАЩАЮЩИМСЯ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

Управляемые выпрямители трехфазного напряжения, выполненные с использованием трансформатора с вращающимся магнитным полем, у которого вторичная N -секционная обмотка представляет собой N -фазный многоугольник или круговую обмотку, а полупроводниковый коммутатор можно уподобить мостовой многоплечной схеме, могут управляться импульсно-фазовыми способами, разработанными для трехфазных мостовых выпрямителей. Одним из новых способов управления выпрямителями на базе трансформатора с вращающимся магнитным полем, предложенным авторами, стал ступенчато-хордовый способ, позволяющий улучшить электромагнитную совместимость с питающей сетью и нагрузкой по сравнению с классическими способами управления. Регулирование выпрямленного напряжения U_d при этом способе заключается в подключении силовыми ключами коммутатора различного числа секций круговой обмотки трансформатора на сборные шины выпрямителя. При этом переход с одной ступени регулирования на другую сопровождается изменением амплитуды пульсаций U_d , из-за чего при девиации управляющего импульса управления в окрестности точки перехода со ступени на ступень в выходном напряжении появляются низкочастотные гармоники. В настоящей работе предлагается модифицированный способ ступенчато-хордового управления, исключающий возбуждение низкочастотных гармоник при переходе с одной ступени регулирования на другую.

Ключевые слова: трансформатор с вращающимся магнитным полем, управляемый выпрямитель, способ управления, качество выпрямленного напряжения.

ВВЕДЕНИЕ

Трехфазные управляемые выпрямители (УВ), выполненные на базе трансформаторов с вращающимися магнитными полями (ТВМП) [1, 2], как показано в [3], обеспечивают более высокую электромагнитную совместимость с питающей сетью и нагрузкой. Важную роль в этом играют ТВМП, выполненные на цилиндрических магнитопроводах, у которых за счет конструктивных мероприятий, подобных мероприятиям, применяемым в электрических машинах, обеспечиваются высокие показатели качества питающего и выходного напряжения [2 - 4].

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Конструктивно силовая часть УВ с ТВМП (рис. 1) содержит полупроводниковый коммутатор и ТВМП, подключаемый к питающей сети через трехфазную обмотку, которая формирует в цилиндрическом магнитопроводе трансформатора вращающееся магнитное поле (ВМП).

Выходная круговая обмотка (КО) выполняется в виде замкнутой в многоугольник многосекционной обмотки, в секциях которой ВМП возбуждает пространственно сдвинутые ЭДС, при этом число секций КО определяет фазность преобразования (рис. 1). В силу общности принципов коммутации ключей, УВ с ТВМП могут управляться импульсно-фазовыми способами, разработанными для трехфазных мостовых выпрямителей [5].

При четном числе N -секций КО пара силовых ключей подключает на сборные шины выпрямителя диаметрально расположенные отводы секций КО (например, 5 и 10 на рис. 1) синфазно с вращающимся суммарным вектором магнитного поля ($\alpha=0^\circ$) или со сдвигом на угол $\alpha>0^\circ$. В этом случае в кривой выпрямлен-

ного напряжения (ВН) получается четное число N пульсаций ВН с периодом $T_{\Pi}=2\pi/N$ без разрывов в кривой выпрямленного напряжения U_d при $\alpha=0^\circ$ и с разрывами первого рода при $\alpha>0^\circ$.

При нечетном числе секций диаметрально расположенные отводы в КО отсутствуют, в результате силовые ключи коммутатора подключают на сборные шины те отводы, через которые можно условно провести наибольшие хорды. При этом в кривой ВН получается удвоенное число пульсаций – $2N$ с периодом $T_{\Pi}=\pi/N$, так как через каждый отвод можно условно провести две максимальные по величине хорды [6].

При увеличении глубины регулирования или угла управления α увеличивается амплитуда пульсаций выпрямленного напряжения (ВН), при этом коэффициент пульсаций ВН (K_{PV}) начинает быстро нелинейно возрастать, что следует из выражения:

$$\begin{aligned} K_{PV}(U_d) &= \frac{\Delta_{\max}(U_d)}{2U_d} \cdot 100\% = \\ &= \frac{U_{d\max} - U_{d\min}}{2U_d} \cdot 100\% = \\ &= \frac{1 - \cos\left(\frac{T_{\Pi}}{2}\right)}{2 \cdot T_{\Pi}^{-1} \cdot \int_{\frac{T_{\Pi}}{2}}^{\frac{T_{\Pi}}{2}} \cos(x) dx} \cdot 100\%. \end{aligned} \quad (1)$$

Анализ геометрической интерпретации структуры правильных многоугольников позволил установить, что многофазное векторное пространство электрических потенциалов в отводах КО позволяет сформировать ступени регулирования (СР) U_d , имеющие минимальное и одинаковое значение для всех K_{PV} при $\alpha=0^\circ$. Количество ступеней регулирования K_C , определяется

количеством хорд различной длины, которые условно можно провести в правильном N -угольнике – $K_C = [N/2]$. Так, при $N=10$ и при $N=11$ количество ступеней регулирования $K_C=5$.

Нормированное относительно единицы значение амплитуды выпрямленного напряжения, получаемого на k -й ступени, определяется по формулам:

$$E_k(N) \Big|_{N - \text{четное}} = \cos\left(\frac{\pi(k-1)}{N}\right); \quad (2)$$

$$E_k(N) \Big|_{N - \text{нечетное}} = \cos\left(\frac{\pi(2k-1)}{2N}\right) \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2N}\right)^{-1}. \quad (3)$$

Использование различных СР позволило разработать ступенчато-хордовый способ управления (СХСУ) (рис. 2) [7, 8], регулировочная характеристика которого, как показано в [8], является составной и кусочно-заданной для каждой СР.

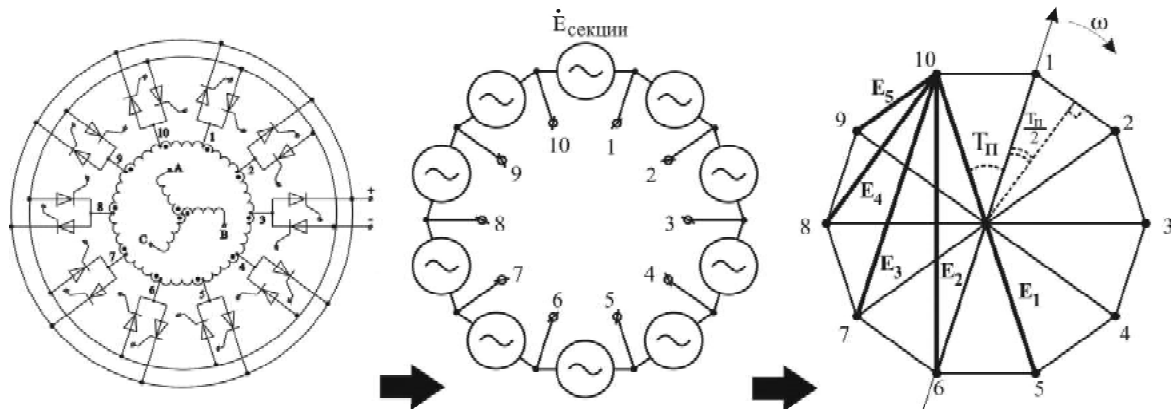


Рис. 1. Структурная схема УВ с ТВМП (а) и геометрические аналогии ТВМП (б-в)

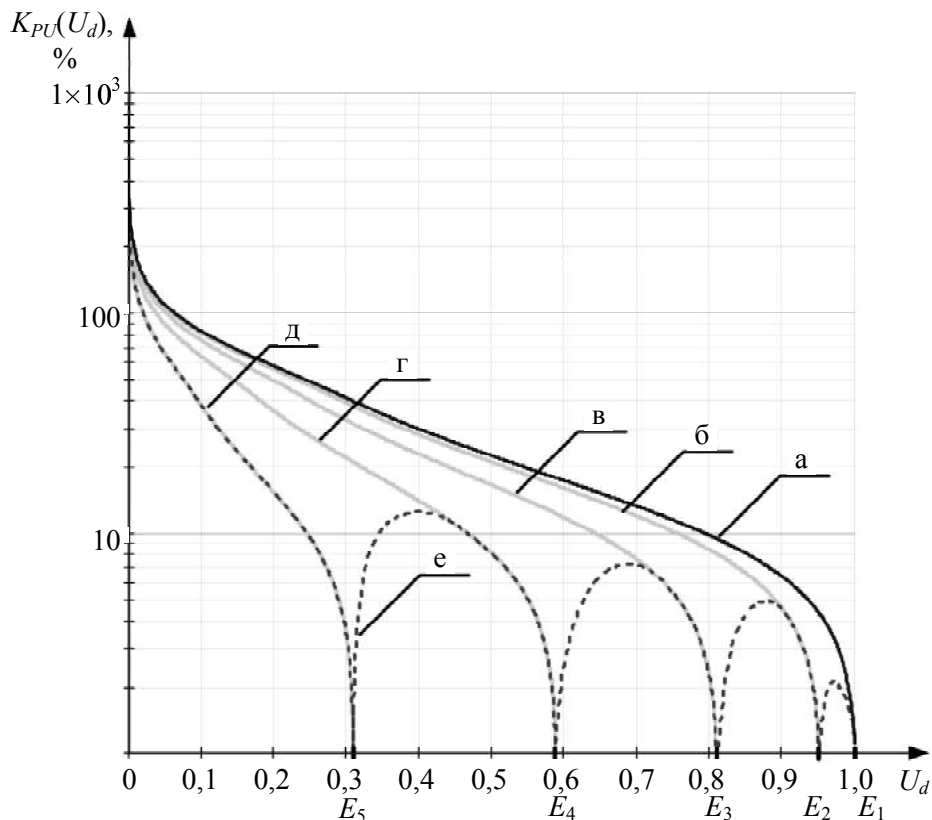


Рис. 2. Графики зависимостей $K_{PV}(U_d)$ для УВ с ТВМП с $N=10$: классический способ управления (а), СХСУ (б-д), комбинированный способ управления (е)

Основное преимущество СХСУ состоит в том, что для удержания K_{PU} в заданном диапазоне при увеличении глубины регулирования U_d , осуществляется переход с более высокой на более низкую СР, при этом K_{PU} снижается до минимального значения K_{PUmin} . Если угол управления α на меньшей ступени продолжает расти, то $K_{PU}(U_d)$ тоже возрастает, но с начального значения (рис. 2, б–д).

Переход с одной СР на другую, т.е. с E_1 на E_2 , с E_2 на E_3 и т.д., сопровождается резким изменением амплитуды пульсаций, что при девиации управляющего сигнала вблизи точки перехода может приводить к появлению в спектре выходного напряжения низкочастотных гармоник.

Для исключения появления низкочастотных гармоник предлагается **комбинированный способ** управления, в котором используются ЭДС смежных СР на одном интервале пульсации U_d , что позволяет осуществлять переход с одной СР на другую при изменении глубины регулирования с плавным снижением амплитуды пульсаций U_d до K_{PUmin} и последующем ее постепенным увеличением (рис. 2, е).

Алгоритмически это реализуется за счет изменения интегральной площади соответствующего сегмента регулирования с помощью изменения момента времени коммутационного перехода с $(k+1)$ -й СР на k -ю СР от максимального значения до нуля (или обратно). Сегменты регулирования интерпретируются как площади фигур, сформированных на временной диаграмме всех мгновенных значений ЭДС КО ТВМП и получающихся путем ограничения по оси ординат смежными СР (т.е. теми, порядковый номер которых отличается на единицу). На рис. 3 приведены сегменты регулирования при $N=10$, а на рис. 4 – формы выходных напряжений при комбинированном способе управления УВ с ТВМП с $N=10$ при различной глубине регулирования.

На рис. 5 в качестве примера приведены регулировочные характеристики для всех поддиапазонов регу-

лирования для УВ с ТВМП с $N=10$, представляющие обобщенную регулировочную характеристику. Диапазон значений выходного напряжения определяется объединением диапазонов значений выходного напряжения для каждого диапазона регулирования:

$$U_d = [0; E_1] = U_d^1 \cup U_d^2 \cup \dots \cup U_d^k. \quad (4)$$

В формуле (4) объединяемые множества определяются

$$U_d^n = (E_n; E_{n+1}]. \quad (5)$$

На рис. 6 приведены графические зависимости $K_{PU}(U_d)$ при нечетном числе секций КО ($N=9; 11; 13$). Из сравнения их с зависимостями $K_{PU}(U_d)$, при $N=10$, представленными на рис. 2, е, следует, что применение комбинированного способа управления позволяет получить более высокое качество выходного напряжения при глубоком его регулировании $U_d \in [0; 0,9U_{dmax}]$ в обоих случаях.

Если учесть, что ГОСТ 32144-2013 [9] требует ограничивать значение K_{PU} на уровне 10%, то из сравнения классического и комбинированного способов управления УВ с ТВМП на основе анализа рис. 2 и 6 следует, что без применения дополнительных мероприятий, при классическом способе и глубоком регулировании U_d , 10 % порог K_{PU} , при $N=10$ будет превышен при 20 % глубине регулирования U_d , а при нечетных $N=9, 11, 13$ допустимый 10 % порог K_{PU} будет превышен, когда U_d снизится соответственно до 60, 50 и 44 % от своего максимального значения.

При комбинированном способе управления УВ с ТВМП и глубоком регулировании U_d , 10 % порог K_{PU} , при $N=10$ будет превышен, когда U_d снизится до 46 % от своего максимального значения – U_{dmax} , а при $N=9$ допустимый 10 % порог K_{PU} будет превышен, когда U_d снизится до 20 % от U_{dmax} .

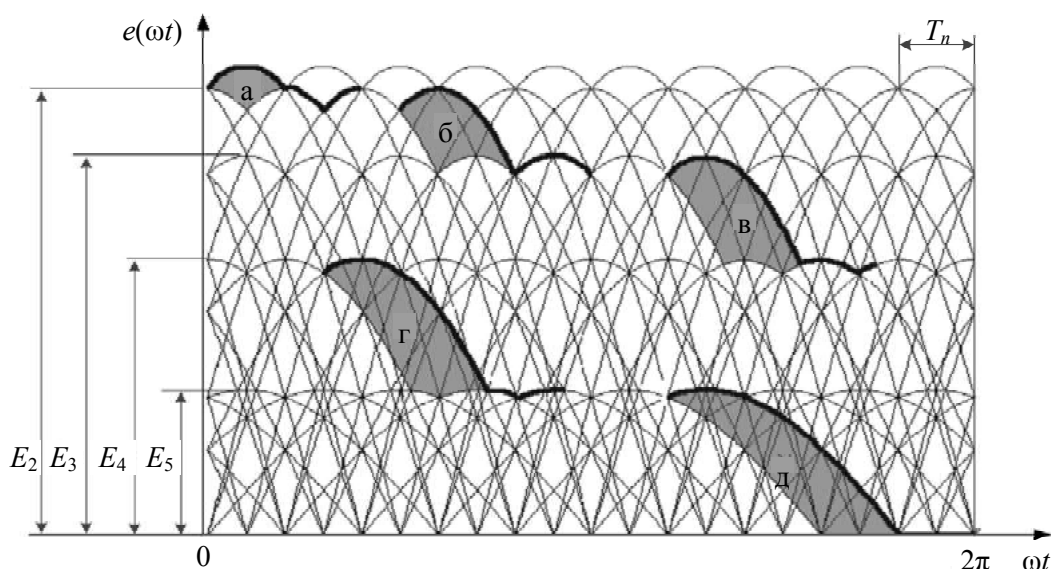


Рис. 3. Формирование сегментов регулирования в пространстве ЭДС для УВ с ТВМП с $N=10$ при комбинированном способе управления:

а – первый; б – второй; в – третий; г – четвертый; д – пятый сегменты регулирования

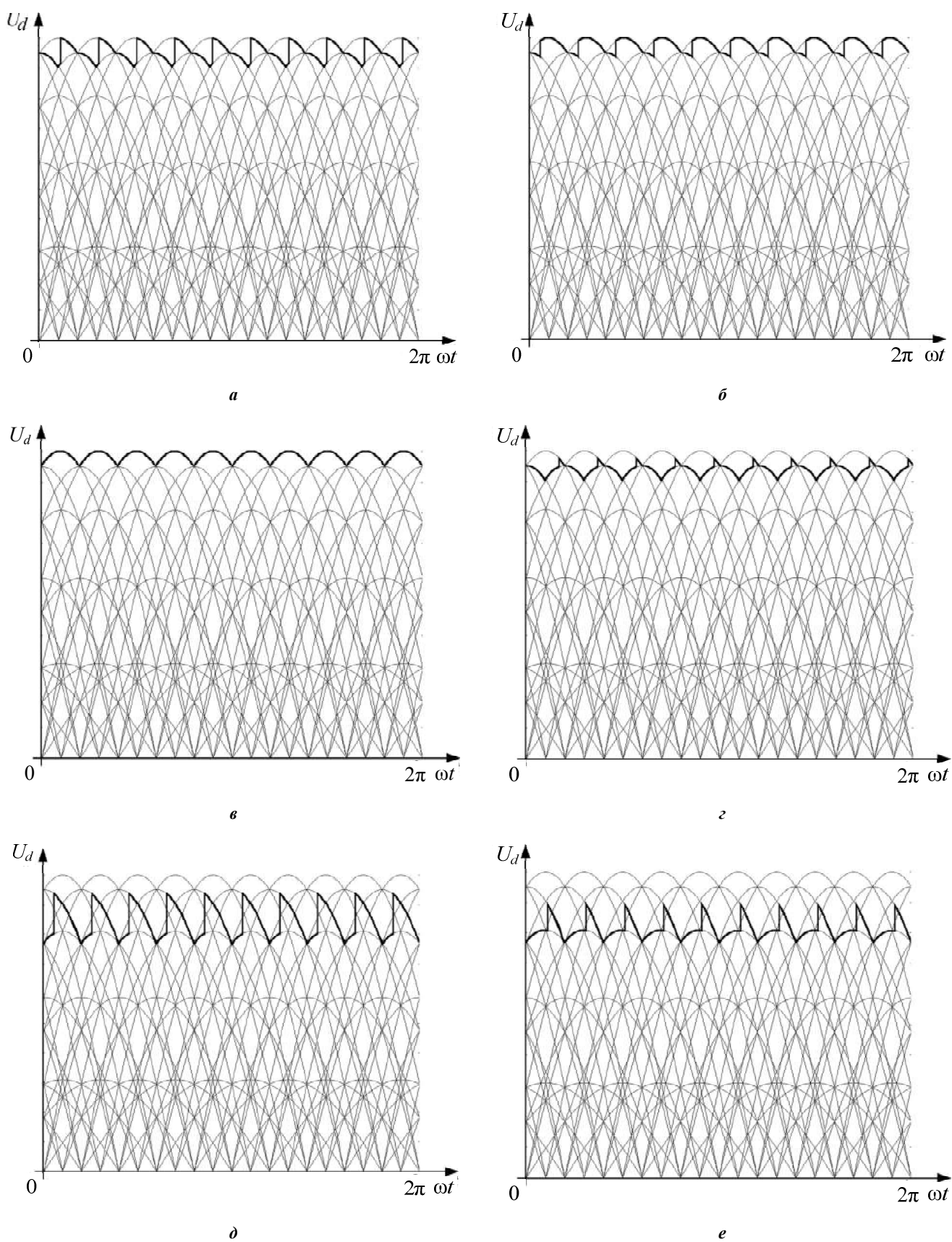


Рис. 4. Форма выходных напряжений при комбинированном способе управления УВ с ТВМП с $N=10$ при различной глубине регулирования

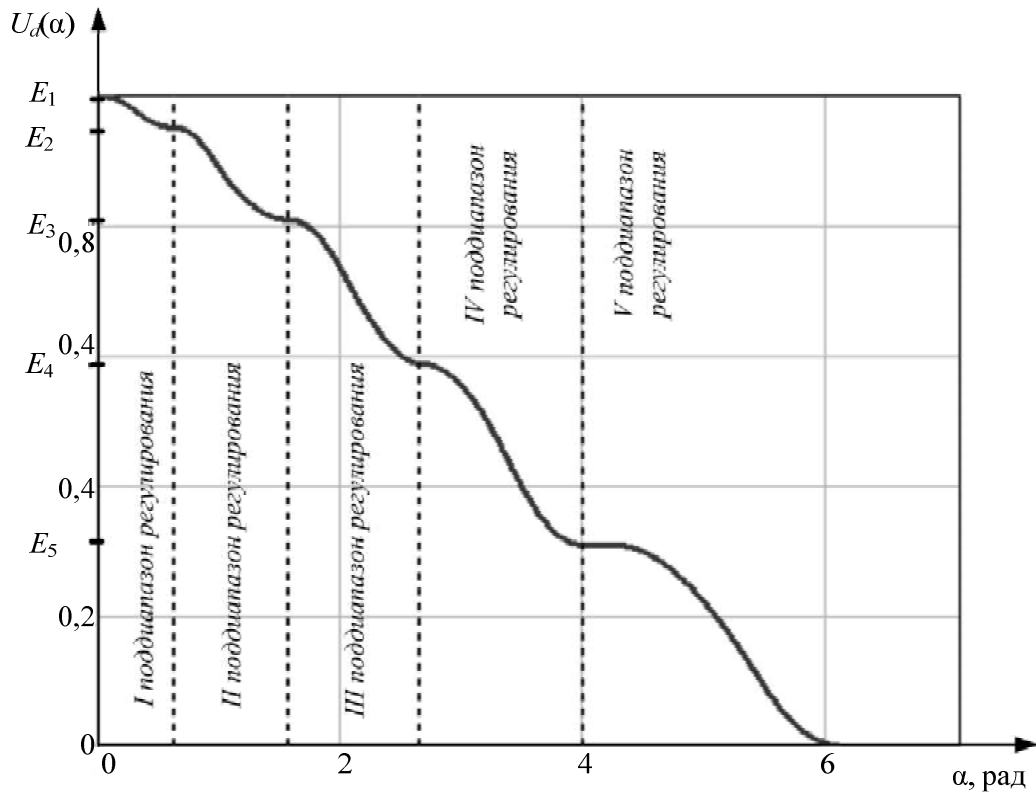


Рис. 5. Обобщенная регулировочная характеристика для УВ с $N=10$ и комбинированного способа управления

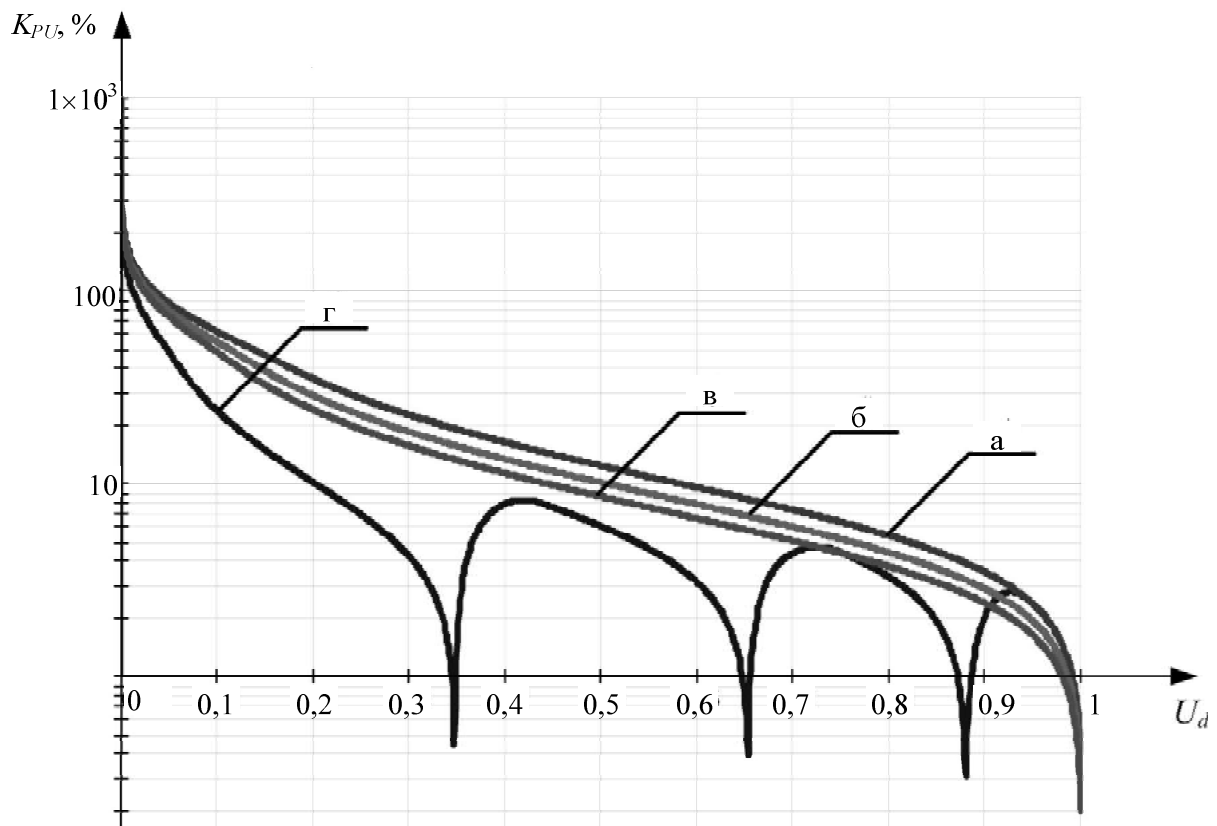


Рис. 6. График зависимости $K_{PU}(U_d)$ при классическом способе управления для УВ с ТВМП с $N=9$ (а), для УВ с ТВМП с $N=11$ (б), для УВ с ТВМП с $N=13$ (в) и для УВ с ТВМП с $N=9$ при комбинированном способе управления (г)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Комбинированный способ управления позволяет улучшить качество выходного напряжения по сравнению с классическим и ступенчато-хордовым способами управления, обеспечить лучшую электромагнитную совместимость с питающей сетью за счет снижения амплитуды коммутационных искажений и решить проблему низкочастотных гармоник при переходе с одной ступени регулирования на другую.

2. Применение комбинированного способа управления на примере рассмотрения УВ с ТВМП с $N=9$ и $N=10$ секциям круговой обмотки показывает, что глубина регулирования выходного напряжения при $K_{PU} \leq 10\%$ больше на 40 %, чем при классическом способе управления, и на 20 % больше, чем при ступенчато-хордовом способе управления.

3. Алгоритмическая реализация комбинированного способа управления ввиду составного характера регулировочной характеристики сложнее, чем у классического способа, но сопоставима по сложности со ступенчато-хордовым способом управления, следовательно, целесообразность применения комбинированного способа оправдана в задачах, связанных с обеспечением высокого качества выпрямленного напряжения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. 2534218 Российская Федерация, МПК Н 01 F 30/14. Многофазный трансформатор / Сеньков А. А., Сеньков А. П., Калмыков А. Н.; заявитель ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет». № 2013131331/07; заявл. 08.07.2013; опубл. 27.11.13.
2. Григораш О.В., Отмахов Г.С. Выпрямители на трансформаторах с вращающимся магнитным полем // Научный журнал КубГАУ. 2014. № 98. С. 560–570.
3. Черевко А.И. Электромагнитная совместимость полупроводниковых преобразователей и электрооборудования в автономных электроэнергетических установках: монография / Севмашвтуз. Северодвинск, 2005.
4. Лимонникова Е. В. Математическое и физическое моделирование полупроводниковых выпрямителей на базе трансформатора с вращающимся магнитным полем в судовых электротехнических комплексах: дис... канд. техн. наук. 05.09.03 / Лимонникова Елена Владимировна. Северодвинск, 2007.
5. Писарев А.Л., Деткин Л.П. Управление тиристорными преобразователями (системы импульсно-фазового управления). М.: «Энергия», 1975.
6. Музыка М. М. Совершенствование полупроводниковых преобразователей с трансформаторами с вращающимися магнитными полями в судовых электротехнических системах: дис... канд. техн. наук. 05.09.03 / Музыка Михаил Михайлович. Северодвинск, 2008.
7. Пат. 2566365 Российская Федерация, МПК Н 02 М 7/12. Способ ступенчато-хордового регулирования выходного напряжения выпрямителя на базе трансформатора с вращающимся магнитным полем / Платоненков С. В., Черевко А. И., Рогушина А. А., Сакович И. А., Музыка М. М., Кузьмин И. Ю.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова» (САФУ). № 2014123573/07; заявл. 09.06.14; опубл. 27.10.15, Бюл. № 30. – 11 с.: ил.
8. Сакович И.А., Черевко А.И., Платоненков С.В. Качество выходного напряжения управляемого выпрямителя на базе трансформатора с вращающимся магнитным полем // Электричество 2016. №1. С. 43–49.
9. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.

Поступила в редакцию 08 октября 2016 г.

INFORMATION IN ENGLISH

COMBINED CONTROL METHOD OF THE RECTIFIER BASED ON A TRANSFORMER WITH ROTATING MAGNETIC FIELD

Igor A. Sakovich

Team Manager, the department of development and implementation of Information Technology, the JSC “Bius”, Severodvinsk, Russia. E-mail: igorsakovitch@gmail.com.

Aleksander I. Cherevko

D.Sc. (Engineering), Professor, Head of Ship Electric Power Supply and Electrical Engineering Department, the North (Arctic) Federal University (NFU), Severodvinsk, Russia. E-mail: cherevko-ai@mail.ru.

Sergey V. Platonenkov

Assistant Professor, the Department of Industrial Automation and Control, the North (Arctic) Federal University (NFU), Severodvinsk, Russia. E-mail: platonenkov@mail.ru.

Abstract. Controlled rectifiers of three-phase voltage based on a transformer with a rotating magnetic field where secondary N-sections winding represents N-phase shape like circular winding and semiconductor commutator can be represented by a full bridge scheme. That is why these rectifiers may be controlled by the pulse-phase methods developed for the three-phase bridge rectifiers. One of the new control methods is the step-chord method that will improve the quality of the output

voltage and electromagnetic compatibility with the power supply network in comparison with classical control methods. Regulation of rectified voltage U_d while using this method consists in commutative control of the power switches of the commutator various number of the transformer circular winding sections to rectifier common buses. In the process, the step-to-step crossing is accompanied by an U_d -amplitude pulsation change, that causes signal deviation of the control system in these

change-point environment, which causes occurrence of low frequency components in the output voltage. The modified step-chord control method, which eliminates the generating of low frequency harmonics by step-to-step crossing is proposed in this article.

Keywords: Transformer with rotating magnetic field, controlled rectifier, control method, quality of rectified voltage.

REFERENCES

1. Senkov, A. A., Senkov A. P., Kalmykov A.N. *Mnogofaznyj transformator* [Polyphase transformer]. Patent RF, no. 2534218, 2013.
2. Grigorash O.V., Otmahov G.S. Rectifier on transformers with rotating magnetic field. *Nauchnyy zhurnal KubGAU* [Scientific Journal of KubSAU], 2014, no. 98, pp. 560–570. (In Russian)
3. Cherevko A.I. *Elektromagnitnaya sovместimost poluprovodnikovyh preobrazovatelej i elektrooborudovaniya v avtonomnyh elektroenergeticheskikh ustanovkah* [Electromagnetic compatibility of semiconductor convertors and autonomy electrical equipment: monograph]. Severodvinsk, Sevmashvtuz Publ., 2005.
4. Limonnikova E.V. *Matematicheskoe i fizicheskoe modelirovanie poluprovodnikovih vipryamitelei na baze transformatora s vraschayuschimsya magnitnim polem v sudovih elektrotehnicheskikh kompleksah*. Kand. Diss. [Mathematical and physical modeling of semiconductor rectifiers based on transformers with rotating magnetic in marine electric power systems. Ph.D. Diss.]. Severodvinsk, 2007.
5. Pisarev A.L., Detkin L.P. *Upravlenije tiristornymi preobrazovateljami* [Control of the thyristor converters]. Moscow, Energy Publ., 1975.
6. Muzyka M.M. *Sovershenstvovanie poluprovodnikovih preobrazovatelei s transformatorami s vraschayuschimsya magnitnimi polyami v sudovih elektrotehnicheskikh sistemah*. Kand. Diss. [Improvement of semiconductor converters based on transformers with rotating magnetic fields in the marine electrical systems. Ph.D. Diss.]. Severodvinsk, 2008.
7. Platonenkov S.V., Cherevko A.I. et al. *Sposob stupenchatohodovogo regulirovaniya vyhodnogo napryazheniya vypryamitelya na baze transformatora s vraschayushchimsya magnitnym polem* [Step-chord control method of output voltage of the rectifier based on a transformer with rotating magnetic field]. Patent RF, no. 2014123573/07, 2015.
8. Sakovich I.A., Cherevko A.I., Platonenkov S.V. *Kachestvo vyhodnogo napryazheniya upravlyаемого vypryamitelya na baze transformatora s vraschayushchimsya magnitnym polem* [Output voltage quality of the controlled rectifier based on a transformer with rotating magnetic field]. *Electrotehnika* [Electrical Technology Russia], 2016, no. 1 (2016), pp. 43–49. (In Russian)
9. State Standard 32144-2013 Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality limits in the public power supply systems.

Сакович И.А., Черевко А.И., Платоненков С.В. Комбинированный способ управления выпрямителем, построенным на базе трансформатора с вращающимся магнитным полем // Электротехнические системы и комплексы. 2017. №1(34). С. 17 - 23. doi: 10.18503/2311-8318-2017-1(34)-17-23

Sakovich I.A., Cherevko A.I., Platonenkov S.V. Combined Control Method of the Rectifier Based on a Transformer With Rotating Magnetic Field. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2017, no.1(34), pp. 17-23. (In Russian) doi: 10.18503/2311-8318-2017-1(34)-17-23

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСИНУСОИДАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ЦЕХОВОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ ВИБРАЦИОННОМ ФОРМИРОВАНИИ БЕТОННЫХ СМЕСЕЙ

В статье представлены результаты экспериментальных исследований режимов работы цеховых систем электроснабжения, содержащих электроприемники с нелинейными вольтамперными характеристиками. При производстве железобетонных изделий конвейерным способом в технологическом процессе применяются регулируемые электроприводы переменного тока на базе полупроводниковых преобразователей частоты с промежуточным звеном постоянного тока - асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором (ППЧ-АД). Наряду с оптимизацией и повышением качества технологического процесса изготовления железобетонных изделий, ППЧ-АД является источником высших гармоник тока и напряжения, генерируемых в систему электроснабжения цеха. Эксперименты проводились сертифицированными приборами Chauvin Arnoux 8335 и Энергомонитор-3.3Т1 (сертификация приборов подтверждена свидетельством о поверке №008013, №008014 от 28.04.2016 г.). Измерения проводились непрерывно в течение трёх суток с регистрацией данных в одну минуту. Подключение приборов осуществлялось к трехфазной четырехпроводной сети в соответствии с программой экспериментальных исследований, утвержденной главными специалистами предприятия. Результаты измерений представлены в виде таблиц, графиков и гистограмм. Достоверность результатов подтверждается исключением систематических и случайных погрешностей в соответствии с требованиями стандарта. Результаты экспериментов подтверждают наличие высших гармоник тока и напряжения в цеховой системе электроснабжения. При этом суммарные коэффициенты гармонических составляющих напряжения достигают критических значений, в зависимости от режимов работы конвейера более 8,5 %, что указывает на необходимость применения технических средств для их компенсации. В качестве технических решений может быть предложено использование активных или гибридных фильтров с системами управления, учитывающими цикличность технологического процесса.

Ключевые слова: железобетонные изделия, уплотнение бетонной смеси, виброплощадка, высшие гармоники токов и напряжений, цеховая система электроснабжения, частотный электропривод, анализаторы качества электроэнергии, суммарные коэффициенты гармонических составляющих токов и напряжений.

ВВЕДЕНИЕ

Производство железобетонных изделий (ЖБИ) для гражданского и промышленного использования производится в цехах ЖБИ по конвейерному способу (рис. 1). Для уменьшения процентного соотношения некачественной продукции особое внимание уделяется процессу динамического вибрационного формования бетонной смеси (ДВФБС) на заданных технологическим регламентом вибросмещениях до требуемых характеристик [1]. В результате происходит более плотная укладка частиц, которая сопровождается удалением из бетонной смеси воздуха и возрастанием в 1,6-1,65 раз плотности смеси по сравнению с первоначальной.

На рис. 1: 1-4 – материалы необходимые для производства ЖБИ; 5-8 – разгрузка материалов на склад; 9 – приготовление бетонной смеси; 10 – подготовка комплектующих для установки в форму; 11 – натяжение струнопакетов, установка разделительных проставок; 12 – укладка, уплотнение и формование етной смеси; 13 – извлечение съемной оснастки; 14 – тепловлажностная обработка; 15 – передача напряжения на бетон; 16 – расконтровка; 17 – очистка и смазка форм, установка закладных с уплотнителями и струнопакетов; 18 – распиловка на отдельные изделия; 19 – складирование по сортам; 20 – сдача на склад готовой продукции; М1-М2 – нерегулируемый электропривод (ЭП) конвейера, смесителя; М3 – регулируе

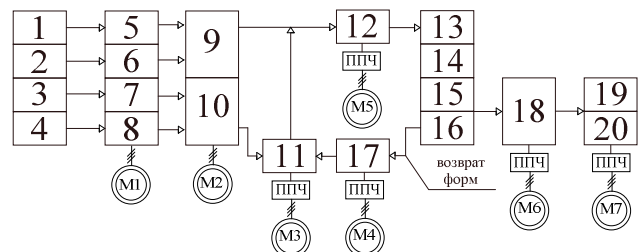


Рис. 1. Технологическая схема изготовления ЖБИ

мый ЭП конвейера протягивания для армирования изделия; М4 – регулируемый ЭП мостового крана цеха и компрессора; М5 – регулируемый ЭП виброплощадок; М6 – регулируемый ЭП станка распила плит на отдельные изделия; М7 – регулируемый ЭП мостового крана склада; ППЧ – полупроводниковый преобразователь частоты.

Бетонная смесь после приготовления передается в бетононасос. Уплотнение ее до требуемых характеристик обеспечивает виброплощадка. Виброплощадка состоит из десяти самостоятельных вибрационных блоков, вибраторы которых имеют общий привод от электродвигателя. На виброплощадке начинается процесс формования ЖБИ. Достижение требуемого качества происходит за счет регулирования колебаний рабочего органа виброплощадки. С этой целью в качестве электропривода используются асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором. Регулирование частоты вращения достигается использованием частотных преобразователей с промежуточным звеном постоян-

ного тока. Частотно-регулируемый электропривод является источником высших гармоник (ВГ) тока и напряжения в систему электроснабжения цеха. ВГ тока оказывают негативное влияние на режимы работы других электроприемников цеховой системы электроснабжения. Оценка показателей электромагнитной совместимости электроприводов с нелинейными вольтамперными характеристиками с цеховой системой электроснабжения является важной задачей для дальнейшей реализации соответствующих технических решений [2-4].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ОБСТАНОВКИ В ЦЕХОВОЙ СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРИ ДВБФ

На **рис. 2** представлена схема электроснабжения завода по производству ЖБИ. К одной из особенностей цеха по производству ЖБИ относится построение системы электроснабжения электроприемников с частотно-регулируемыми электроприводами, подключенными к одной секции шин понизительной цеховой подстанции, где трансформатор используется как понижающий и согласующий. Проблема усугубляется тем, что за счет продольного активно-индуктивного сопротивления сети несинусоидальный характер кривой входного тока указанных электроприемников вызывает искажение питающего напряжения, которые являются фактором взаимовлияния высших гармоник в цеховой системе электроснабжения [5, 6].

В **табл. 1** представлены характеристики применяемого оборудования конвейерной линии, в которой используется частотный регулируемый электропривод.

Экспериментальные исследования проводились с помощью анализаторов качества электроэнергии, позволяющих производить автоматическую регистрацию мгновенных действующих и комплексных значений токов и напряжений ВГ в течение нескольких суток [7]. На **рис. 2** точками подключения И1-4 указано место проведения измерений с помощью сертифицированных приборов: Chauvin Arnoux 8335 и Энергомотор-3.3Т1, технические характеристики которых представлены в **табл. 2** (сертификация приборов подтверждена свидетельством о поверке №008013, №008014 от 28.04.2016 г.).

Измерения проводились непрерывно в течение трёх суток с регистрацией данных в одну минуту. Подключение приборов осуществлялось к трехфазной четырехпроводной сети в соответствии с программой экспериментальных исследований, утвержденной главными специалистами предприятия. Программа измерений включала выполнение следующих этапов:

- установка необходимых параметров регистрации и пределов измерений токов и напряжений на приборах;
- активирование регистрации показателей режимов работы цеховой электрической сети (токи, напряжения, мощности и показателей электромагнитной совместимости).

Фрагмент результатов экспериментальных исследований в точке И4 в течение 10 мин представлен в **табл. 3**.

По результатам измерений получены кривые токов и напряжений, на основании которых построены гистограммы показателей электромагнитной совмести-

сти: суммарные коэффициенты гармонических составляющих тока и напряжения в исследуемой электрической сети при динамических изменениях токов и напряжений в процессе выполнения одного технологического цикла. На **рис. 3** представлены осциллограммы линейного напряжения и тока, полученные с помощью прибора СА8335 и гистограммы кривых тока и напряжения (**рис. 4-5**) в точке И4.

Результаты эксперимента, проведенного в точках И1-4, показали, что средняя полная мощность за технологический цикл составляет 28 – 127,2 кВА, THD I 22,35 – 45%, THD U 2,5 – 8,85%. На **рис. 6** представлен график изменения показателей электромагнитной совместимости в зависимости от потребляемой полной мощности.

Как видно из графика на **рис. 6**, с увеличением потребляемой полной мощности электроприемниками показатели ЭМС возрастают и могут значительно превышать допустимые стандартом значения.

С учетом того, что преобразователи частоты подключены к одному согласующему трансформатору, допускается вычислять суммарный коэффициент гармонической составляющей тока и напряжения на вводе (QF1, см. **рис. 2**) соответственно:

$$K_{I\Sigma} = \sqrt{K_{I1}^2 + K_{I2}^2 + K_{I3}^2 + K_{I4}^2} = \sqrt{22,35^2 + 27,7^2 + 29,2^2 + 40,2^2} = 61,12\%; \quad (1)$$

$$K_{U\Sigma} = \sqrt{K_{U1}^2 + K_{U2}^2 + K_{U3}^2 + K_{U4}^2} = \sqrt{2,8^2 + 2,5^2 + 4^2 + 6,7^2} = 8,66\%, \quad (2)$$

где K_1 - K_4 – значения суммарного коэффициента гармонических составляющих тока и напряжения в точках проведения измерений И1-И4 соответственно. Достоверность результатов экспериментальных исследований подтверждается исключением систематических и случайных погрешностей на основании методики обработки результатов измерений по ГОСТ Р. 8.736-2011 [8]. В соответствии с настоящим стандартом для 24 последовательных измерений произведен расчет поправки к результатам измерений с доверительной вероятностью $P=0,95$, результаты которого представлены в **табл. 4**.

Таким образом, значения измеренных суммарных коэффициентов гармонических составляющих тока и напряжения с доверительной вероятностью 0,95 соответственно составляют:

- прибор СА8335 THD I (40±2,4) %, THD U (6,7±0,21) %;
- прибор Э-3.3Т1 THD I (45±1,8) %, THD U (8,85±0,26) %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Результаты измерений параметров режимов системы электроснабжения цеха по производству ЖБИ с помощью анализаторов качества электроэнергии позволили выявить уровень высших гармоник тока и напряжения для конкретного технологического процесса. При этом суммарные коэффициенты гармонических составляющих тока и напряжения соответственно: $K_I = 40 - 45\%$, $K_U = 6,7 - 8,85\%$.

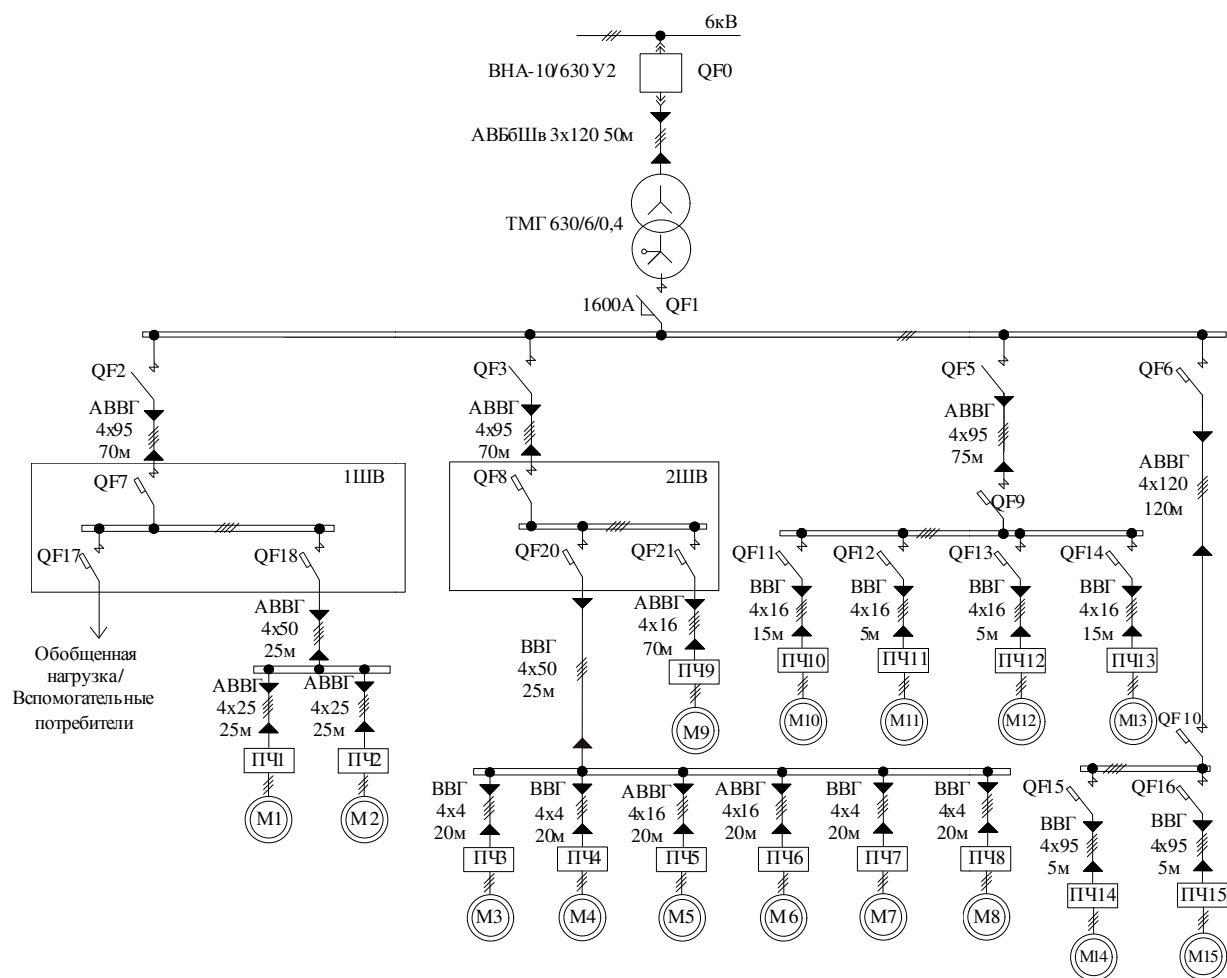


Рис. 2. Схема цеховой системы электроснабжения промышленного предприятия по производству ЖБИ

Таблица 1

Характеристики применяемого электропривода

Наименование оборудования	Паспортные данные электроприемников					
	Тип электропривода/преобразователя частоты	$P_{ном}, кВт$	$I_{ном}, А$	Угловая скорость n , об/мин	$\eta_{ном}, \%$	$\cos\varphi_{ном}$
Станок распила	АИР/ Delta VFD	22	41,5	2880	90,5	0,89
Мостовые краны		23	48	750	76,5	0,71
Конвейер протягивания		18,5	38	1000	89	0,81
Вибро-площадка		30	57,3	1470	91,5	0,87
Компрессор		110	198	2980	93,7	0,9

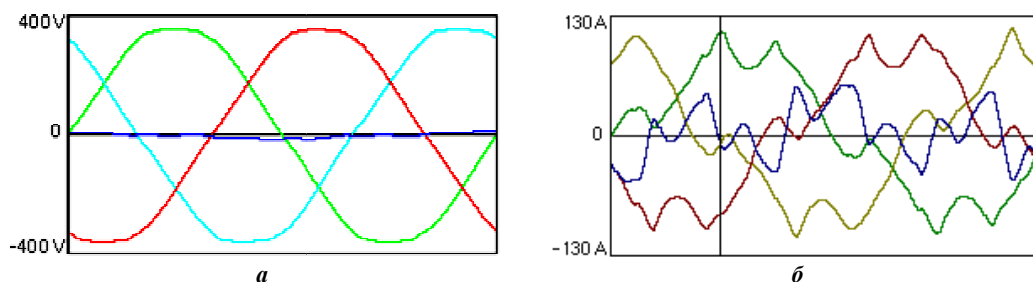


Рис. 3. Осциллограммы:
а – напряжения (THD U=7,6 %); б – тока (THD I=42 %)

Таблица 2

Технические характеристики измерительных приборов

Прибор	Характеристика	Погрешность измерения	Предел измерения
«Энерго-монитор-3.3Т1»	Ток, А	$\pm 1\%$	1000
	Напряжение, В	$\pm 1\%$	622,5
	Активная мощность, кВт	$\pm 2\%$	1120,5
	Реактивная мощность, квар	$\pm 2\%$	1120,5
	Суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения K_U (THD U), %	$\pm 0,05\%$	49,9
	Суммарный коэффициент гармонических составляющих тока K_I (THD I), %	$\pm 1\%$	49,9
«ChauvinArnouX 8335»	Ток, А	$\pm 0,5\%$	6500
	Напряжение, В	$\pm 0,5\%$	1000
	Активная мощность, кВт	$\pm 1\%$	9999
	Реактивная мощность, квар	$\pm 1\%$	9999
	Суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения K_U (THD U), %	$\pm 0,1\%$	999
	Суммарный коэффициент гармонических составляющих тока K_I (THD I), %	$\pm 1\%$	999

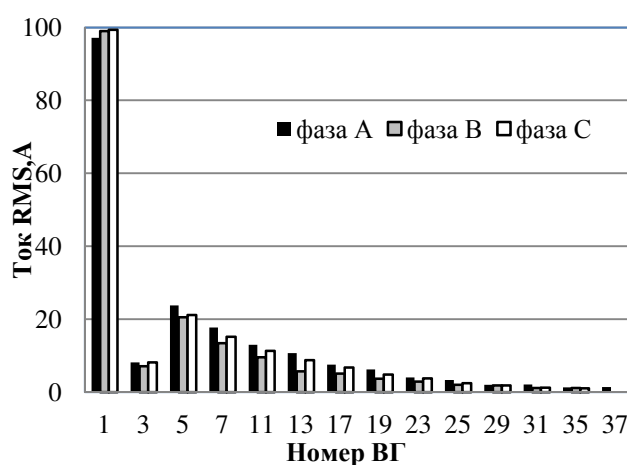
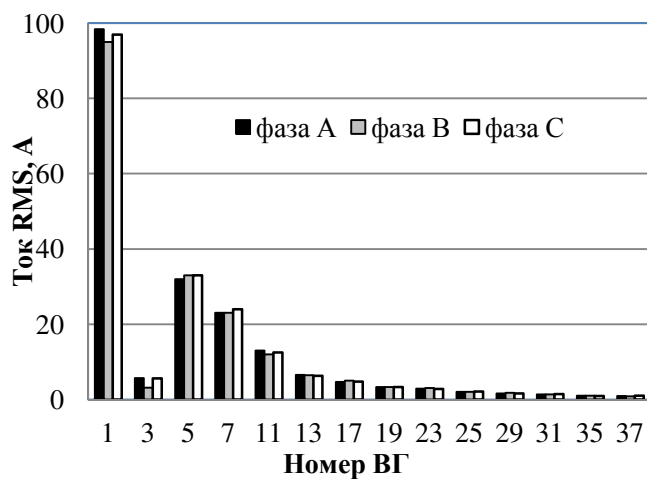


Рис. 4. Гистограмма высших гармоник кривой тока:
а – прибор Э-3.3Т1 (THD I=45 %); б – прибор CA 8335 (THD I=40 %)

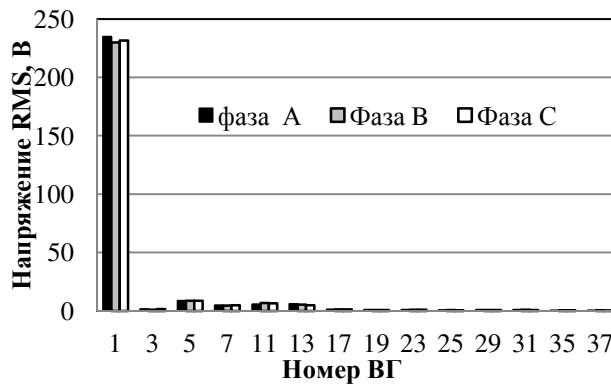
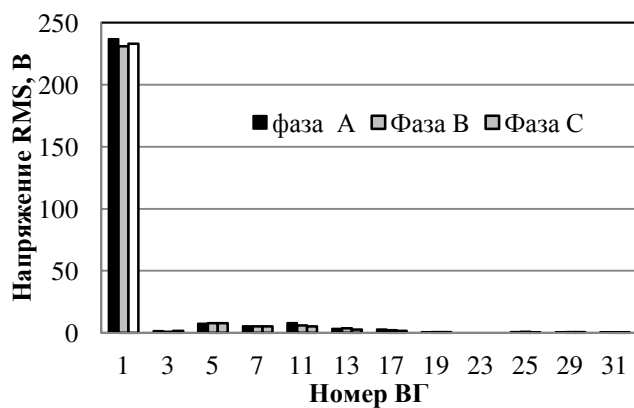


Рис. 5. Гистограмма высших гармоник кривой напряжения:
а – прибор Э-3.3Т1 (THD U=8,85 %); б – прибор CA 8335 (THD U=6,7 %)

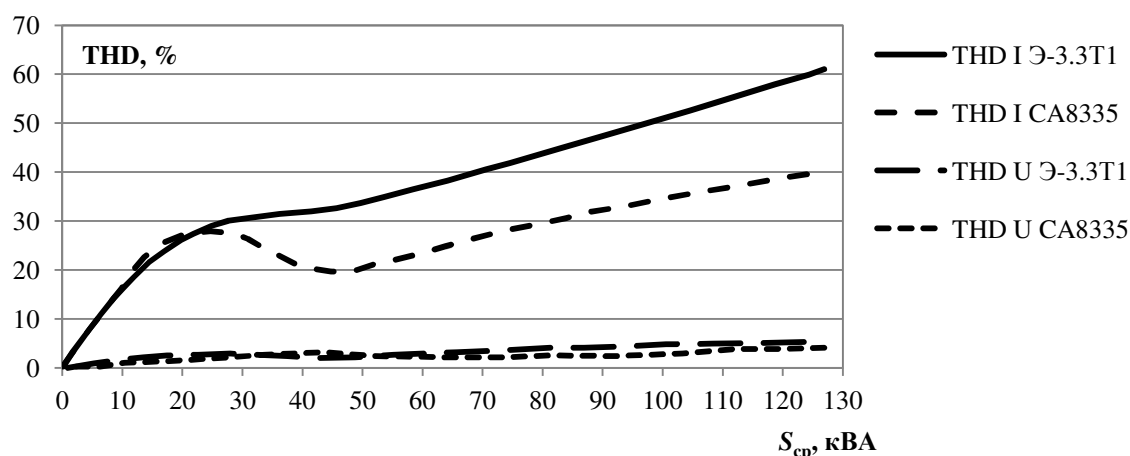


Рис. 6. Зависимость THD I и THD U от потребляемой полной мощности

Таблица 3

Фрагмент результатов измерений

Время	I_A, A	U_{AB}, B	$P_{\Sigma}, кВт$	$Q_{\Sigma}, квар$	$S_{\Sigma}, кВА$	THDI _A , %	THDU _{AB} , %	THDI _{A(5)} , %	THDU _{A(5)} , %
	CA8335	CA8335	CA8335	CA8335	CA8335	CA8335	CA8335	CA8335	CA8335
	Э-3.3Т1	Э-3.3Т1	Э-3.3Т1	Э-3.3Т1	Э-3.3Т1	Э-3.3Т1	Э-3.3Т1	Э-3.3Т1	Э-3.3Т1
13:01:00	84,7	390	54	11,3	57,9	44,9	4,7	36,9	2,8
	79,01	389,47	52	9,9	58,4	41,88	6,5	35,37	4,79
13:02:00	79,5	388,7	53	13,3	59,3	39,7	6	32,4	4
	84,48	388,15	54,7	12	60,8	37,57	7,45	31,31	5,39
13:03:00	83,3	386	52,4	15,9	60,5	43,3	5,9	36	3,58
	85,24	389,92	55,5	13,3	62,1	39,42	5,34	33,5	4,64
13:04:00	86,4	387	56,1	11,5	57,7	45,2	5,8	35,3	4,2
	81,74	390,45	53,4	9,9	59,4	40,43	5,89	33,36	6
13:05:00	60,2	386,2	42,1	9,1	48,5	47,9	6,6	34,9	3,8
	70,72	388,1	45,2	8,6	51	42,32	7,58	34,64	5,43
13:06:00	14	388,8	32,4	1,9	4,5	55,2	5,4	38	4
	7,18	388,33	44,3	1,2	5,8	81,63	5,57	40	5,31
13:07:00	5	388,1	20,1	1,9	1,6	50,6	4	36,3	3,9
	2,9	389,9	14	1,2	2,2	61,52	4,67	34,26	5,05
13:08:00	121,8	386	67,4	35,6	78,6	30,4	5,3	18,4	3,8
	116,03	385,15	65,2	33,5	79,1	29,01	6,77	16,92	4,93
13:09:00	165,7	387,4	110,7	41,6	114,5	17,9	7,8	14,2	5
	171,53	385,2	105,8	40,4	115,7	14,64	8,85	8,93	6,98
13:10:00	104,5	386,2	68,7	12,7	71,3	44,7	6,2	16,3	4,5
	111,17	385,93	65,1	9,9	75,9	41,88	7,51	15,18	5,89

Примечание. P_{Σ} , Q_{Σ} , S_{Σ} – активная, реактивная, полная мощность в трехфазной сети, THD_{A(5)} – коэффициент пятой гармонической составляющей тока (напряжения) фазы A.

Таблица 4

Параметры для обработки результатов измерений

Наименование параметра	Для THD I		Для THD U	
	CA8335	Э-3.3Т1	CA8335	Э-3.3Т1
S	5,66	4,16	0,49	0,62
S^*	5,55	4,07	0,45	0,57
$d_{1-q/2}$	0,7040			
$\tilde{d}$	0,8396	0,8753	0,7676	0,8858
$d_{q/2}$	0,8901			
$Z_{p/2} \cdot S$	12,28	9,03	1,06	1,35
ϵ	2,4	1,8	0,2083	0,2597
THD	40±2,4	45±1,8	6,7±0,21	8,85±0,26

Примечание. S – среднеквадратичное отклонение, содержащее n результатов измерений, S^* – смещенное среднее квадратичное отклонение, $d_{1-q/2}$ и $d_{q/2}$ – квантили распределения получаемые из таблицы Б.1 [8] по n , $q_1/2$ и $(1 - q_1/2)$, причем q_1 – заранее выбранный уровень значимости, $\tilde{d}$ – отношение для проверки критерия подтверждения нормального закона распределения результатов измерений, $Z_{p/2}$ – верхний квантиль распределения нормированной функции Лапласа, ϵ – доверительные границы (без учета знака) случайной погрешности оценки измеряемой величины.

2. Достоверность измерений подтверждается хорошим совпадением результатов измерений двумя сертифицированными приборами и введением поправок в результаты измерений. В соответствии со стандартом доверительный интервал принимался с вероятностью 0,95.

3. Результаты натурных экспериментов подтверждают необходимость установки фильтрокомпенсирующих устройств для ограничения токов высших гармоник. Однако с учетом цикличности технологических процессов и разнообразием ассортимента ЖБИ оптимальным решением следует считать использование гибридных фильтров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Романюк Т.Ф., Петров Г.Г. Технология производства строительных материалов: учеб. пособие. Томск: Изд-во ТГАСУ, 2008. 154 с.
2. Синтез фильтрокомпенсирующих устройств для систем электроснабжения: монография / Н.П. Боярская, В.П. Довгун, Д.Э. Егоров и др.; под ред. В.П. Довгуна. Красноярск: Сиб. фед. ун-т, 2014. 192 с.
3. W. Xu. Status and Future Directions of Power System Harmonic Analysis, in Proceedings of the IEEE PES General Meeting, Denver, Colorado, vol. 1, June 6-10, 2007, pp. 56-63.
4. P. Salmeron and J.R. Vazquez, Practical design of a three phase active power line conditioner controlled by artificial neural networks, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 20, iss. 2, April 2005, pp. 1037-1044.
5. Mark McGranaghan, Evaluating Harmonic Concerns With Distributed Loads, Elecnrotek Concepts, Knoxville, Tenn., Nov., 2010, pp. 72-74.
6. Victor A. Treating Harmonics in electrical distribution system // Ramos JR. Computer Power & Consulting, January, 1999, pp. 102-105.
7. Авербух М.А., Коржов Д.Н., Лимаров Д.С. Экспериментальная оценка уровня высших гармоник в схеме электроснабжения трубогибочного стана УЗТМ-465 // Промышленная энергетика. 2015. №1. С. 48-54.
8. ГОСТ Р 8.736–2011. Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения. М.: Стандартинформ, 2011. 23 с.

Поступила в редакцию 29 ноября 2016 г.

INFORMATION IN ENGLISH

EXPERIMENTAL STUDY OF NON-SINUSOIDAL OPERATING MODE OF WORKSHOP POWER SUPPLY SYSTEM IN DYNAMIC VIBRATING FORMATION OF CONCRETE MIXTURES

Mikhail A. Averbukh

D.Sc. (Engineering), Associate Professor, Professor of the Department of Electrical Power Engineering and Automation, Belgorod State Technological University named after Shukhov, Belgorod, Russia. E-mail: avers45@rambler.ru

Dmitry A. Prasol

Post-graduate student, the Department of Electrical Power Engineering and Automation, Belgorod State Technological University named after Shukhov, Belgorod, Russia. E-mail: dapras@mail.ru

Stanislav V. Khvorostenko

Post-graduate student, the Department of Electrical Power Engineering and Automation, Belgorod State Technological University named after Shukhov, Belgorod, Russia. E-mail: staskhvorostenko@mail.ru

The article presents the results of experimental studies of operating modes of a workshop supply systems containing power-consuming equipment with non-linear current-voltage characteristics. In the production of concrete units using a conveyor system, we use modern frequency electric drive based on asynchronous motors with squirrel-cage rotor. Along with the optimization of technological process of concrete unit manufacturing, the actuator is a source of higher harmonics of current and voltage in the electrical system of the plant. The experiments were conducted using certified devices Chauvin Arnoux 8335 and Energomonitor-3.3T1 (certification is confirmed, the certificate of calibration devices №008013, №008014, certified on 28.04.2016). The measurements were performed continuously for three days with registration of data every minute. Connection was implemented to the three-phase four-wire network in accordance with the program of experimental studies approved by the main specialists of the enterprise. The results are presented in the form of tables, graphs and histograms of measurements. The authenticity is confirmed except the systematic and random errors in the measurements according to the standard requirements. Experiments confirm the presence of higher harmonics of current and voltage in the power system of the workshop. This total harmonic components of

voltage reaches a critical value and, depending on the operating conditions of the conveyor reaches more than 8.5%, which indicates the need for the application of technical means for their compensation. To solve this problem, it was proposed to use active filters or hybrid control systems taking into account the cyclical nature of the process

Keywords: Concrete products, compaction of concrete mix, vibration platform, high harmonics currents and voltages, power system plant, frequency electric drive, power quality analyzers, total harmonic components of currents and voltages.

REFERENCES

1. Romanyuk T.F., Petrov G.G. *Tekhnologiya proizvodstva stroitelnykh materialov* [Production technology of building materials. Study guide]. Tomsk, Publishing center of TGASU Publ., 2008. 154 p. (in Russian)
2. Boyarsky N.P., Dovgun V.P., Egorov D.E. et al. *Sintez filtrokompensiruyuschikh ustroystv dlya system elektrosnabzheniya* [Synthesis of filter-devices for power supply systems]. Krasnoyarsk, CFU Publ., 2014. 192 p. (in Russian).
3. W. Xu. Status and Future Directions of Power System Harmonic Analysis, in Proceedings of the IEEE PES General

- Meeting, Denver, Colorado, vol. 1, June 6-10, 2007, pp. 56-63.
4. P. Salmeron and J.R. Vazquez, Practical design of a three phase active power line conditioner controlled by artificial neural networks, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 20, iss. 2, April 2005, pp. 1037-1044.
 5. Mark McGranaghan, Evaluating Harmonic Concerns With Distributed Loads, Elecnrotek Concepts, Knoxville, Tenn., Nov., 2010, pp. 72-74.
 6. Victor A. Treating Harmonics in electrical distribution system // Ramos JR. Computer Power & Consulting, January, 1999, pp. 102-105.
 7. Averbukh M.A., Corzhov D.N., Limarev D.S. Experimental assessment of the level of higher harmonics in power supply scheme pipe bending mill UZTM-465, *Promishlennaya energetika* [Industrial energy], 2015, no.1, pp. 48-54. (in Russian).
 8. GOST R 8.736–2011. State system for ensuring the uniformity of measurements. The direct measurement repeated. Methods of processing of measurement results. The main provisions. Moscow, Standartinform Publ., 2011. 23 p. (in Russian).
-
- Авербух М.А., Прасол Д.А., Хворостенко С.В. Экспериментальное исследование несинусоидальных режимов цеховой системы электроснабжения при динамическом вибрационном формировании бетонных смесей // *Электротехнические системы и комплексы*. 2017. №1(34). С.24-30. doi: 10.18503/2311-8318-2017-1(34)-24-30
- Averbukh M.A., Prasol D.A., Khvorostenko S.V. Experimental Study of Non-sinusoidal Operating Mode of Workshop Power Supply System in Dynamic Vibrating Formation of Concrete Mixtures. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2017, no.1(34), pp.24-30. (In Russian) doi: 10.18503/2311-8318-2017-1(34)-24-30

Паздерин А.А., Паздерин А.В.

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССА ПЕРЕДАЧИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НАПРАВЛЕННЫМИ ПОТОКАМИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ И СТОИМОСТИ В СХЕМЕ СЕТИ

В статье рассматривается графовый подход, позволяющий представить процесс передачи электроэнергии (ЭЭ) в виде направленных потоков ЭЭ и потоков стоимости в схеме электрической сети. Основная идея связана с распределением стоимости услуг на передачу ЭЭ между узлами отпуска ЭЭ из электрической сети с учетом загрузки электрооборудования, задействованного в электроснабжении каждого узла. Суть методики можно описать двухэтапной процедурой. На первом этапе суммарная стоимость услуг на передачу ЭЭ распределяется между узлами (подстанциями) и ветвями (линии электропередачи) схемы электрической сети пропорционально вкладу каждого элемента в суммарные затраты сетевого предприятия на передачу ЭЭ. На втором этапе, используя результаты расчетов по математической модели энергораспределения, связывающей потоки ЭЭ в узлах и ветвях электрической сети, стоимости услуг на передачу ЭЭ из узлов и ветвей транслируются (разносятся) до узлов потребления пропорционально потокам ЭЭ, протекающим через каждый элемент схемы сети. В результате получается распределение стоимостей на передачу между всеми узлами и ветвями схемы сети, включая узлы потребления ЭЭ, то есть определяются потоки стоимости. Методика позволяет оценить индивидуальную стоимость передачи ЭЭ до каждого узла потребления и индивидуальные тарифы на передачу электроэнергии.

Ключевые слова: транспорт электроэнергии, стоимость услуг на передачу электроэнергии, модель энергораспределения, потоки электроэнергии, потоки стоимости, тарифы на передачу.

ВВЕДЕНИЕ

Обзор зарубежной практики показывает, что в разных странах существует большое разнообразие в принципах и схемах формирования тарифов на передачу электроэнергии (ТПЭ), которые зависят от правил функционирования оптового и розничного рынков электроэнергии и мощности [1,2]. Так, из 35 стран европейского союза:

- в 21 стране услуги на транспорт ЭЭ оплачивают только потребители, а в 14 странах – и потребители ЭЭ, и производители (генераторы);
- в 19 странах ТПЭ зависят от расположения (удаленности) потребителя;
- в 12 странах ТПЭ дифференцируются во времени и различаются для разных часов суток или сезонов года;
- в 10 странах ТПЭ не содержат составляющей, связанной с компенсацией потерь;
- в 23 странах ТПЭ зависят от числа часов использования максимума нагрузки;
- в 25 странах ТПЭ содержит составляющую, аналогичную рынку системных услуг.

Большое разнообразие связано с учетом измеряемых показателей, которые влияют на значение ТПЭ [3]. Например в Италии ТПЭ определяется только в зависимости от объемов переданной ЭЭ, а в Голландии – только от мощности. Во многих странах ТПЭ зависят от показателей надежности. Кроме того, во многих странах в ТПЭ включены составляющие, которые не связаны с прямыми затратами ЭСП. Так, за счет ТПЭ может поддерживаться развитие возобновляемых источников энергии и внедрение технологий энергосбережения. Зачастую за счет ТПЭ датируются тарифы на ЭЭ для сельскохозяйственных потребителей, а также другие социально-значимые проекты.

Стоимость услуг на передачу ЭЭ для электросете-

вого предприятия (ЭСП) обычно определяется двумя составляющими – суммарными затратами на содержание электрических сетей C_{Σ}^C , а также платой за потери ЭЭ C_{Σ}^A . Эти составляющие ежегодно утверждаются регулирующими органами в области формирования ТПЭ на основе нормативных документов. ТПЭ для потребителей формируются на основе котловой модели, уравнивающей тарифы для всех потребителей одного номинального напряжения на территории каждого субъекта Российской Федерации [4,5]. Данные по тарифам и другим экономическим показателям для каждого ЭСП являются открытой публичной информацией, и они формируют необходимую валовую выручку предприятия C_{Σ} на каждый год [6,7].

ГРАФОВАЯ МОДЕЛЬ ОПИСАНИЯ ПРОЦЕССА ПЕРЕДАЧИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

Рассматриваемая в статье модель дает возможность оценить индивидуальную стоимость услуг на передачу ЭЭ для каждого потребителя и смежного ЭСП, что позволяет оценить экономическую эффективность электросетевого бизнеса на различных участках сети и в различных режимах ее работы. На начальном этапе вся необходимая валовая выручка ЭСП C_{Σ} распределяется между N узлами и M ветвями схемы электрической сети пропорционально затратам на передачу ЭЭ соответствующих элементов схемы [8,9]. Ветви схемы сети ассоциируются с линиями электропередачи, а узлы схемы с подстанциями. Данные доли C_{Σ} далее называются «элементные стоимости» услуг на передачу εC_i . При делении C_{Σ} между εC_i затраты на потери C_{Σ}^A распределяются между отдельными элементами сети пропорционально техническим потерям на каждом элементе. Затраты на содержание электросетевого оборудования C_{Σ}^C делятся между элементами сети пропорционально условным единицам оборудования. Сумма всех элементных стоимостей в узлах и ветвях схемы равна суммарной необходимой валовой выручке ЭСП

$$C_{\Sigma} = C_{\Sigma}^c + C_{\Sigma}^{\Delta} = \sum_{i=1}^{N+M} \varepsilon C_i. \quad (1)$$

Далее производится распределение элементарных стоимостей εC_i по графу электрической сети до узлов отдачи (потребления) в соответствии с направлениями фактических потоков ЭЭ и пропорционально этим потокам, то есть с учетом загрузки электрооборудования. Предполагается, что потоки ЭЭ для всех узлов и всех ветвей схемы электрической сети рассчитаны с учетом потерь на основе модели энергораспределения и являются сбалансированными [10,11]. Потоки и потери ЭЭ в схеме сети рассчитываются для анализируемого интервала времени, в качестве которого может приниматься год или месяц. Если анализируемый временной интервал относится к прошедшим отрезкам времени, то расчетная модель энергораспределения основывается на измерениях от счетчиков ЭЭ. Если анализируемый временной интервал относится к будущему, то для расчета энергораспределения используются прогнозные расходы электроэнергии [12,13].

По мере перемещения по графу электрической сети элементарные стоимости предшествующих элементов схемы прибавляются к элементарным стоимостям текущих элементов и получаются новые значения стоимостей, которые называются «потоковые стоимости» от услуг на передачу $\vec{C}_i$.

Если проводить аналогию с транспортировкой грузов, то полная стоимость транспортировки определяется стоимостью на всех участках пути от места погрузки до места отгрузки. Чем дальше транспортируется груз, тем выше стоимость транспорта каждой условной единицы (тонны). В отношении процесса передачи ЭЭ по электрическим сетям роль груза выполняют киловатт-часы, места погрузки – это узлы поступления ЭЭ в сеть рассматриваемого ЭСП или узлы генерации, а места отгрузки – узлы отпуска ЭЭ из сети или узлы потребления. Таким образом, в процессе транспорта ЭЭ на каждом элементе в схеме электрической сети происходит увеличение удельной стоимости передачи каждого киловатт-часа переданной электроэнергии. Процесс распределения потоковых стоимостей заканчивается, когда на всех элементах сети произошло перемещение потоковых стоимостей до конечных узлов отпуска ЭЭ из рассматриваемой сети, и дальнейшие пути перемещения стоимостных потоков в схеме сети отсутствуют.

Важно отметить, что при завершении процедуры распределения потоков стоимости суммарная стоимость услуг на передачу C_{Σ} (необходимая валовая выручка) в точности равна сумме узловых потоковых стоимостей $\vec{C}_i^{\text{отп}}$ по всем K узлам отпуска ЭЭ из сети

$$C_{\Sigma} = \sum_{i=1}^{N+M} \varepsilon C_i = \sum_{j=1}^K C_j^{\text{отп}}. \quad (2)$$

Часть электроэнергии, отпускаемой из сети, приходится на сети смежных ЭСП, а часть ЭЭ является полезным отпуском. Узловая потоковая стоимость в пограничном узле, разделяющем сети смежных ЭСП, в действующей терминологии имеет название «индивидуальная стоимость услуг на передачу» между ЭСП.

Описываемая модель позволяет наглядно представить процесс передачи ЭЭ в виде двух направленных на графе электрической сети потоков: потоков электроэнергии и потоков стоимости. В рамках рассматриваемой модели процесс распределения потоков ЭЭ и потоков стоимости должен осуществляться на единой схеме электрической сети. Процесс распределения стоимости услуг на передачу ЭЭ в графическом виде представляется как последовательный перенос элементарных стоимостей передачи ЭЭ в соответствии с траекториями передачи ЭЭ на графе электрической сети. В результате такого переноса определяются потоковые стоимости для каждого узла $\vec{C}_i$ и для каждой ветви $\vec{C}_{ij}$ схемы сети. При этом определяется стоимость передачи ЭЭ до каждого нагрузочного узла электрической сети в соответствии с участием и загрузкой используемого электрооборудования. Описываемый процесс можно представить в виде стоимостных (рублевых) потоков, которые будут совпадать по направлениям с потоками ЭЭ, однако значения стоимостных потоков определяются не значениями потоков ЭЭ, а значениями элементарных стоимостей εC_i . Последнее означает, что значения потоков ЭЭ и значения потоков стоимости в соответствующих точках электрической сети не являются пропорциональными. Каждый узел и каждая ветвь является источником (генератором) элементарной стоимости. Далее эта стоимость перетекает в последующие элементы сети в соответствии с фактическими направлениями потоков ЭЭ и формирует потоки стоимости. Потоки стоимости имеют направления, которые совпадают с направлениями потоков ЭЭ.

Наиболее интересным моментом в рассматриваемой задаче является распределение узловой стоимости услуг на передачу $\vec{C}_i$ между ветвями (линиями электропередачи), по которым ЭЭ отдается из узла i . Логично допустить, что из узла i , его потоковая узловая стоимость $\vec{C}_i$ переходит в смежные ветви пропорционально вытекающим из рассматриваемого узла потокам ЭЭ по отношению к суммарной отдаче ЭЭ данного узла $W_i^{\text{отд}}$. При этом для определения потоковой стоимости $\vec{C}_{ij}$ любой ветви, смежной узлу i может использоваться следующее выражение:

$$\vec{C}_{ij} = \frac{W_{ij}}{\sum_{j \in \beta_i} W_{ij}} \cdot \vec{C}_i = \frac{W_{ij}}{W_i^{\text{отд}}} \cdot \vec{C}_i, \quad (3)$$

где β_i – список присоединений (ветвей) по которым ЭЭ вытекает (отдается) из узла i . В энергетическом балансе узла должна обязательно учитываться собственная узловая инъекция ЭЭ W_{io} . Сумма входящих в узел потоков ЭЭ (прием ЭЭ в узел) может превышать сумму выходящих потоков ЭЭ (отпуск ЭЭ из узла) на величину потерь в данном узле. При использовании выражения (3) возможны следующие ситуации:

1. Узел i является генераторным (узловая инъекция ЭЭ W_{io} втекает в узел), тогда вся его потоковая узловая стоимость $\vec{C}_i$ переходит в ветви, по которым ЭЭ вытекает из рассматриваемого узла;
2. Узел i является транзитным (нулевая узловая

инъекция W_{io}), тогда вся его узловая потоковая стоимость $\vec{C}_i$ переходит в ветви, по которым ЭЭ вытекает из рассматриваемого узла;

3. Узел i является нагрузочным, но из данного узла часть ЭЭ вытекает по одной или нескольким ветвям (нагрузочный узел с транзитом ЭЭ). Тогда искомая узловая потоковая стоимость $\vec{C}_i^{\text{опт}}$ определяется пропорционально нагрузочному потоку относительно суммарного отпуска узла. Оставшаяся часть узловой стоимости $\vec{C}_i$ переходит в ветви вытекания ЭЭ.

4. Узел i является конечным узлом отдачи ЭЭ (типичный нагрузочный узел), и он принимает ЭЭ по всем смежным ветвям, то есть у данного узла нет ветвей отдачи ЭЭ. В этой ситуации вся его узловая потоковая стоимость $\vec{C}_i$ переходит в искомую стоимость отпуска $\vec{C}_i^{\text{опт}}$.

Описываемый подход целесообразно проиллюстрировать простейшим гипотетическим примером. На **рисунке, а** представлена электрическая сеть с нанесенными на нее потоками ЭЭ. Узел номер 1 является питающим, а через три оставшихся узла (подстанции) осуществляется отпуск электроэнергии потребителям. Физические направления потоков ЭЭ на **рисунке, а** отмечены стрелками. Суммарные потери ЭЭ в трех линиях электропередачи составляют 60 кВт·ч, таким образом, уровень суммарных потерь по отношению к поступающей в сеть ЭЭ – 6 %. На **рисунке, б** отмечены фигурными стрелками значения элементарных стоимостей услуг на передачу εC_i , и они расположены выше изображения схемы электрической сети. Узловые элементарные стоимости (затраты на подстанции) составляют 200, 250, 200, и 180 руб., а элементарные стоимости трех ветвей (линий электропередачи) – 220, 200 и 180 руб. соответственно.

Ниже схемы электрической сети на **рисунке, б** простыми стрелками обозначены направления и значения потоковых стоимостей для каждого элемента схемы сети. Потоковые стоимости получены в соответствии с описанным выше алгоритмом. Так, элементарная узловая стоимость первого узла $\varepsilon C_1=200$ руб. полностью переходит в единственную ветвь 1-2, выходящую из узла 1, и получается первая потоковая стоимость $\vec{C}_{1-2}=200$ руб. Далее в середине ветви 1-2 к ней добавляется элементарная стоимость ветви 1-2 в 220 руб., таким образом, в конце ветви 1-2 потоковая стоимость составит $\vec{C}_{1-2}=420$ руб. Далее она суммируется с элементарной стоимостью второго узла, которая равна $\varepsilon C_2=250$ руб. Таким образом, потоковая стоимость второго узла составит $\vec{C}_2=670$ руб. Данная потоковая стоимость распределяется между двумя потоками ЭЭ, выходящим из узла 2, на основе выражения (3) пропорционально вытекающим потокам ЭЭ относительно суммарной отдачи узла 970 кВт·ч. Так, 580 кВт·ч отдается по ветви 2-3 и 390 кВт·ч – в качестве полезного отпуска ЭЭ потребителям второго узла. Значения потоковых стоимостей, соответствующих вытекающим из узла 2 потокам ЭЭ, будут определяться в соответствии с выражением (3), и они равны соответственно $\vec{C}_{2-3}=400,62$ руб., а $\vec{C}_2=269,38$ руб. Таким образом, сумма выходящих из узла 2 потоковых стоимостей равна потоковой стоимости узла 2, то есть 670 руб.

Дальнейшее распределение потоковых стоимостей производится аналогично и представлено на **рисунке, б**.

Следует отметить, что суммарная стоимость услуг на передачу для рассматриваемого примера равна сумме всех элементарных стоимостей (в узлах и ветвях), и эта стоимость равна 1430 руб., что соответствует выражению (1). На **рисунке, б** это сумма исходных элементарных стоимостей для четырех узлов и трех ветвей, обозначенных фигурными стрелками. Данная стоимость в точности распределена между тремя узлами под номерами 2, 3, 4, через которые осуществляется отпуск ЭЭ из сети, что соответствует уравнению (2): $1430=269,38+428,9+731,72$ руб.

Таким образом, представленный пример наглядно показывает, как суммарная стоимость услуг на передачу ЭЭ 1430 руб. распределяется между узлами отпуска ЭЭ из сети. Представленные на **рисунке, б** значения узловых потоковых стоимостей $\vec{C}_i^{\text{опт}}$ можно считать стоимостями передачи ЭЭ до соответствующих узлов отпуска ЭЭ из сети (узлов нагрузки).

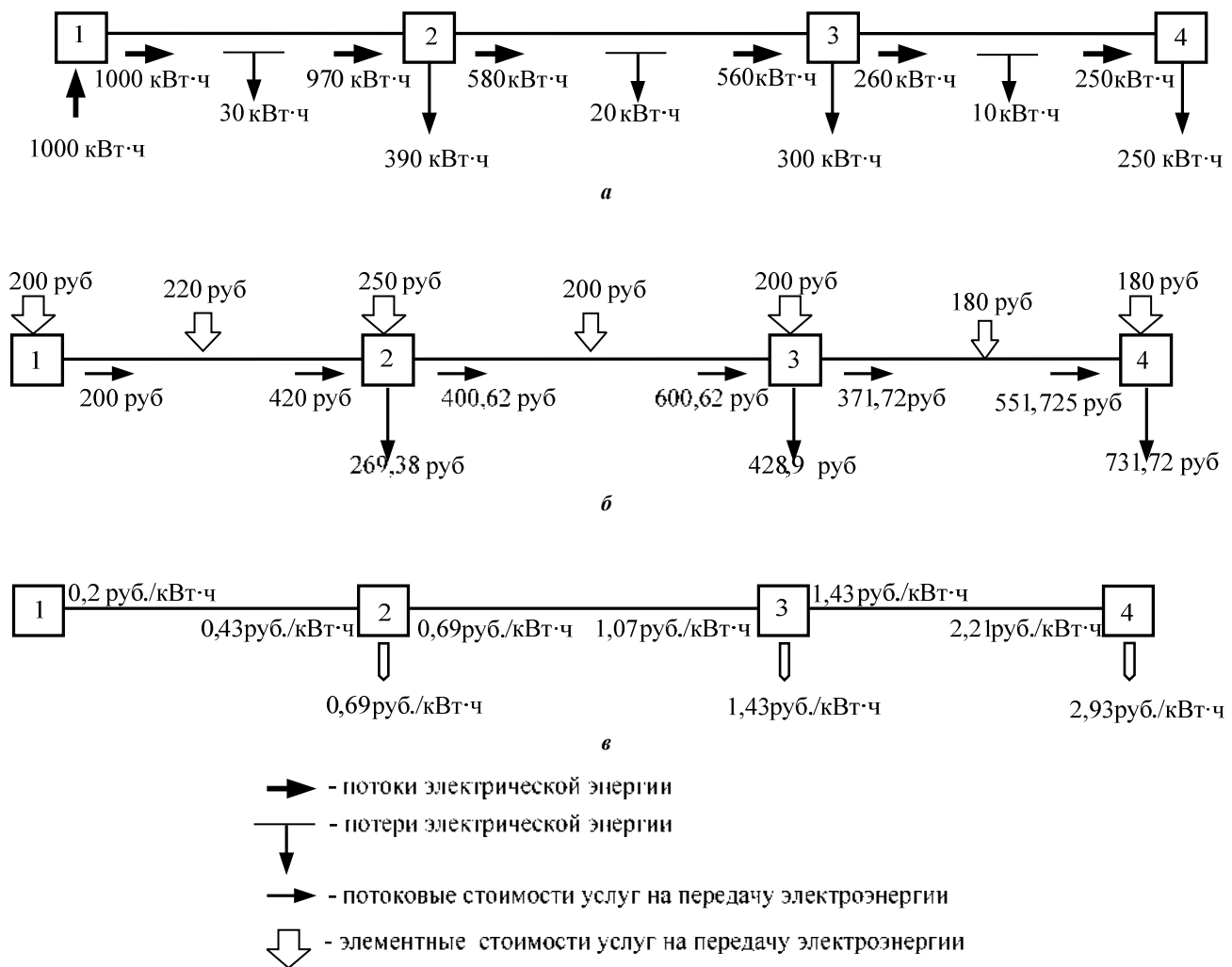
На **рисунке, в** представлены значения тарифов на передачу ЭЭ для всех участков сети, полученные путем деления значения потоковой стоимости на значение потока ЭЭ для соответствующей точки электрической сети ε :

$$\vec{T}_\varepsilon = \vec{C}_\varepsilon / W_\varepsilon . \quad (4)$$

Данному тарифу целесообразно поставить в соответствие термин «точечный тариф на передачу ЭЭ», так как для каждой точки электрической сети значения точечных тарифов на передачу ЭЭ будут различаться. Кроме того, значения точечных тарифов будут различны в начале и конце каждого узла и каждой ветви.

Как следует из **рисунка, в**, по мере перемещения по схеме электрической сети в направлении фактических потоков ЭЭ происходит последовательное увеличение точечных тарифов на передачу ЭЭ. Данное утверждение легко доказывается тем, что на каждом элементе электрической сети, то есть для ветви и для узла, происходит увеличение значения точечного тарифа на передачу ЭЭ. Данное увеличение обусловлено тем, что к потоковой стоимости в начале каждого элемента $\vec{C}_i^{\text{нач}}$ добавляется элементарная стоимость данного элемента εC_i и потоковая стоимость в конце элемента $\vec{C}_i^{\text{кон}}$ больше, чем в начале. Кроме того, суммарный поток ЭЭ на выходе из элемента не больше (равен или меньше), чем на входе в элемент из-за наличия потерь ЭЭ.

Таким образом, суммарный стоимостной поток на выходе каждого элемента больше, чем на входе, а поток ЭЭ, наоборот, меньше или равен. Это неизбежно приводит к тому, что точечный тариф в конце элемента больше, чем в начале. Следовательно, по мере движения по элементам схемы сети в направлении фактических потоков ЭЭ точечные тарифы увеличиваются. Последнее утверждение справедливо для радиальных схем с одним источником питания. В сложносвязных и кольцевых схемах данное утверждение не всегда выполняется, так как в узел по ветвям могут попадать потоки ЭЭ с существенно различными точечными тарифами. В узле происходит перемешивание потоков



Распределение для простейшей схемы электрической сети:
а – потоков и потерь электрической энергии (кВт·ч);
б – элементных стоимостей и потоковых стоимостей услуг на передачу (руб.);
в – точечных тарифов на передачу ЭЭ (руб./кВт·ч)

ЭЭ и потоков стоимости, и точечные тарифы по ветвям отдачи ЭЭ будут определяться суммарными значениями потоков ЭЭ и потоков стоимости.

Таким образом, рассматриваемая потоковая модель передачи ЭЭ и стоимости позволяет связать технические и экономические параметры процесса транспорта ЭЭ. Если проводить сопоставление между технической и экономической частью модели, то можно отметить схожесть и различие между потоками ЭЭ и потоками стоимости:

– направления потоков ЭЭ и потоков стоимости совпадают, и они двигаются от питающих узлов к узлам нагрузки;

– при движении по указанным направлениям численные значения потоков ЭЭ на каждом элементе сети уменьшаются ввиду наличия потерь ЭЭ, а численные значения стоимостных потоков увеличиваются, ввиду добавления элементных стоимостей на каждом участке сети;

– при движении по указанным направлениям значение напряжения в каждой точке сети обычно уменьшается, а значение тарифа – увеличивается.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная технико-экономическая модель передачи ЭЭ может использоваться, прежде всего, электросетевыми предприятиями для получения точечных тарифов на передачу ЭЭ для различных потребителей и оценки экономической эффективности электросетевого бизнеса на различных участках сети и в различных режимах работы. Для органов регулирования эта модель интересна с позиций разработки удельных нормативов для формирования тарифов на передачу ЭЭ для сетевых организаций, имеющих технологические и режимные отличия. Предложенная модель позволяет обосновать стоимость транзитных перетоков и индивидуальных тарифов при энергообмене между смежными сетевыми предприятиями. Кроме того, она может использоваться для обоснования надбавок и скидок к тарифу на передачу электроэнергии при оптимизации потребителями режима своего электропотребления [14].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Reneses J., Ortega M.P.R. Distribution pricing: theoretical principles and practical approaches. IET Generation, Transmission & Distribution, 2014, vol. 8, no.10, p. 1645-1655.
2. Shirmohammadi D., Filho X.V., Gorenstin B., Pereira M.V.P. Some Fundamental Technical Concepts about cost based transmission pricing. IEEE Transactions on Power Systems, 1996, vol. 11, no.2, p. 1002-1008.
3. Silva da A.M.L., Costa J.G. de C., Lima L.H.L. A new methodology for cost allocation of transmission systems in interconnected energy markets. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, vol. 28, no. 2, p. 2013.
4. О функционировании розничных рынков электрической энергии, полном и (или) частичном ограничении режима потребления электрической энергии: постановление Правительства РФ от 04.05.2012 N 442 (ред. от 04.09.2015). М., 2012.
5. Бабушкин Г.А., Ильин Р.А. Анализ котлового принципа построения тарифов на современном рынке электроэнергии // Путь науки. 2016. № 1(23). С. 8-10.
6. Коршунова Л.А., Кузьмина Н.Г., Кузьмина Е.В. Формирование тарифов на передачу и распределение электрической энергии в России // Вестник Томского государственного университета. 2011. № 4 (16). С. 124-133.
7. Межрегиональная дифференциация тарифов на электрическую энергию в Российской Федерации / М Суюнчев., С. Репетюк, Б. Файн., О. Темная, О. Мозговая, Д. Агафонов // Экономическая политика. 2014. № 1. С. 90-104.
8. Демина О.В., Минакир П.А. Дифференциация цен на электроэнергию: роль пространства и институтов // Пространственная Экономика. 2016. № 1. С. 30-59.
9. Определение вклада потребителей предприятия в затраты на передачу электроэнергии / А.В. Малафеев, Е.Б. Ягольникова, М.И. Болтенкова, Т.В. Рылова // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. 2010. № 2. С. 95-97.
10. Использование методических подходов теории оценивания состояния для расчета и достоверизации потоков электрической энергии в сетях / А.В. Паздерин, А.О. Егоров, Е.С. Кочнева, В.О. Самойленко // Электричество. 2014. № 10. С. 12-21.
11. Pazderin A.V., Kokin S.E., Egorov A.O., Kochneva E.S. Solution of Energy Flow Problem using State Estimation Technique. IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference) 35th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IECON 2009. Сер. "Proceedings - IECON 2009, 35th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society", 2009, p. 1736-1741.
12. Паздерин А.В. Расчет технических потерь электроэнергии на основе решения задачи энергораспределения // Электрические станции. 2004. № 12. С. 44.
13. Решение комплексной задачи распределения электроэнергии в энергосистеме / П.И. Бартоломей, А.О. Егоров, Е.В. Машалов, А.В. Паздерин // Электричество. 2007. № 2. С. 8-13.
14. Паздерин А.А., Паздерин А.В. Совершенствование системы тарификации услуг на передачу электрической энергии // Научное обозрение. 2016. № 20. С. 207-213.

Поступила в редакцию 13 января 2017 г.

INFORMATION IN ENGLISH

REPRESENTATION OF THE ELECTRIC ENERGY DISTRIBUTION PROCESS IN AN ELECTRIC NETWORK BY DIRECTED ENERGY AND COST FLOWS

Andrey V. Pazderin

D.Sc. (Engineering), Professor, Head of the Automated electric systems department, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia.

Andrey A. Pazderin

part-time Ph.D. student of the of Automated electric systems department, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Head of technological connection department, PJSC Federal Grid Company of Unified Energy System" – Urals branch, Yekaterinburg, Russia.

The paper describes graph-based approach of electric energy distribution by means of directed energy flows and cost flows in an electric network. The basic idea is connected to allocation of electric utilities' energy transport costs between output nodes of an electric network. The methodology proposed can be described as a two-stage procedure. At first, total costs are allocated between nodes (substations) and branches (power lines) proportionally to the contribution to the total electric utilities' energy transport costs of each element of the network. The results are obtained via energy flow model, which interconnects energy flows in nodes and branches. At the second stage, energy distribution costs are divided proportionally to the energy flows at each element of the network in order to quantify distribution costs for each consumer. As a result, it is possible to allocate distribution costs between nodes and branches, including electricity consumption nodes, to calculate energy-cost flows. Using the approach proposed, individual costs of electric energy transport to each particular consumption node can be easily assessed. As a result, individual distribution tariffs can be estimated.

Keywords: Electric energy distribution, energy flow model, energy flows, cost flows, distribution tariff.

REFERENCES

1. Reneses J., Ortega M.P.R. Distribution pricing: theoretical principles and practical approaches. IET Generation, Transmission & Distribution, 2014, vol. 8, no.10, p. 1645-1655.
2. Shirmohammadi D., Filho X.V., Gorenstin B., Pereira M.V.P. Some Fundamental Technical Concepts about cost based transmission pricing. IEEE Transactions on Power Systems, 1996, vol. 11, no.2, p. 1002-1008.
3. Silva da A.M.L., Costa J.G. de C., Lima L.H.L. A new methodology for cost allocation of transmission systems in interconnected energy markets. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, vol. 28, no. 2, p. 2013.
4. Russian Federation Government Resolution dated 04.05.2012 N 442 (ed. From 04.09.2015). About the function of retail electricity markets, the full and (or) partial restriction mode electric power consumption.
5. Babushkin G.A., Ilin R.A. Analysis of the principle of construction of the boiler tariffs at present electricity market.

- Put` nauki* [The way of science], 2016, no. 1(23), pp. 8-10. (In Russian)
6. Korshunova L.A., Kuzmina N.G., Kuzmina E.V. Tariff model for transmission and distribution of electric energy in the Russian Federation. *Vestnik tomskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of the Tomsk State University, 2011, no. 4 (16), pp. 124-133. (In Russian)
 7. Suiunchev M., Repetiuk S., Fain B., Temnaia O., Mozgovaia O., Agafonov D. Inter-regional differentiation of tariffs for electric energy in the Russian Federation. *Ekonomicheskaya politika* [Economic policy], 2014, no. 1, pp. 90-104. (In Russian)
 8. Demina O.V., Minakir P.A. Differentiation of electricity prices: the role of space and institutions. *Prostranstvennaya Ekonomika* [Spatial Economics], 2016, no. 1, pp. 30-59. (In Russian)
 9. Malafeev A.V., Iagolnikova E.B., Boltenkova M.I., Rylova T.V. Calculation of the enterprise consumer's contribution to the cost of electricity transmission. *Aktualnye problemy sovremennoi nauki, tekhniki i obrazovaniia* [Current problems of modern science, technology and education], 2010, no. 2, pp. 95-97. (In Russian)
 10. Pazderin A.V., Egorov A.O., Kochneva E.S., Samoilenko V.O. Application of methodological approaches of the state estimation theory for calculation and verification of power flows. *Elektrichestvo* [Electricity], 2014, no. 10, pp. 12-21. (In Russian)
 11. Pazderin A.V., Kokin S.E., Egorov A.O., Kochneva E.S. Solution of Energy Flow Problem using State Estimation Technique. IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference) 35th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IECON 2009. Ser. "Proceedings - IECON 2009, 35th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society", 2009, p. 1736-1741.
 12. Pazderin A.V. Calculation of technical electricity losses by solving the energy flow problem. *Elektricheskie stantsii* [Electrical stations], 2004, no. 12, pp. 44. (In Russian)
 13. Bartolomei P.I., Egorov A.O., Mashalov E.V., Pazderin A.V. Solution of complex energy flow problem in an electrical network. *Elektrichestvo* [Electricity], 2007, no. 2, pp. 8-13. (In Russian)
 14. Pazderin A.A., Pazderin A.V. Improving of the tariff model for electric power transmission. *Nauchnoe obozrenie* [Scientific Review], 2016, no. 20, pp. 207-213. (In Russian)

Паздерин А.А., Паздерин А.В. Представление процесса передачи электроэнергии направленными потоками электроэнергии и стоимости в схеме сети // Электротехнические системы и комплексы. 2017. №1(34). С. 31-36. doi: 10.18503/2311-8318-2017-1(34)-31-36

Pazderin A.A., Pazderin A.V. Representation of the Electric Energy Distribution Process in an Electric Network by Directed Energy and Cost Flows. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2017, no.1(34), pp. 31-36. (In Russian) doi: 10.18503/2311-8318-2017-1(34)-31-36

ЭЛЕКТРО- И ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.515.1

DOI: 10.18503/2311-8318-2017-1(34)-37-43

Дёмин Ю.К., Хасанова Р.В., Нешпоренко Е.Г., Картавец С.В.

ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СХЕМЫ ПРОМЕЖУТОЧНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ СЖИМАЕМОГО ГАЗА
В СИСТЕМЕ СНАБЖЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИМИ ГАЗАМИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА**

Предложена усовершенствованная схема охлаждения сжимаемого газа между группами ступеней сжатия в крупных промышленных центробежных компрессорных установках, позволяющая экономить энергию на сжатие за счет доохлаждения газа до температуры, близкой к температуре окружающей среды в зимнее время, и генерировать электрическую энергию на отводимой теплоте сжатия в летнее время. Произведен расчет энергосберегающего эффекта от использования жидких продуктов разделения воздуха для охлаждения сжатых газов: воздуха, кислорода и азота. В зависимости от типа привода центробежных компрессоров выполнен термодинамический расчет затрат на сжатие технических газов для полного цикла металлургического производства стали, включая сжатие воздуха для разделения, доменного дутья, газообразных кислорода и азота. Оценена удельная экономия энергии в зависимости от охлаждения сжимаемого газа между группами ступеней сжатия в промышленных центробежных компрессорных установках и от впрыска жидких продуктов разделения воздуха в поток сжимаемого газа с учетом типа привода компрессоров на примере климатических условий месторасположения ОАО «ММК».

Ключевые слова: энергосбережение, энергоэффективная схема, центробежный компрессор, тип привода, работа сжатия, теплота, промежуточное охлаждение, органический цикл Ренкина.

ВВЕДЕНИЕ

Высокая энергоемкость металлургического предприятия обуславливает исключительную важность энергосбережения на всех стадиях производства конечного продукта. Средние удельные затраты на производство 1 т стали в странах с развитой промышленностью в последние два десятилетия были снижены на 25-30 %. В то же время показатели энерго- и материалоемкости производства металлопродукции в Российской Федерации существенно уступают зарубежным аналогам [1]. Так, в России металлургические предприятия потребляют около 14 % всего топлива и 12 % всего объема вырабатываемой электроэнергии в энергетическом балансе страны [2]. Например, ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» потребляет около 900 МВт электрической мощности, из которых 650 МВт обеспечивается собственными электростанциями (ТЭЦ – 330 МВт, ЦЭС – 205 МВт, ПВЭС – 100 МВт, ПСЦ – 15 МВт) [3].

Доля энергопотребления на производство сжатых газов на предприятиях черной металлургии – 5÷7 % от общего расхода энергии на производство основного продукта цеха, предприятия. Удельные расходы энергии на производство сжатого воздуха составляют от 80 до 140 кВт·ч/1000 м³ (в зависимости от типа компрессоров, условий охлаждения и эксплуатации) при электроприводе и 17÷20 кг у.т./1000 м³ при паротурбинном приводе компрессоров [3, 4].

Одним из существенных факторов, влияющих на перерасход энергии на компрессорных станциях, является недоохлаждение газа в промежуточных охладителях до температуры охлаждающего теплоносителя как в летнее, так и зимнее время, достигающее 20-40 °С, а так-же сброс теплоты сжатия в окружающую среду. В качестве промежуточного охладителя чаще всего ис-

пользуется вода. При этом возникают две взаимосвязанные технические проблемы: первая – недоохлаждение сжатого газа в зимнее время, ограниченное температурой применения воды 0 °С вследствие её замерзания; вторая – проблема использования отведенной низкопотенциальной теплоты сжатия.

Таким образом, можно выделить главную задачу энергосбережения, связанную с охлаждением газа в компрессорных установках, – снижение температуры сжимаемого газа при возможно меньших потерях на эксплуатацию системы охлаждения и использование отведенной теплоты с максимальной эффективностью.

МЕТОДИКА

Авторами данной работы была предложена комбинированная схема охлаждения с использованием теплоты сжатия в органическом цикле Ренкина [5], где сжатый воздух сначала поступает в трубчатый теплообменник и охлаждается фреоном, который кипит, превращаясь в перегретый пар. Полученный фреоновый пар подается во фреоновую турбину, где, расширяясь, приводит в действие электрогенератор. В качестве рабочего тела для органического цикла Ренкина был выбран наиболее широко применяемый в промышленности фреон R134a [6, 7].

Для доказательства практической значимости разработанной схемы была проведена оценка энергоэкономического эффекта от внедрения предлагаемой схемы на металлургическом предприятии полного цикла. В основу расчетов заложены данные теплотехнологии получения стального проката из железной руды тех переделов, в которых потребляется наибольшее количество сжатого воздуха и продуктов его разделения на примере ОАО «ММК».

В процесс производства стального листа входят:

1 этап. Выплавка чугуна в доменной печи.

В данном процессе, при давлении 1,4 МПа, используется 90 кг азота на тонну чугуна для продувки ко-

лошника доменной печи [8, 9]. Кроме того, в доменную печь вдувают около 2700 кг дутья/т чугуна при давлении 0,6 МПа [8, 10, 11]. Дутье представляет собой воздух, обогащенный кислородом, на что расходуется до 200 кг кислорода на тонну чугуна [12].

2 этап. Выплавка стали из чугуна в конвертере.

Для удаления углерода чугун продувают кислородом при давлении 1,5 МПа в количестве 80÷100 кг/т [13]. Также для создания защитной атмосферы используется около 25÷35 кг азота/т стали.

3 этап. Разливка и прокатка стали для получения готового листа.

Для получения 1 т листа необходимо выплавить 1,2 т стали. В свою очередь, для выплавки такого количества стали требуется 1 т чугуна и 220 кг лома. На 1 т чугуна расходуется 0,48 т кокса, а также 1,13 т агломерата и 0,61 т окатышей [14-16].

Азот и кислород для доменной печи и конвертера производятся в воздухоразделительных установках (ВРУ) типа АКАр 40/35, а затем сжимаются до 3 МПа в компрессорах типа АЭРОКОМ АА-259/31А и КТК-12,5 соответственно. Дутье для доменных печей и воздух для ВРУ сжимаются в компрессорах типа К-1500. Принципиальная схема описанной выше технологии, с учетом массовых поточных коэффициентов и типов компрессорных установок, приведена на **рис. 1**.

Таким образом, для производства 1 т стального листа необходимо сжать около 1375 кг воздуха, 2700 кг дутья, 295 кг кислорода и 120 кг азота. Теплота, отводимая системой промежуточного охлаждения компрессоров, сбрасывается в пруд-охладитель. В качестве механического привода для указанных компрессоров могут быть использованы паровая или газовая турбины, электродвигатель.

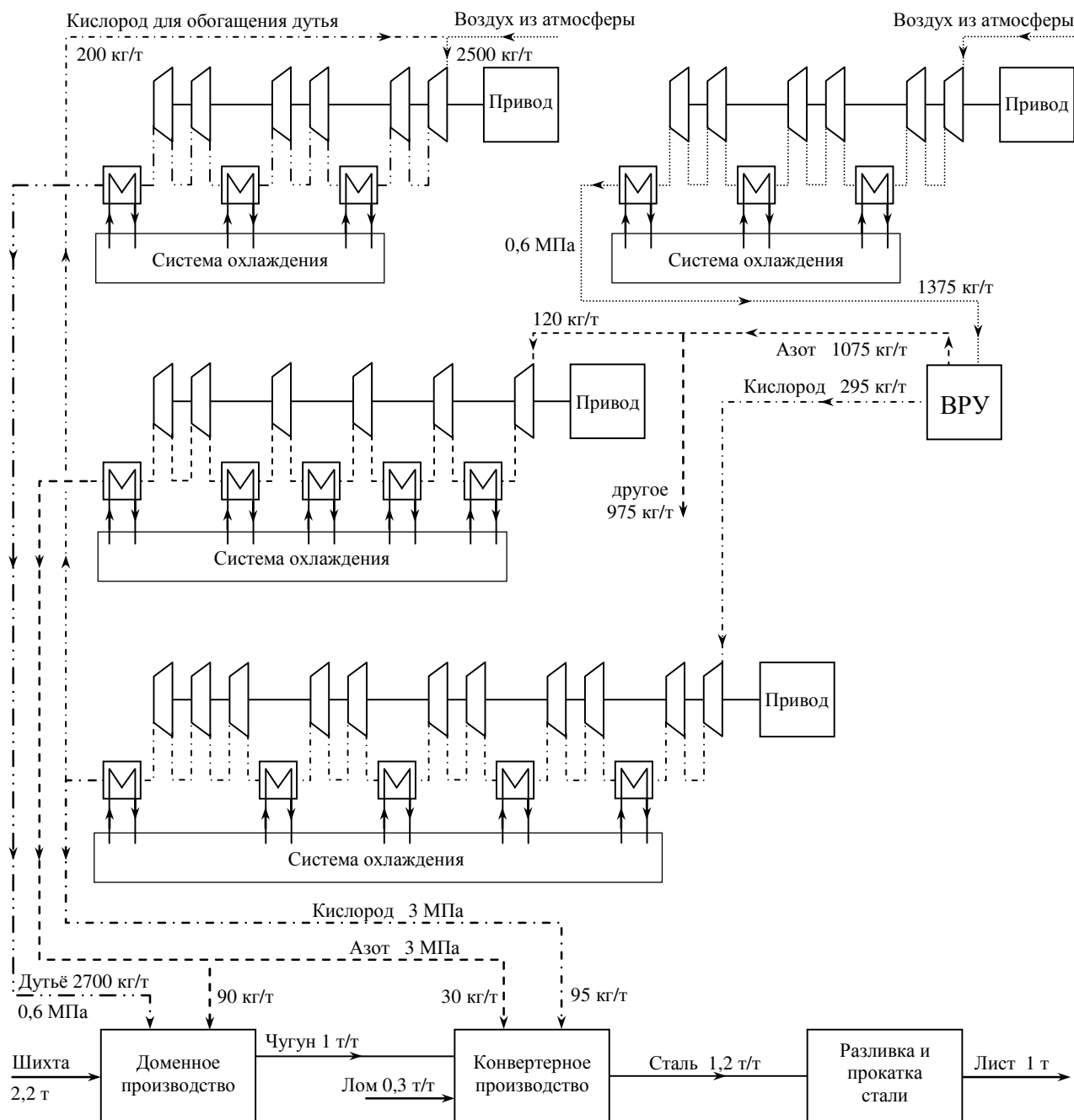


Рис. 1. Принципиальная схема снабжения предприятия черной металлургии сжатыми газами

Для оценки общих затрат были рассчитаны затраты на сжатие всего объема сжимаемых газов, с учетом типа используемого привода. При работе от паротурбинного привода были учтены КПД КУ (60 %) и КПД паротурбинной установки (40 %). При газотурбинном приводе также необходимо учесть КПД КУ и КПД газотурбины установки (35 %). В случае использования электропривода: для расчета количества потребляемых кВт·ч необходимо учесть КПД КУ и КПД электродвигателя (90 %), а при расчете затрат в килограммах условного топлива – добавить потери в сети (местные сети – 15 % и на линиях электропередач – 9 %) и КПД тепловой электрической станции (40 %).

Работа сжатия в ступени рассчитывается по следующей формуле:

$$L = G \cdot \frac{1}{\eta_{oi}} \cdot \frac{k}{k-1} \cdot R \cdot T_{нач} \cdot \left(\varepsilon^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right), \quad (1)$$

где G – масса сжимаемого газа, кг; $T_{нач}$ – температура на входе в ступень сжатия, К; η_{oi} – внутренний КПД компрессора; R – газовая постоянная, Дж/(кг·К); k – показатель адиабаты; ε – степень повышения давления в ступени компрессора.

В летнее время экономия достигается за счет генерации электрической энергии путём утилизации теплоты сжатия в органическом цикле Ренкина, рассчитываемой по следующим формулам [17]:

$$N_{ORC} = G \cdot (l_t - l_n), \quad (2)$$

где l_t – удельная работа, вырабатываемая турбиной, Дж/кг;

$$l_t = m_{\phi} \cdot \eta_{oi}^T \cdot (h_{вх}^T - h_{вых}^T), \quad (3)$$

где l_n – удельная работа, затрачиваемая на насос, Дж/кг:

$$l_n = \frac{m_{\phi} \cdot (h_{вых}^H - h_{вх}^H)}{\eta_{oi}^H}, \quad (4)$$

где η_{oi}^T – КПД турбины (был принят равным 0,8); η_{oi}^H – КПД насоса (был принят равным 0,7); $h_{вх}^T$ – удельная энтальпия перегретого пара фреона на входе в турбину, Дж/кг; $h_{вых}^T$ – удельная энтальпия сухого насыщенного пара фреона на выходе из турбины, Дж/кг; $h_{вх}^H$ – удельная энтальпия конденсата фреона на входе в насос, Дж/кг; $h_{вых}^H$ – удельная энтальпия конденсата фреона на выходе из насоса, Дж/кг; m_{ϕ} – удельный расход фреона на 1 кг охлаждаемого газа, кг/кг.

Расчеты велись по формулам (1)-(4) для условий географического месторасположения ОАО «ММК» с учетом многоступенчатости реальных компрессоров. Экономия энергии на привод компрессора от усовершенствования системы охлаждения рассчитывается отдельно для зимнего и летнего времени. В зимнее время экономия достигается за счет доохлаждения газа ниже температуры охлаждающей воды [18]. Результаты расчетов представлены на **рис. 2** и **3**.

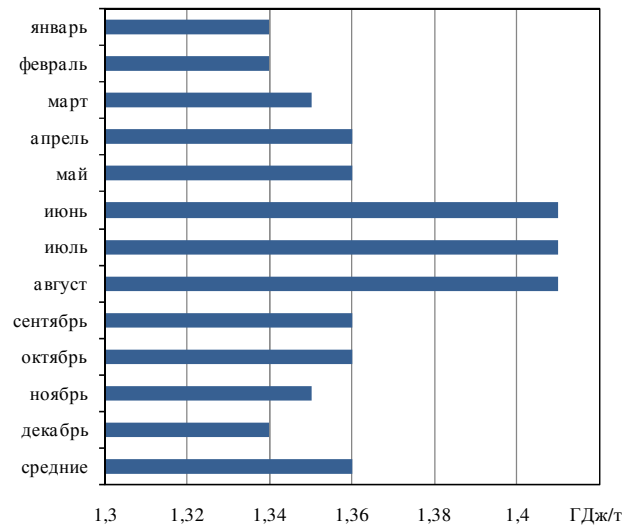


Рис. 2. Затраты энергии на сжатие газов в компрессорах, приведённые к ГДж на тонну стального листа по месяцам

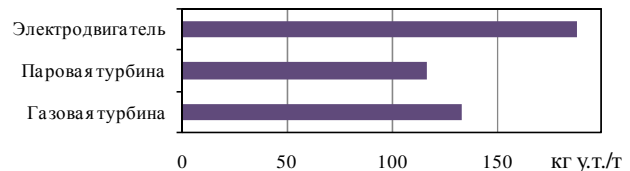


Рис. 3. Средние затраты энергии на сжатие газов в компрессорах, кг у.т. на тонну стального листа в зависимости от типа привода

Зная расход ресурсов (1375 кг воздуха, 2700 кг дутья, 295 кг кислорода и 120 кг азота) для производства 1 т стального листа и рассчитывая энергию, затраченную на сжатие газов, можно наглядно увидеть структуру этих затрат (**рис. 4**).

Таким образом, в структуре затрат преобладают затраты при производстве дутья для доменного производства и затраты на сжатие воздуха перед ВРУ.

Следует обратить внимание на еще один резерв энергосбережения при сжатии продуктов разделения воздуха. Как известно, минимизация величины недоохлаждения сжимаемого газа до температуры окружающей среды приводит к значительному увеличению площади теплообмена в промежуточных газоохладителях и АВО для промежуточного теплоносителя, в свою очередь, это увеличивает затраты на циркуляцию охладителя. Однако обозначенную проблему можно решить, если заменить поверхностное охлаждение сжимаемого газа объемным охлаждением путем впрыска охладителя в поток сжатого газа. При этом следует учитывать, что недопустимо ухудшать качество сжимаемых газов, то есть их состав.

Таким образом, требуется жидкий охладитель с температурой ниже температуры окружающей среды, по составу мало отличающийся от сжимаемых газов. В металлургическом производстве в качестве такого теплоносителя могут выступать жидкие азот и кислород [19], вырабатываемые ВРУ в количестве 5,5 кг азота /т стали, либо 6,5 кг кислорода/т стали. При этом возникает задача выбора направления впрыска жидких продуктов разделения воздуха:

- жидкий азот в воздух;
- жидкий азот в азот из ВРУ;

- в) жидкий кислород в воздух;
- г) жидкий кислород в дутье;
- д) жидкий кислород в кислород.

Для определения направления для впрыска была рассчитана экономия энергии при впрыске, с учетом затрат на сжатие дополнительного количества газа и изменение свойств сжимаемой смеси. Результаты представлены на **рис. 5**. Расчеты для каждой ступени велись по формуле

$$\Delta I_{\text{впр}} = G_{\text{см}} \cdot \frac{1}{\eta_{oi} \cdot \eta_{\text{пр}}} \cdot \frac{k_{\text{см}}}{k_{\text{см}} - 1} \cdot R_{\text{см}} \times \times \Delta T \cdot \left(\varepsilon^{\frac{k_{\text{см}} - 1}{k_{\text{см}}}} - 1 \right), \quad (5)$$

где $G_{\text{см}}$ – масса сжимаемой газовой смеси, кг; $R_{\text{см}}$ – индивидуальная газовая постоянная смеси, Дж/(кг·К); ΔT – величина доохлаждения за счет впрыска, К; $k_{\text{см}}$ – показатель адиабаты смеси; ε – степень повышения давления в ступени компрессора; $\eta_{\text{пр}}$ – КПД привода.

При расчетах учитывалось количество газоохладителей, после которых предполагается впрыск (только после первого, после первого и второго и так далее), а также время года (зимнее время с температурой окружающей среды -15°C и летнее с $+15^{\circ}\text{C}$). Изменение свойств сжимаемой смеси учитывалось с помощью программы WaterSteamPro.

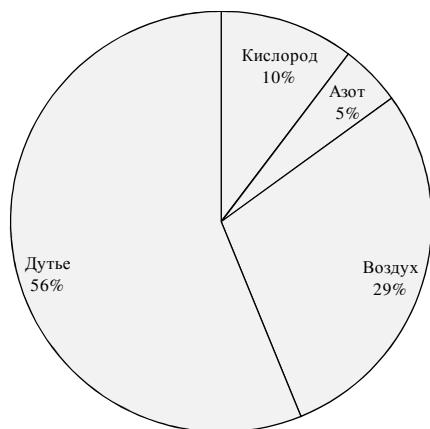


Рис. 4. Структура затрат энергии на сжатие газов металлургического производства на примере ОАО «ММК»

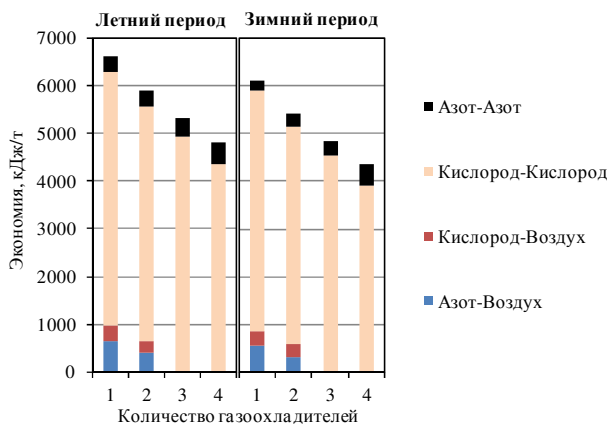


Рис. 5. Экономия энергии на сжатие газов при впрыске жидких продуктов разделения воздуха

Видно, что наибольшая экономия достигается для компрессоров, сжимающих азот на выходе из воздушно-разделяющей установки, при впрыске жидкого азота в сжимаемый же азот. Также показано, что независимо от времени года экономия на сжатии для азотных компрессоров проявляется сильнее относительно других вариантов и составляет от 4800 до 6600 кДж/т стали в летний период и от 4400 до 6100 кДж/т стали в зависимости от количества газоохладителей за ступенями сжатия. Учитывая это, была рассчитана дополнительная экономия энергии на сжатие азота в зависимости от месяца (**рис. 6**).

Таким образом, доказана экономия на работе сжатия в компрессорах при совершенствовании системы охлаждения промежуточных охладителей. Как было отмечено ранее, работа сжатия может быть обеспечена различными типами приводов, что повлияет на относительную экономию работы сжатия при учете энергетических затрат и КПД механического привода (парового, газового, электрического). На **рис. 7** представлена суммарная (средняя за год) экономия работы сжатия в процентах от затрат в действующей схеме.

Несмотря на незначительное снижение расходов энергии, потребляемой для сжатия газов, при производстве металлургическим предприятием полного цикла 10 млн т стали в год экономия энергии, приведенная к условному топливному эквиваленту, составит более 42,7 тыс. т у.т. В зависимости от типа привода компрессора сокращение затрат энергии для такого предприятия будет отличаться (**рис. 8**).

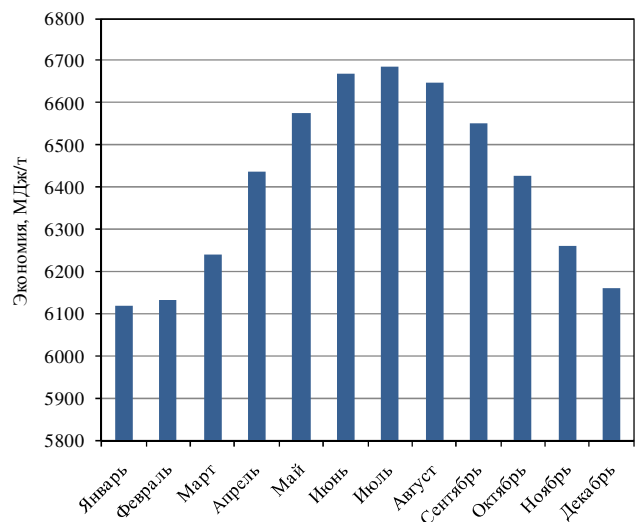


Рис. 6. Экономия энергии на сжатие азота при впрыске жидкого азота на тонну стали

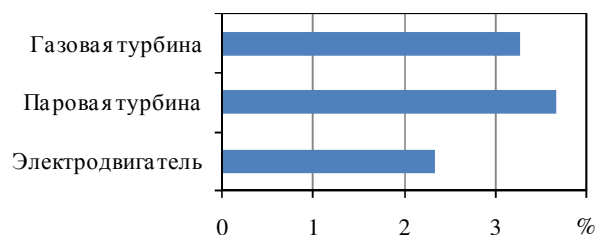


Рис. 7. Средняя относительная экономия энергии на сжатие газов в зависимости от типа привода компрессора

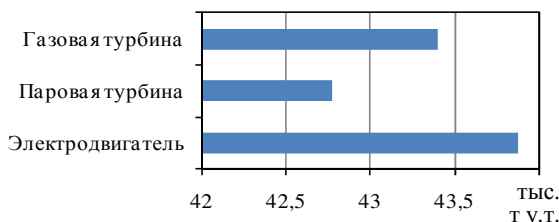


Рис. 8. Годовая экономия энергии на сжатие газов в зависимости от типа привода компрессора

Данная экономия достигается при условиях ярко выраженного континентального климата месторасположения ОАО «ММК» (с холодной зимой и тёплым летом). Для производств с иными климатическими условиями экономия будет иной и её необходимо рассчитывать индивидуально. Для оценки экономии в жарких и холодных климатических зонах рассчитана экономия энергии на сжатии по месяцам в условиях месторасположения ОАО «ММК» с учетом типа привода компрессора (рис. 9).

Из рис. 9 видно, что для температур окружающей среды выше +15°C экономия превышает 4% для электропривода, 6% для газотурбинного привода и может достигать 8% для паротурбинного привода. В свою очередь, для климатической зоны со средней температурой окружающей среды ниже -10°C экономия превышает 2% для газотурбинного, паротурбинного электропривода. При температуре окружающей среды около 5°C замена водяного охлаждения не целесообразна.

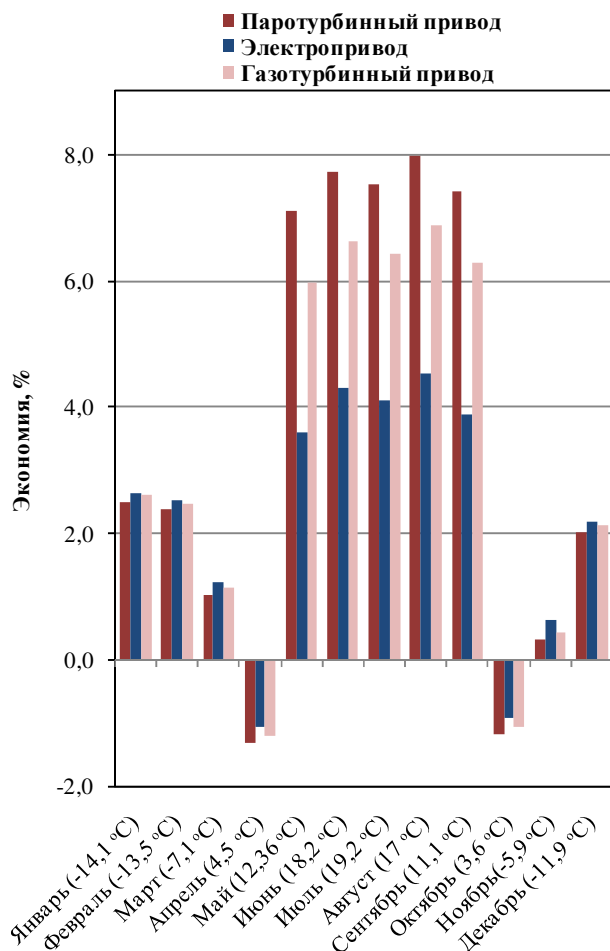


Рис. 9. Относительная экономия энергии на сжатие газов в зависимости от типа привода компрессора и месяца

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в условиях месторасположения ОАО «ММК» внедрение предлагаемой энергоэффективной схемы промежуточного охлаждения и впрыска жидкого газа (кислород, азот) в сжимаемый газ (кислород, азот, воздух) открывает возможность сокращения затрат энергоресурсов на сжатие технических газов более чем на 2÷8 % в проанализированных климатических условиях. При производстве 10 млн т стали в год и цене 2500 руб. за тонну условного топлива данное мероприятие позволит экономить более 105 млн руб.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Копцев В.В. Снижение энергозатрат при эксплуатации газовых одностопных колпаковых печей // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2006. № 2. С. 53-56.
2. Никифоров Г.В., Олейников В.К., Заславец Б.И. Энергосбережение и управление энергопотреблением в металлургическом производстве. М.: Энергоатомиздат. 2003. 282 с.
3. Заславец Б.И. Малафеев А.В. Ягольников Е.Б. Снижение тарифов на передачу электроэнергии за счет компенсации реактивной мощности // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2013. № 2. С. 75-80.
4. Система воздушоснабжения промышленных предприятий / Н.В. Калинин, И.А. Кабанова, В.А. Галковский, В.М. Костюченко. Смоленск: Смоленский филиал МЭИ (ТУ). 2000. 122 с.
5. Экономные компрессоры / Демин Ю.К., Слепова И.О., Хасанова Р.В., Картацев С.В. // Энергонадзор. 2015. №4. С. 14-16.
6. Mathew Aneke, Meihong Wang, April 2015, Potential for improving the energy efficiency of cryogenic air separation unit (ASU) using binary heat recovery cycles, Applied Thermal Engineering, v.81. P. 223-231.
7. G. Kosmadakis, D. Manolakis, G. Papadakis, 2015, Experimental investigation of a low-temperature organic Rankine cycle (ORC) engine under variable heat input operating at both subcritical and supercritical conditions, Applied Thermal Engineering, v. 92 (2016). P. 1-7.
8. Воскобойников В.Г. и др. Металлургия стали. М.: ИКЦ. 2005. 768 с.
9. Сперкоч И.Е., Курунов И.Ф. Резервы интенсификации доменного процесса // Металлург. 2005. №2. С. 33-37.
10. Сибгатуллин С.К., Майорова Т.В. Увеличение работы газового потока в доменной печи с повышением общего перепада давления по высоте печи // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2011. №1. С. 14-16.
11. Сибгатуллин С.К., Майорова Т.В., Полинов А.А. О влиянии изменения параметров состояния газа на величину его работы в доменной печи // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2007. №4. С. 34-37.
12. Повышение производительности доменной печи при оптимизации автоматического управления подачей природного газа и технического кислорода в дутье / Парсункин Б.Н., Сеничкин Б.К., Андреев С.М., Рябчиков М.Ю. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2011. №4. С.63-73.
13. Беляков В.П. Криогенная техника и технология. М.: Энергоатомиздат, 1982. 272 с.
14. Евстигнеев В.Л., Майорова Т.В., Рябчиков М.Ю. Применение балансовой модели для стабилизации показателей доменной плавки // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2006. № 3. С. 30-33.
15. Результаты совместного использования в доменной печи

- коксового орешка с одновременным улучшением качества скипового кокса / Сибатуллин С.К., Харченко А.С., Полинов А.А., Семенюк М.А., Бегинюк В.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2010. № 2. С. 24-27.
16. Железородная база ОАО «Магнитогорский Металлургический Комбинат» / В.И. Гладских, С.В. Гром, А.Б. Пермяков, Н.И. Хасанов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2007. № 2. С. 13-16.
17. Sahar Safarian, Fereshteh Aramoun, 2015, Energy and exergy

assessments of modified Organic Rankine Cycles, Energy Reports, v.1. P.1-7.

18. Демин Ю.К., Картавцев С.В. Оценка энергосберегающего потенциала окружающей среды при производстве сжатого воздуха // Промышленная энергетика. 2013. №1. С. 6-8.
19. Демин Ю.К., Слепова И.О., Картавцев С.В. Электросбережение при разделении воздуха // Электротехнические системы и комплексы. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2013. №21. С. 290-292.

Поступила в редакцию 19 октября 2016 г.

INFORMATION IN ENGLISH

IMPROVEMENT OF INTERMEDIATE COOLING SCHEME OF COMPRESSED GAS IN INDUSTRIAL GAS SUPPLY SYSTEM AT A METALLURGICAL ENTERPRISE

Yuriy K. Demin

Postgraduate student, Department of Thermal and Energy Systems, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, E-mail: dyomin.ura@yandex.ru.

Rezeda V. Khasanova

Master's degree student, Department of Thermal and Energy Systems, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, E-mail: rezed@list.ru.

Evgeniy G. Neshporenko

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Department of Thermal and Energy Systems, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, E-mail: neshporenkoeg@mail.ru

Sergey V. Kartavtsev

D.Sc. (Engineering), Professor, Department of Thermal and Energy Systems, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, E-mail: kartavzw@mail.ru

The paper describes the improved cooling circuit of compressed gas between the groups of compression stages at large industrial centrifugal compressor units, which makes it possible to save the energy required for compression due to subcooling of the gas to the temperature close to the ambient one in winter and to generate electric energy making use of the exhaust the heat in summer. Energy saving effect was calculated due to the use of liquid air separation products for cooling of compressed gases: air, oxygen and nitrogen. Thermodynamic calculation of costs for compression of technical gases for the full cycle of metallurgical production of steel was carried out for different types of drives of centrifugal compressors; the cycle included compression, air separation, blast furnaces operation, gaseous oxygen and nitrogen separation. Estimated specific energy consumption depends on cooling the compressed gas between groups of compression in industrial centrifugal compressor units and the injection of liquid products of air separation in a stream of compressed gas with the type of compressor drives, for example the climatic conditions of OJSC "MMK" location.

Keywords: Energy saving, energy efficient scheme, centrifugal compressor, drive type, compression work, heat, intermediate cooling, organic Rankine cycle.

REFERENCES

1. Koptsev V.V. The reduction of energy consumption in the operation of the gas bell-type furnace. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Bulletin of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2006, no. 2, pp. 53-56. (In Russian)

2. Nikiforov G.V., Oleynikov V.K., Zaslavets B.I. *Energosberezhenie i upravlenie energopotrebleniem v metallurgicheskoy proizvodstve* [Energy saving and energy management in metallurgical production]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 2003. 282 p.
3. Zaslavets B.I., Malafeev A.V., Yagol'nikova E.B. The reduction of tariffs for electricity transmission through reactive power compensation. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Bulletin of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2013, no. 2, pp. 75-80. (In Russian)
4. Kalinin N.V., Kabanova I.A., Galkovskiy V.A., Kostyuchenko V.M. *Sistema vozdukhosnabzheniya promyshlennykh predpriyatiy* [The air supply system of industrial enterprises]. Smolensk, Smolensk branch of MPEI (TU), 2000. 122 p.
5. Demin Yu.K., Slepova I.O., Khasanova R.V., Kartavtsev S.V. Economical compressors. *Energonadzor* [Energy oversight], 2015, no. 4, pp. 14-16. (In Russian)
6. Mathew Aneke, Meihong Wang. Potential for improving the energy efficiency of cryogenic air separation unit (ASU) using binary heat recovery cycles. *Applied Thermal Engineering*. 2015, vol. 81, pp. 223-231.
7. Kosmadakis G., Manolakis D., Papadakis G. Experimental investigation of a low-temperature organic Rankine cycle (ORC) engine under variable heat input operating at both subcritical and supercritical conditions. *Applied Thermal Engineering*. 2016, vol. 92, pp. 1-7.

8. Voskobeynikov V.G. *Metallurgiya stali* [Metallurgy of steel.]. Moscow, IKC Publ., 2005. 768 p.
9. Sperkoch I.E., Kurunov I.F. Reserves of intensification of blast furnace process. *Metallurg* [Metallurgist], 2005, no. 2, pp. 33-37. (In Russian)
10. Sibagatullin S.K., Mayorova T.V. The increase of the gas flow in blast furnace with increased total pressure differential along the height of the furnace. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Bulletin of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2011, no. 1, pp. 14-16. (In Russian)
11. Sibagatullin S.K., Mayorova T.V., Polinov A.A. On the effect of changing parameters of gas state on the value of his work in blast furnace. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Bulletin of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2007, no. 4, pp. 34-37. (in Russian)
12. Parsunkin B.N., Senichkin B.K., Andreev S.M., Ryabchikov M.Yu. Increased productivity of the blast furnace in the optimization of automatic control of supply of natural gas and technical oxygen in the blast. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Bulletin of the Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2011, no. 4, pp. 63-73. (In Russian)
13. Belyakov V.P. *Kriogennaya tekhnika i tekhnologiya*. [Cryogenic engineering and technology]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1982. 272 p.
14. Evstigneev V.L., Mayorova T.V., Ryabchikov M.Yu. The application of the balance model for the stabilization of indicators of the blast furnace. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Bulletin of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2006, no. 3, pp. 30-33. (In Russian)
15. Sibagatullin S.K., Kharchenko A.S., Polinov A.A., Semenyuk M.A., Beginyuk V.A. The results of the joint use of blast furnace coke nut with a simultaneous improvement of a skip coke quality. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Bulletin of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2010, no. 2, pp. 24-27. (In Russian)
16. Gladskikh V.I., Grom S.V., Permyakov A.B., Khasanov N.I. Iron ore base of JSC "Magnitogorsk Metallurgical Combine. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Bulletin of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2007, no. 2, pp. 13-16. (In Russian)
17. Sahar Safarian, Fereshteh Aramoun. Energy and exergy assessments of modified Organic Rankine Cycles. *Energy Reports*. 2015, vol. 1, pp. 1-7.
18. Demin Yu.K., Kartavtsev S.V. Evaluation of energy saving potential of the environment in the production of compressed air. *Promyshlennaya energetika* [Industrial energy], 2013, no. 1, pp. 6-8. (In Russian)
19. Demin Yu.K., Slepova I.O., Kartavtsev S.V. Saving in the separation of air. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical systems and complexes]. Magnitogorsk, Nosov Magnitogorsk State Technical University Publ., 2013, no. 21. pp. 290-292. (In Russian)

Дёмин Ю.К., Хасанова Р.В., Нешпоренко Е.Г., Картавец С.В. Совершенствование схемы промежуточного охлаждения сжимаемого газа в системе снабжения техническими газами металлургического производства // *Электротехнические системы и комплексы*. 2017. №1(34). С. 37-43. doi: 10.18503/2311-8318-2017-1(34)-37-43

Demin Yu.K., Khasanova R.V., Neshporenko E.G., Kartavtsev S.V. Improvement of Intermediate Cooling Scheme of Compressed Gas in Industrial Gas Supply System at a Metallurgical Enterprise. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2017, no.1(34), pp. 37-43. (In Russian) doi: 10.18503/2311-8318-2017-1(34)-37-43

Коробатов Д.В., Мартянов А.С., Бодрова Е.С., Четошников С.А.

ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)»

ИССЛЕДОВАНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МИКРОВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

Малые и микроветроэнергетические установки (микро ВЭУ), имеющие мощность до 10 кВт, используются в основном для энергоснабжения маломощных объектов распределенной энергетики. На базе Южно-Уральского государственного университета в г. Челябинске созданы и испытаны вертикально-осевые ВЭУ малой и сверхмалой мощности для электроснабжения осветительных установок, использующих для питания напряжение постоянного тока. С целью оптимизации конструкции ротора ВЭУ был проведен ряд теоретических и экспериментальных исследований, направленных на изучение аэродинамических характеристик. В результате исследований были определены основные габаритные соотношения элементов ротора, обеспечивающие заданную расчетную мощность, рассчитаны аэродинамические характеристики лопастей, произведен выбор оптимального профиля, рассчитаны относительные размеры лопастей и углы их установки. Установлена зависимость коэффициента использования энергии ветра от быстроходности ротора. Рассчитан коэффициент использования энергии ветра в зависимости от быстроходности, получена главная аэродинамическая характеристика ротора. Получены данные для всего используемого диапазона быстроходностей по величинам аэродинамических сил и моментов, необходимых для проведения прочностных и динамических расчетов. Подготовлен массив значений аэродинамической мощности как функции двух переменных: скорости ветра и скорости вращения ротора для использования его в системе регулирования.

Ключевые слова: ветроустановка, микро ВЭУ, аэродинамическая характеристика, ротор, коэффициент использования энергии ветра.

ВВЕДЕНИЕ

Малые и микроветроэнергетические установки (микро ВЭУ), имеющие мощность менее 10 кВт, пока не имеют широкого применения ни в России, ни в мире и используются в основном в малой распределенной энергетике для энергоснабжения разрозненных маломощных объектов [1]. Как правило, они работают в системах общественного освещения в автономном режиме без подключения к магистральной сети [2]. Их ограниченное применение объясняется в основном высокой текущей стоимостью комплектующих [3]. Однако преобладающее мнение о том, что экономическая эффективность малых ВЭУ ниже, чем крупных, является ошибочным, но, к сожалению, пока определяет современные тренды. Например, сравнивая мощность одной крупной ветроустановки с диаметром ротора 100 м и 100 ветроустановок с диаметром 10 м, нетрудно заметить, что мощность этих двух генерирующих объектов имеет одинаковый порядок, поскольку зависит от квадрата ометаемой площади. В первом случае эта площадь имеет порядок $100^2 = 10^4 \text{ (м}^2\text{)}$ и во втором тот же порядок $100 \cdot 10^2 = 10^4 \text{ (м}^2\text{)}$. Однако материалоемкость конструкции ротора имеет кубическую зависимость от диаметра, и в этом случае крупная установка экономически проигрывает, поскольку ее масса будет иметь порядок $100^3 = 10^6 \text{ (кг)}$, а в случае малых ВЭУ $100 \cdot 10^3 = 10^5 \text{ (кг)}$, то есть на порядок меньше. А это значит, что затраты на производство малых ВЭУ будут в 10 раз меньше, чем крупных. Следовательно, малые и микро ВЭУ имеют серьезные конкурентные экономические преимущества, несмотря на то, что пока стоимость их комплектующих, как правило, производимых штучно, слишком велика и в целом не отражает реальной рыночной ситуации.

С учетом неоспоримого преимущества вертикально-осевых конструкций перед традиционными горизонтально-осевыми в части независимости работы от направления ветра главный фокус научно-исследовательских работ в этой области был сосредоточен на улучшении аэродинамических характеристик ротора и совершенствовании систем управления.

МЕТОДИКА АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Силами ученых Южно-Уральского государственного университета (ЮУрГУ) [4, 5] и АО «ГРЦ Макеева» (Челябинская область) создана линейка вертикально-осевых ВЭУ малой мощности от 0,1 до 30 кВт (рис. 1) [6, 7].

Длительные ресурсные испытания микро ВЭУ в составе гибридного ветросолнечного энергокомплекса [8, 9] мощностью до 1 кВт в течение 5 лет совместно с осветительными установками на светодиодах показали исключительную эффективность изделий (рис. 2).

Светодиодный светильник мощностью 70 Вт успешно эксплуатируется для освещения прилегающей территории в ночное время суток. Энергокомплекс включает аккумулирующий модуль 24 В/100 А·ч. Тем не менее данная конструкция двухъярусного ротора оказалась технологически дорогой и подверженной вибрациям, в связи с чем были проведены дополнительные исследования, направленные на изучение аэродинамических характеристик и вибраций с дальнейшей оптимизацией конструкции. Основные аэродинамические характеристики ротора ВЭУ были получены расчетным путем с использованием инженерного метода [10]. Помимо конструктивно-габаритных параметров ротора, метод, в качестве исходных данных, принимает аэродинамические характеристики профиля лопасти. Серия профилей лопастей разработана в ООО «ГРЦ-Вертикаль» [11, 12] и оптимизирована для использования в роторах вертикально-осевых ВЭУ. Аэродинамические характеристики профилей на всех

установочных углах лопастей при круговом обдуве получены расчетом в пакете вычислительной аэродинамики ANSYS CFX и подтверждены экспериментальными исследованиями [13]. Расчетные и экспериментальные данные находятся в хорошем соответствии. На **рис. 3** приведены аэродинамические коэффициенты C_x (коэффициент сопротивления), C_y (коэффициент подъемной силы), C_d (коэффициент динамического момента), полученные расчетом [14]. Эти данные применялись далее при определении основных аэродинамических зависимостей коэффициента использования энергии ветра КИЭВ или $C_p(Z)$, а также коэффициента момента $C_m(z)$, графики которых представлены на **рис. 3**.

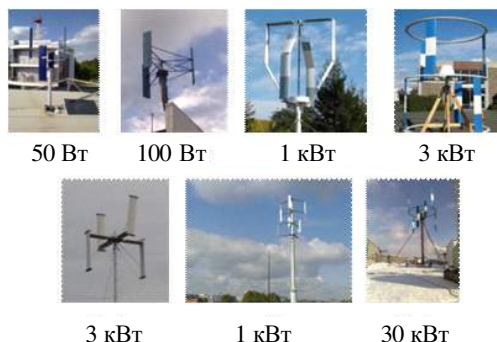


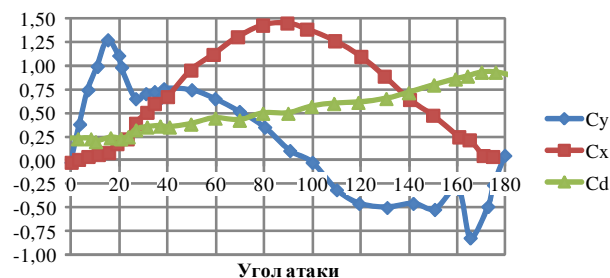
Рис. 1. Семейство вертикально-осевых ВЭУ ЮУрГУ



Рис. 2. Гибридный ветросолнечный энергокомплекс на основе микро ВЭУ

Найденная зависимость мощности от частоты вращения N (об/мин) и скорости ветра V (м/с) использована для расчета параметров системы управления. Система управления ВЭУ представляет собой электронное устройство, регулирующее скорость вращения ротора ВЭУ с учетом текущей располагаемой мощности для обеспечения наибольшей генерируемой электрической мощности. Законом управления является максимизация параметра $C_p(Z)$ при ряде граничных условий. Например, в нормальном рабочем режиме $P_o < P_p$, где P_o – генерируемая мощность, а P_p – располагаемая. Ограничение мощности (и частоты вращения) по верхнему пределу предусмотрено системой регулирования в соответствии с **рис. 4** за счет нагружения генератора до полной остановки ротора ВЭУ, и тогда $P_o > P_p$ [15]. Однако в силу малых размеров ветроустановки это ограничение может быть исключено, т.к. ротор такой ВЭУ может вращаться с большой скоростью без риска разрушения. Для аварийного ограничения скорости вращения используется электромеханическая система торможения [16].

ANSYS CFX: C_x , C_y , C_d в поточной системе



КИЭВ $C_p(Z)$ и коэффициент момента $C_m(Z)$

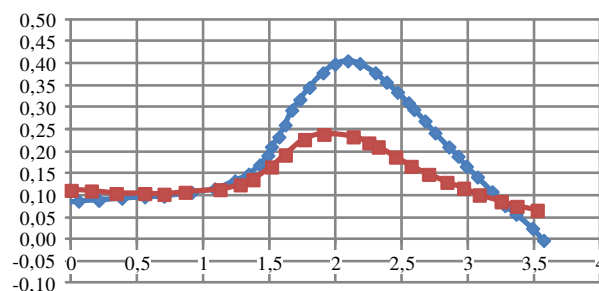


Рис. 3. Аэродинамические коэффициенты профиля лопасти и основные аэродинамические характеристики ротора микро ВЭУ

Данные **рис. 3** дают возможность рассчитать поле аэродинамической мощности в координатах «скорость ветра – частота вращения» (**рис. 4**).

Для расчетов прочности и устойчивости микро ВЭУ необходимо знать силы, действующие на ротор в целом. На **рис. 5** изображены графики коэффициентов, осредненных за оборот продольной и боковой сил. Наблюдаются некоторые различия в ходе кривых, полученных по инженерной методике и в пакете вычислительной аэродинамики, что, с одной стороны, будет способствовать улучшению инженерного метода, а с другой – повысит качество проектных работ при непосредственном использовании вычислительных комплексов.

РЕЗУЛЬТАТЫ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В результате исследований была разработана, а затем изготовлена одноярусная конструкция микро ВЭУ, которую планируется применять, например, для электроснабжения осветительных устройств уличного освещения. В качестве дублирующего источника энергии может использоваться солнечный модуль (**рис. 6**).

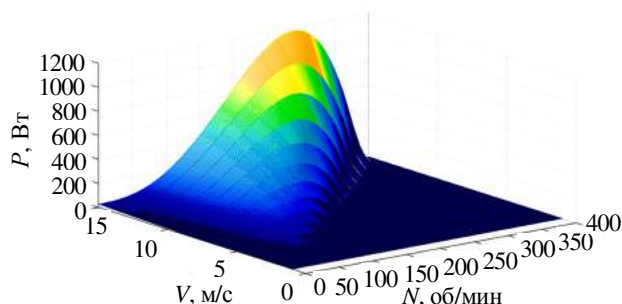


Рис. 4. Поле аэродинамической мощности микро ВЭУ

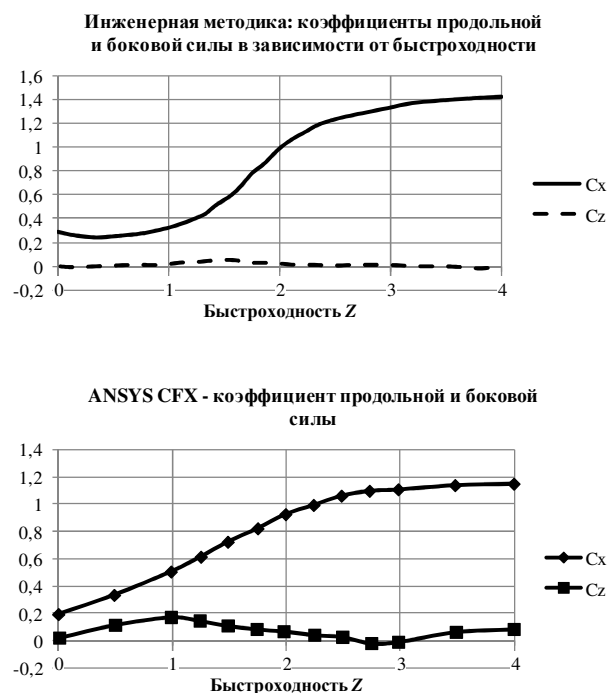


Рис. 5. Зависимости коэффициентов продольной и боковой сил от быстроходности, вычисленные по инженерной методике и в ANSYS CFX

Для ротора микро ВЭУ выбор параметров осуществлялся на основании опыта конструкторских разработок ветротурбин с вертикальной осью вращения мощностью 0,1-30 кВт, математического аппарата на базе программных комплексов NASTRAN [17], пакетов MATLAB, SolidWorks, а также методики оптимизации конструкции ВЭУ. В результате итерационных расчетов были выбраны следующие конструктивно-габаритные параметры:

$D = 1,2$ м – диаметр ротора;
 $R = D/2 = 0,6$ м – радиус ротора;
 $L = H = 1,3$ м – длина лопастей и одновременно высота ротора;
 $S = D \cdot H = 1,56$ м² – ометаемая площадь ротора;
 $b = 0,125$ м – длина хорды симметричного профиля лопасти;
 $c = 20\%$ – относительная толщина профиля;
 $n = 4$ – количество лопастей;
 $\varphi = 3,5^\circ$ – установочный угол лопасти в ветрокоlese;
 $Z = \omega R/V$ – быстроходность, где ω – скорость вращения, V – скорость ветра;
 $C_m = 2M/(\rho V^2 S R)$ – коэффициент крутящего момента M , ρ – плотность воздуха;
 $C_p = 2P/(\rho V^3 S) = C_m \cdot Z$ – коэффициент использования энергии ветра.

Уровень виброускорений – не более $0,04$ м/с² в среднегеометрических полосах частот.

Поскольку ветроэнергетическая установка представляет собой динамический объект повышенной опасности, технические требования к ее конструкции и опорным элементам, прежде всего, формулировались с точки зрения безопасности воздействия на окружающую среду при высокой эффективности работы установки. Требования по безопасности удовлетворяют Требования Ллойда [18].

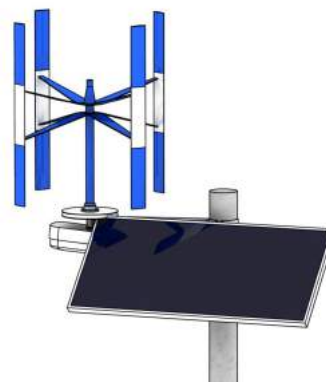


Рис. 6. Микро-ВЭУ с дублирующим солнечным модулем

Учитывая малую величину вертикальных виброускорений в резонансах собственных частот ротора и опорной конструкции, вычисленные для напряженно-деформированного состояния конструкции, можно предположить возможность размещения микро ВЭУ не только в непосредственной близости к жилым домам, но и непосредственно на кровле зданий и сооружений, что значительно расширяет область применения данной конструкции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вертикально-осевые микроветроэнергетические установки, разработанные на базе ЮУрГУ, явились первым поколением одноярусных микротурбин, позволяющих осуществить локальное электроснабжение сверхмалых потребителей в виде осветительных устройств, находящихся на значительном расстоянии. С помощью теоретических и экспериментальных исследований, проведенных с целью оптимизации параметров конструкции, была определена характеристика коэффициента использования ветра в зависимости от быстроходности, вычислены главные аэродинамические характеристики ротора, найден оптимальный профиль лопасти.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сироткин Е.А., Соломин Е.В., и др. Состояние развития мировой ветроиндустрии // *Альтернативная энергетика и экология*. 2014. № 05 (145). С.20–25.
2. Halstead R., Solomin E. Vertical wind turbines (Технические особенности и преимущества ветроэнергетических установок) // *Альтернативная энергетика и экология*. 2010. №1. С.36–41.
3. Соломин Е.В. Перспективы использования малых ветроэнергетических установок в агропромышленном комплексе // *Механизация и электрификация сельского хозяйства*. 2011. Вып. 7. С.12–15.
4. Шестаков А.Л., Кирпичникова И.М. Южно-Уральский государственный университет как стартовая площадка энергосберегающих технологий и использования возобновляемых источников энергии // *Альтернативная энергетика и экология*. 2010. № 1. С. 149-152.
5. Кирпичникова И.М. Разработки Южно-Уральского государственного университета в области использования возобновляемых источников энергии // *Альтернативная энергетика и экология*. 2014. № 5 (145). С. 54-57.
6. Соломин Е.В., Кирпичникова И.М. Мартыанов А.С. Итерационный подход в разработке и оптимизации вертикально-осевых ветроэнергетических установок // *Электротехника. Электротехнология. Энергетика: сб. науч. тр. VII междунар. науч. конф. молодых ученых / Новосибирский государственный технический университет; Межвузовский центр содействия научной и инновационной деятельности студентов и молодых ученых Новосибирской области. ЭЭЭ-2015. Новосибирск. 2015.*
7. Kirpichnikova I.M., Kozin A.A. Analysis of the group of vertical-axis wind turbines in the software package Matlab // *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology*, № 1(1), 2014, С.43-46.
8. Кирпичникова И.М., Рахматулин И.Р. Лабораторные исследования устройства слежения за солнцем с использованием фотоэлементов // *Альтернативная энергетика и экология*. 2013. № 12 (134). С. 10-14.
9. Кирпичникова И.М., Четосников С.А. Моделирование комбинированной ветросолнечной установки // *Альтернативная энергетика и экология*. 2016. №7-8. С. 25-31.
10. Кирпичникова И.М., Топольская И.Г., Топольский Д.В. Об особенностях развития теории моделирования возобновляемых источников энергии в России // *Альтернативная энергетика и экология*. 2014. № 5 (145), С. 63-68.
11. Соломин Е.В. Ветроэнергетические установки ГРЦ-Вертикаль // *Альтернативная энергетика и экология*. 2010. №1. С.10–15.
12. Кирпичникова И.М., Соломин Е.В. Ветроэнергетическая установка с вертикальной осью вращения // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика»*. 2008. Вып. 10. № 26 (126). С. 32–35.
13. ANSYS CFX Release 10.0 documentation. 2006.
14. Соломин Е.В. Методология разработки и создания вертикально-осевых ветроэнергетических установок: монография. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2011. 324 с.
15. Киндряшов А.Н., Мартыанов А.С., Соломин Е.В. Электрические машины ветроэнергетических установок с вертикальной осью вращения // *Альтернативная энергетика и экология*. 2013 №01/2 (118). С.59–62.
16. Соломин Е.В., Сироткин Е.А., Козлов С.В. Электромеханическая система аварийного торможения ветроэнергетической установки // *Электротехнические системы и комплексы*. 2016. № 1 (30). С. 19-23. doi: 10.18503/2311-8318-2016-1(30)-19-23
17. Шимкович Д.Г. Расчет конструкций в MSC/NASTRAN for Windows. М.: ДМК Пресс, 2001.
18. Технические условия на безопасность ветросиловых установок / Компания "Германишер Ллойд".

Поступила в редакцию 16 декабря 2016 г.

INFORMATION IN ENGLISH

AERODYNAMIC STUDY OF MICRO WIND TURBINES

Denis V. Korobatov

Ph.D. (Engineering), Associated Professor, Polytechnic Institute, Department of Electric Stations, Grids and Systems of Power Supply, South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia. E-mail: denis_vk@inbox.ru

Andrey S. Martyanov

Ph.D. (Engineering), Associated Professor, Polytechnic Institute, Department of Electric Stations, Grids and Systems of Power Supply, South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia. E-mail: martyanov_andrey@mail.ru

Elena S. Bodrova

Post-graduate student, Polytechnic Institute, Department of Electric Stations, Grids and Systems of Power Supply, South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia. E-mail: Lennok13@mail.ru

Sergey A. Tchetosnikov

Post-graduate student, Polytechnic Institute, Department of Electric Stations, Grids and Systems of Power Supply, South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia. E-mail: tchetser@gmail.com

Small and micro wind turbines (micro-wind turbines) with generation power up to 10 kW are used mostly for low power supply distributed facilities. Low and ultra-low power vertical axis wind turbines (VAWT) for DC supply local grids intended for street lighting installations were created and tested at South Ural State University (Chelyabinsk). Series of experimental and theoretical research for optimizing the wind turbine rotor design were made. The main objective was to study the aerodynamic characteristics. The obtained results contain the basic overall elements optimal ratios of a rotor which provides the increase of desired design power. The results include as well the calculated aerodynamic characteristics of the blades, the result of the choice of the optimal profile, calculated relative sizes of the angles of the blades and their installation procedure, and much more. We also calculated the dependence of power efficiency on tip speed ratio with the main aerodynamic curve of the rotor. We obtained data for all the usable range of tip speed ratio for aerodynamic forces and torques required for the strength and dynamic calculation. We have built an array of wind power values as a function of two variables: wind speed and angular rotor speed for the application in the control system.

Keywords: Wind turbine, micro wind, aerodynamic characteristics, rotor, wind power.

REFERENCES

1. Sirotkin E.A., Solomin E.V., et.al. Development State of the World Wind-turbine Industry. *Al'ternativnaya energetika i ekologiya* [Alternative energy supply and ecology], 2014, no. 05 (145), pp.20–25. (In Russian)
2. Halstead R., Solomin E. Vertical wind turbines (Technical features and advantages of SRC-Vertical wind turbines). *Al'ternativnaya energetika i ekologiya* [Alternative energy supply and ecology], 2010, no. 1, pp.36–41. (In Russian)
3. Solomin E.V. Application prospects of small wind-power units in agriculture. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sel'skogo khozyaystva* [Mechanization and electrification of agriculture], 2011, Iss. 7, pp.12–15. (In Russian)
4. Shestakov A.L., Kirpichnikova I.M. South Ural State University as a Launch Site of Energy-saving Technology and Application of Renewable Energy Sources. *Al'ternativnaya energetika i ekologiya* [Alternative energy supply and ecology], 2010, no. 1, pp. 149-152. (In Russian)
5. Kirpichnikova I.M. Scientific research results of the South-Ural State University in the field of renewable energy source application. *Al'ternativnaya energetika i ekologiya* [Alternative energy supply and ecology], 2014, no. 5 (145), pp. 54-57. (In Russian)
6. Solomin E.V. Kirpichnikova I.M. Mart'yanov A.S. [Iterative approach in development and enhancement of vertical wind-energy units. *Elektrotehnika. Elektrotekhnologiya. Energetika: sb. nauch. tr. VII mezhdunar. nauch. konf. molodykh uchenykh* [Electrical engineering. Electrical engineering technology. Power engineering. Collection of scientific papers of VII international conference of young scientists. Novosibirsk State Technical University. EEE-2015], 2015. (In Russian)
7. Kirpichnikova I.M., Kozin A.A. Analysis of the group of vertical-axis wind turbines in the software package Matlab. *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology*, 2014, no. 1(1), pp.43-46.
8. Kirpichnikova I.M., Rakhmatulin I.R. Laboratory investigation of a sun tracker using photo cells. *Al'ternativnaya energetika i ekologiya* [Alternative energy supply and ecology], 2013, no. 12 (134), pp. 10-14. (In Russian)
9. Kirpichnikova I.M., Chetoshnikov S.A. Modeling of a combined wind and solar energy unit. *Al'ternativnaya energetika i ekologiya* [Alternative energy supply and ecology], 2016, no. 7-8, pp. 25-31. (In Russian)
10. Kirpichnikova I.M., Topol'skaya I.G., Topol'skiy D.V. Characteristics of the theory of renewable energy sources development in Russia. *Al'ternativnaya energetika i ekologiya* [Alternative energy supply and ecology], 2014, no. 5(145), pp. 63-68. (In Russian)
11. Solomin E.V. Wind energy units of GRT-Vertikal. *Al'ternativnaya energetika i ekologiya* [Alternative energy supply and ecology], 2010, no. 1, pp. 10–15. (In Russian)
12. Kirpichnikova I.M., Solomin E.V. Wind energy unit with vertical axis of rotation. *Vestnik YuUrGU. Seriya «Energetika»* [Vestnik of YuUrGU. Series "Power engineering"], 2008, iss. 10, no. 26 (126), pp. 32–35. (In Russian)
13. ANSYS CFX Release 10.0 documentation. 2006.
14. Solomin E.V. *Metodologiya razrabotki i sozdaniya vertikalno-osevykh vetroener-geticheskikh ustanovok* [Development and design methodology of vertical wind energy units]. Chelyabinsk, Publishing center of YuUrGU, 2011, 324 p.
15. Kindryashov A.N., Mart'yanov A.S., Solomin E.V. Electrical machines of wind energy units with vertical axis of rotation. *Al'ternativnaya energetika i ekologiya* [Alternative energy supply and ecology], 2013, no. 01/2(118), pp. 59–62. (In Russian)
16. Solomin E.V., Sirotkin E.A., Kozlov S.V. Electro-Mechanical System of Emergency Braking for Wind Turbine. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2016, no. 1 (3), pp. 19-23. (In Russian). doi: 10.18503/2311-8318-2016-1(30)-19-23
17. Shimkovich D.G. *Raschet konstruksiy v MSC/NASTRAN for Windows* [Calculation of MSC/NASTRAN structures for Windows]. Moscow, DMK Press Publ., 2001.
18. *Tekhnicheskie usloviya na bezopasnost vetrosilovykh ustanovok* [Safety specifications of wind energy units]. Germanisher Lloyd.

Коробатов Д.В., Март'янов А.С., Бодрова Е.С., Четошников С.А. Исследование аэродинамических характеристик микроветроэнергетической установки // Электротехнические системы и комплексы. 2017. №1(34). С. 44-48. doi: 10.18503/2311-8318-2017-1(34)-44-48

Korobatov D.V., Mart'yanov A.S., Bodrova E.S., Chetoshnikov S.A. Aerodynamic Study of Micro Wind Turbines. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2017, no.1(34), pp. 44-48. (In Russian) doi: 10.18503/2311-8318-2017-1(34)-44-48

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ

УДК 621.31

DOI: 10.18503/2311-8318-2017-1(34)-49-55

Конесев С.Г., Хазиева Р.Т.

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет»

АНАЛИЗ СТАБИЛИЗАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ИНДУКТИВНО-ЕМКОСТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБАХ ПОДКЛЮЧЕНИЯ ГИБРИДНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Для снижения массы и габаритов, повышения КПД и надежности систем стабилизации тока предлагается осуществлять питание нагрузки от индуктивно-емкостных преобразователей (ИЕП), выполненных на основе гибридных электромагнитных элементов – многофункциональных интегрированных электромагнитных компонентов (МИЭК). Целью работы является исследование стабилизационных свойств, трех схем, предложенного авторами ИЕП, на основе двухсекционного МИЭК при различных способах соединения секций МИЭК и подключения источника питания и нагрузки. Для достижения цели построены частотные характеристики (ЧХ), произведена оценка коэффициентов усиления по напряжению и току, коэффициента стабилизации тока ИЕП по результатам математического моделирования, при помощи интегральных параметров МИЭК, к которым относятся полная индуктивность обкладок, общая емкость и токи выводов обкладок. Схема №1 обладает более высоким коэффициентом усиления по напряжению по сравнению со схемой №2 ($k_{U1} = 20 > k_{U2} = 13,5$), стабилизирует ток большей амплитуды ($i_{L1} = 0,352 > i_{L2} = 0,235$), но в узком диапазоне изменения частоты (от $0,98f_{рез}$ до $1,02f_{рез}$). При этом схема №1 обладает более широким частотным диапазоном по сравнению со схемой №3 (от $0,985f_{рез}$ до $1,003f_{рез}$), но стабилизирует ток меньшей амплитуды ($i_{L1} = 0,352$), имеет меньший коэффициент усиления по напряжению ($k_{U1} = 20 < k_{U3} = 75$). Схема №2 обладает наилучшими стабилизирующими свойствами среди двухсекционных схем МИЭК, так как осуществляет стабилизацию тока нагрузки в широком диапазоне изменения частоты (от $0,7f_{рез}$ до $1,3f_{рез}$) и может работать от несинусоидального источника напряжения. Схема №3 осуществляет стабилизацию тока нагрузки большей амплитуды ($i_{L3} = 1,23$), обладает наибольшим коэффициентом усиления по напряжению ($k_{U3} = 75$). Исследованные ИЕП на основе двухсекционного МИЭК могут использоваться в качестве УЗЕН при питании от источника напряжения синусоидальной формы.

Ключевые слова: критерий стабильности, преобразователи, источник тока, математическая модель, вольт-амперная характеристика, многофункциональный интегрированный электромагнитный компонент, индуктивно-емкостный преобразователь, частотная характеристика, стабилизация тока, стабильность тока.

ВВЕДЕНИЕ

Для снижения массы и габаритов, повышения КПД и надежности систем стабилизации тока (ССТ) широко применяемых в устройствах заряда емкостных накопителей (УЗЕН), генераторах высоковольтных импульсов, электротермических системах, требующих постоянного подводимой к ним мощности при изменении их сопротивления в широких пределах, перспективным является питание нагрузки от индуктивно-емкостного преобразователя (ИЕП) [1 – 3].

Основным свойством ИЕП является стабилизация выходного тока при изменении величины сопротивления нагрузки [4 – 7]. Однако в реальном преобразователе, ввиду конечной добротности его элементов, с ростом нагрузки стабильность выходного тока падает [8 – 10].

Преобразователи источников напряжения в источники тока, выполненные на основе гибридных электромагнитных элементов (ЭМЭ), позволяют обеспечить требуемые рабочие характеристики [11 – 18]. Применением ИЕП можно добиться линейного изменения ВАХ заряда ЕН и тем самым создать условия, при которых потери энергии в зарядной цепи будут минимальны, а КПД максимальным [19 – 22]. Использование гибридных ЭМЭ приводит к снижению массы и габаритов, повышению надежности УЗЕН [23].

Известен многофункциональный интегрированный электромагнитный компонент (МИЭК) [24], на основе различных схемотехнических исполнений которого

разработано значительное количество (более 30) электротехнических устройств [25 – 27]. Схемотехнические исполнения МИЭК отличаются друг от друга порядком включения секций, образующих их структуру, различными способами подключения источника питания и нагрузки. Схемы ИЕП, реализованные на основе МИЭК, безусловно, неравнозначны по своим функциональным возможностям, стабилизирующим, частотным и другим свойствам и показателям. Актуальной становится задача оценки стабилизационных свойств разработанных структур МИЭК и исследование целесообразности и эффективности применения двухсекционной структуры МИЭК в качестве ИЕП для ССТ, выбор наиболее оптимального с точки зрения стабилизационных свойств способа соединения секций и подключения источника питания и нагрузки.

В данной статье рассматриваются три схемы ИЕП на основе двухсекционного МИЭК, отличающиеся способом соединения секций и подключением источника питания и нагрузки.

В работе поставлена цель исследовать стабилизационные свойства ИЕП на основе двухсекционного МИЭК при различных способах соединения секций МИЭК и подключения источника питания и нагрузки.

Для достижения цели решаются следующие задачи:

- исследование и анализ частотных характеристик (ЧХ) двухсекционного МИЭК;
- оценка коэффициентов усиления по напряжению и току;
- оценка коэффициента стабилизации тока ИЕП на основе двухсекционного МИЭК.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Возможны различные схемотехнические исполнения МИЭК, варианты соединения секций и способы подключения источника питания и нагрузки к секциям МИЭК [28, 29].

Рассмотрим двухсекционный МИЭК с различными способами соединения секций и подключения источника питания и нагрузки с целью оценки стабилизирующих свойств и определения их зависимости от способа соединения секций.

Оценить стабилизирующие свойства ИЕП можно через отношение модуля текущего значения выходного тока ИЕП к его значению в режиме КЗ (к входному току).

Исследуются три схемы ИЕП на основе МИЭК с различными подключениями секций, источника питания и нагрузки. Каждая из схем имеет свою собственную резонансную частоту при различных способах подключения.

Схема № 1 представляет собой двухсекционный МИЭК с параллельным соединением обкладок обеих секций, с подключением источника питания к началам первичных обкладок и к концам вторичных обкладок обеих секций, с подключением нагрузки к концам первичных обкладок и началам вторичных обкладок обеих секций (см. таблицу, схема № 1). В этом случае наблюдается согласное протекание токов в обкладках обеих секций.

Схема № 2 представляет собой двухсекционный МИЭК с последовательным соединением секций, с выводом в середине вторичной обкладки, с подключением источника питания к началу первичной обкладки первой секции и к середине вторичной обкладки, с подключением нагрузки к концу первичной обкладки второй секции и началу вторичной обкладки первой секции (см. таблицу, схема № 2). Данное схематическое исполнение МИЭК обладает резонансными свойствами на частоте 1,25 от резонансной частоты схемы №1, представленной в п. 1 таблицы.

Схема №3 представляет собой двухсекционный МИЭК с параллельным соединением обкладок обеих секций, с выводом в середине вторичной обкладки, с подключением источника питания к началам первичных обкладок обеих секций и к середине вторичной обкладки, с подключением нагрузки к концам первичных обкладок обеих секций и к началу вторичной обкладки первой секции (см. таблицу, схема № 3).

Данное схематическое исполнение МИЭК обладает резонансными свойствами на частоте 1,5 от резонансной частоты схемы № 1, представленной в п. 1 таблицы.

Формулы тока нагрузки исследуемых схем при выполнении условия резонансной настройки могут быть представлены в виде:

$$I_L = \omega \cdot C \cdot U_{in} / (2 \cdot j); \quad (1)$$

$$I_L = U_{in} / (2 \cdot j \cdot \omega \cdot L). \quad (2)$$

Приведенные выражения для относительного тока нагрузки отражают частотные свойства МИЭК при различных способах соединения секций и подключения источника питания и нагрузки.

Из выражений (1) и (2) видно, что стабильность выходного тока ИЕП не зависит от порядка включения элементов и варианта подключения источника питания, определяется лишь добротностью и величиной относительного сопротивления нагрузки. При равных значениях добротности лучшими стабилизирующими свойствами обладают схемы, у которых максимальная величина относительного сопротивления нагрузки имеет меньшее значение.

Ввиду того, что структуру ИЕП образуют элементы с частотно-зависимыми параметрами и условие резонансной настройки выполняется только на определенной фиксированной частоте, целесообразно исследовать основные свойства преобразователей при отклонениях частоты питающей сети от резонансной. Связанное с этим изменение стабилизирующих свойств ИЕП можно характеризовать отношением модуля выходного тока преобразователя при текущей частоте ω к его значению при резонансной частоте ω_0 .

Изменением способа соединения секций достигается на одном и том же МИЭК три резонансных частоты.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для исследования ЧХ двухсекционного МИЭК при различных способах соединения его секций и подключения источника питания и нагрузки использован метод математического моделирования при помощи интегральных параметров МИЭК.

Для определения коэффициента стабилизации двухсекционного МИЭК с различными способами соединения секций разработаны математические модели ИЕП на их основе, описывающие электромагнитные процессы в МИЭК с помощью интегральных параметров МИЭК. На основе методики, подробно описанной в [30], в качестве интегральных параметров МИЭК выбраны полная индуктивность обкладок L , общая емкость C и токи выводов обкладок $I_{вх}$, $I_{н}$. При этом активное сопротивление обкладок МИЭК и его влияние на параметры резонансного контура не учитывается.

Произведем оценку стабилизирующих свойств, анализ ЧХ исследуемых схем. При этом расчет выполним при определенных значениях емкости и индуктивности обкладок МИЭК в функции относительной частоты $\alpha = \omega/\omega_0$.

Как видно из формул, описывающих электромагнитные процессы, происходящие в МИЭК, интегральные параметры МИЭК зависят от частоты. В связи с этим целесообразно исследовать стабилизирующие свойства МИЭК при его питании от инвертора напряжения и регулировании тока нагрузки при изменении частоты вверх и вниз от резонансной.

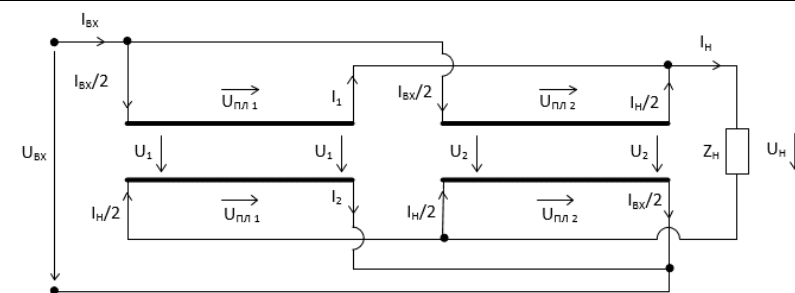
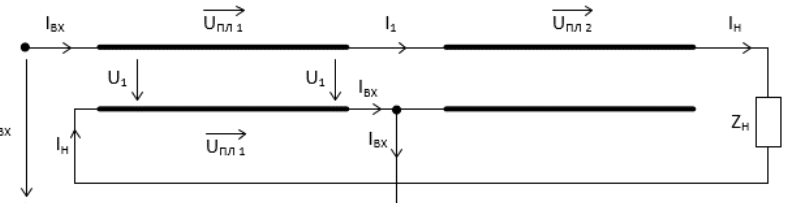
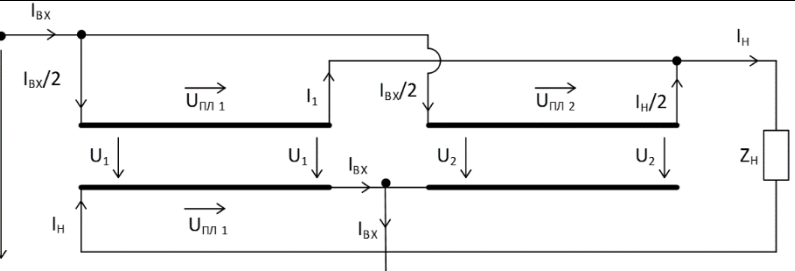
Исследуется работа схем на активную нагрузку.

На рис. 1 – 6 показаны ЧХ двухсекционного МИЭК. При этом на рисунках индексы соответствуют номеру схемы МИЭК в таблице.

На рис. 1 показана зависимость коэффициента усиления по напряжению от изменения частоты в относительных единицах для двухсекционного МИЭК при различных способах соединения секций.

Из графика видно, что схема № 3 обладает наибольшим коэффициентом усиления по напряжению ($k_{U3} = 75 > k_{U1} = 20 > k_{U2} = 13,5$).

Схематические исполнения, системы уравнений, описывающие процессы в двухсекционном МИЭК при различных способах соединения его секций и подключения источника питания и нагрузки

№	Схемы ИЕП	Математические модели МИЭК и формулы тока нагрузки
1	 Схема №1	$\begin{aligned} U_{ВХ} &= U_{пл1} + U_2 \\ U_1 &= (L_{ВХ}/2 - L_1)/(j \cdot \omega \cdot C_1) \\ U_2 &= (L_{ВХ} - L_1)/(2 \cdot j \cdot \omega \cdot C_2) \\ U_{пл1} &= j \cdot \omega \cdot L_1 \cdot (L_{ВХ} + L_1)/2 \\ U_{пл2} &= j \cdot \omega \cdot L_2 \cdot (L_{ВХ} + L_1)/2 \\ U_1 &= U_{пл1} + U_2 \\ L_1 &= L_1/2 \\ L_2 &= L_{ВХ}/2 \\ L_1 &= \omega \cdot C \cdot U_{ВХ}/(2 \cdot j) \\ L_1 &= U_{ВХ}/(2 \cdot j \cdot \omega \cdot L) \end{aligned}$
2	 Схема №2	$\begin{aligned} U_{ВХ} &= U_{пл1} + U_2 \\ U_1 &= (L_{ВХ} - L_1)/(j \cdot \omega \cdot C_1) \\ U_2 &= (L_1 - L_1)/(j \cdot \omega \cdot C_2) \\ U_{пл1} &= j \cdot \omega \cdot L_1 \cdot (L_{ВХ} + L_1)/2 \\ U_{пл2} &= j \cdot \omega \cdot L_2 \cdot L_1/2 \\ U_1 &= U_{пл1} + U_{пл2} + U_2 \\ L_1 &= L_1 \\ L_1 &= \omega \cdot C \cdot U_{ВХ}/(2 \cdot j) \\ L_1 &= U_{ВХ}/(2 \cdot j \cdot \omega \cdot L) \end{aligned}$
3	 Схема №3	$\begin{aligned} U_{ВХ} &= U_{пл1} + U_1 \\ U_1 &= (L_{ВХ}/2 - L_1)/(j \cdot \omega \cdot C_1) \\ U_2 &= (L_{ВХ} - L_1)/(2 \cdot j \cdot \omega \cdot C_2) \\ U_{пл1} &= j \cdot \omega \cdot L_1 \cdot (L_{ВХ}/2 + L_1) \\ U_{пл2} &= j \cdot \omega \cdot L_2 \cdot L_{ВХ} \\ U_1 &= U_{пл1} + U_2 \\ L_1 &= L_1/2 \\ L_2 &= L_{ВХ}/2 \\ L_1 &= \omega \cdot C \cdot U_{ВХ}/(2 \cdot j) \\ L_1 &= U_{ВХ}/(2 \cdot j \cdot \omega \cdot L) \end{aligned}$

Зависимость входного сопротивления исследуемой структуры МИЭК от изменения частоты в относительных единицах показана на **рис. 2**.

Полученная зависимость наглядно показывает, что входное сопротивление для рассматриваемых способов соединения секций МИЭК, представленных в таблице, с увеличением номера высших гармоник для режимов работы, близких к КЗ (с ростом частоты), уменьшается. Из графика видно, что для исследуемых схем МИЭК необходимое условие работы ИЕП – уменьшение входного и переходного сопротивлений с ростом частоты – выполняется: для схемы № 1 в диапазоне изменения частоты $0,05f_{рез}$ до $1,0f_{рез}$; для схемы № 2 в диапазоне изменения частоты $0,05f_{рез}$ до $1,5f_{рез}$; для схемы №3 в диапазоне изменения частоты $0,05f_{рез}$ до $0,7f_{рез}$, что свидетельствует о большей пригодности схемы МИЭК, представленной в п. 1 **таблицы**, для изготовления ИЕП на ее основе.

На **рис. 3** показана зависимость переходного сопротивления исследуемой структуры МИЭК от изменения частоты в относительных единицах.

Из графика видно, что переходное сопротивление для всех исследуемых способов соединения секций МИЭК с ростом частоты, т.е. с увеличением номера высших гармоник для режимов работы, близких к КЗ, уменьшается. При этом для схемы № 1 в диапазоне изменения частоты $0,05f_{рез}$ до $1,0f_{рез}$; для схемы № 2 в диапазоне изменения частоты $0,05f_{рез}$ до $1,5f_{рез}$, для

схемы № 3 в диапазоне изменения частоты $0,05f_{рез}$ до $1,0f_{рез}$, что свидетельствует о большей пригодности схем МИЭК, представленных в п. 2 и 3, для изготовления ИЕП на ее основе. Однако для схем № 1 и № 3 снижение переходного сопротивления с ростом частоты происходит быстрее и более значительно (до 275 См) в отличие от схемы №2 МИЭК, в которой переходная проводимость уменьшается до 575 См (в 2,1 раза большего значения), а затем увеличивается.

При этом для схемы № 1 снижение переходного сопротивления с ростом частоты происходит еще быстрее. Это крайне нежелательно из-за больших токов, которые могут возникнуть вследствие появления высших гармонических составляющих в кривой питающего напряжения.

Зависимость переходной проводимости исследуемой структуры МИЭК от изменения частоты в относительных единицах показана на **рис. 4**.

Из графика видно, что переходное сопротивление для рассматриваемых способов соединения секций МИЭК с ростом частоты уменьшается. Полученные зависимости показывают, что для исследуемых схем МИЭК необходимое условие работы ИЕП – увеличение переходной проводимости с ростом частоты – выполняется для всех схем в диапазоне изменения частоты $0,05f_{рез}$ до $1,0f_{рез}$.

Рассмотрим работу схемы при изменении коэффициента стабилизации тока в диапазоне $\pm 7 \%$.

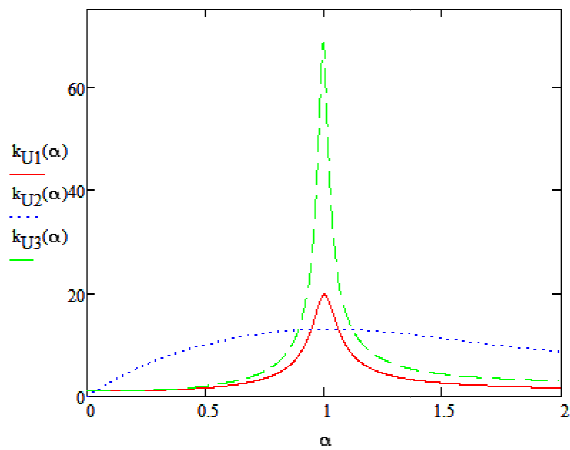


Рис. 1. АЧХ коэффициента усиления по напряжению (β) $k_u = \underline{U}_u / \underline{U}_{вх}$

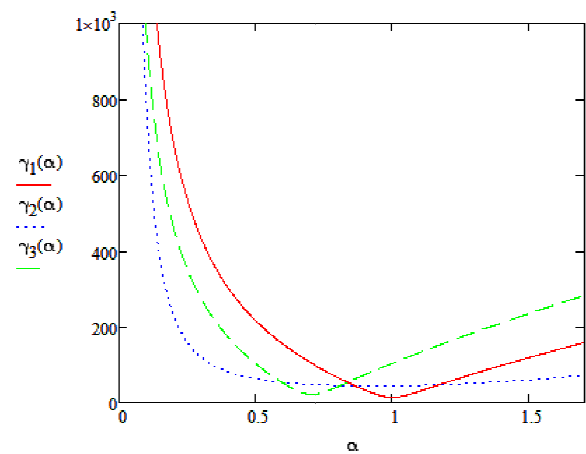


Рис. 2. АЧХ входного сопротивления (γ) $Z_{вх} = \underline{U}_{вх} / \underline{I}_{вх}$

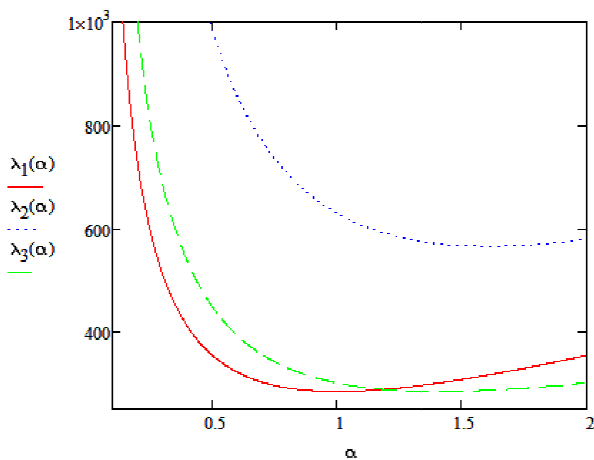


Рис. 3. АЧХ переходного сопротивления (λ) $Z_{п} = \underline{U}_п / \underline{I}_{вх}$

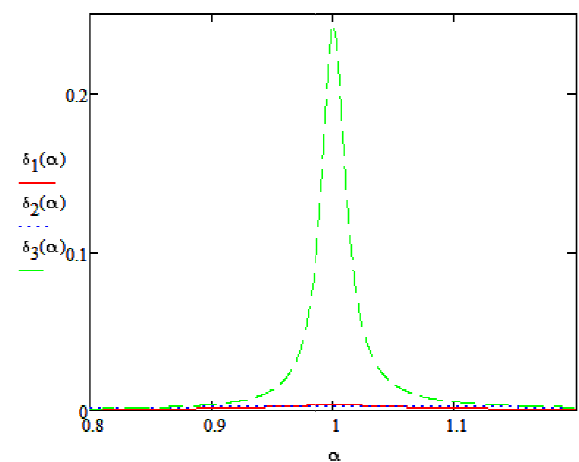


Рис. 4. АЧХ переходной проводимости (δ) $\underline{Y}_п = \underline{I}_п / \underline{U}_{вх}$

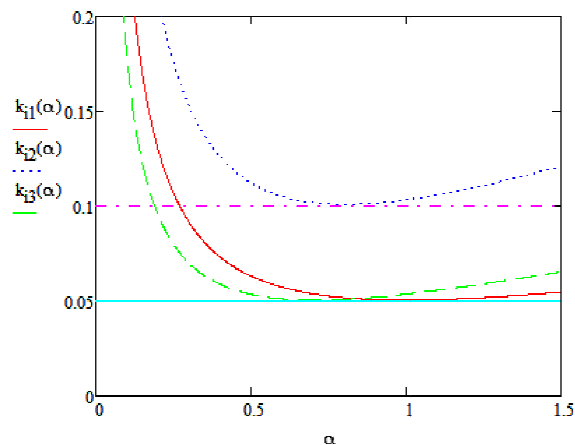


Рис. 5. АЧХ коэффициента усиления по току (ε) $k_i = \underline{I}_и / \underline{I}_{вх}$

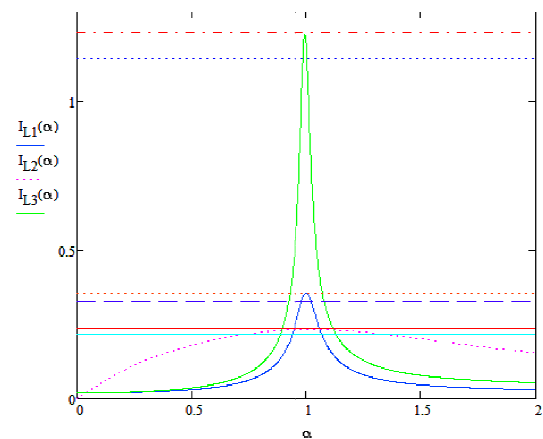


Рис. 6. График зависимости коэффициента стабилизации по току от изменения частоты в относительных единицах

На рис. 5 показана зависимость коэффициента стабилизации по току от изменения частоты в относительных единицах для двухсекционного МИЭК при различных способах соединения секций. Из графика видно, что коэффициент стабилизации тока нагрузки сохраняется: для схемы № 1 в диапазоне изменения частоты от $0,7f_{рез}$ до $1,4f_{рез}$ равным 0,05; схема № 2 от $0,7f_{рез}$ до $0,9f_{рез}$; равным 0,1; схема № 3 от $0,6f_{рез}$ до $0,9f_{рез}$ равным 0,05.

Зависимость тока нагрузки от изменения частоты в

относительных единицах при различных способах соединения обкладок секций МИЭК показана на рис. 6.

Из графика видно, что исследуемые схемы МИЭК осуществляют стабилизацию тока нагрузки в диапазоне $\pm 7\%$ при изменении частоты: схема № 1 $0,98f_{рез}$ до $1,02f_{рез}$, для схемы № 2 в диапазоне изменения частоты от $0,7f_{рез}$ до $1,3f_{рез}$, для схемы № 3 в диапазоне изменения частоты от $0,985f_{рез}$ до $1,003f_{рез}$.

Следовательно, стабильность выходного тока ИЕП при отклонении частоты питающей сети зависит не

только от способа подключения источника питания, но и способа соединения секций МИЭК, образующих его структуру.

Наименьшими отклонениями тока при изменении частоты обладает схема № 2.

Таким образом, схема № 2 обладает более подходящими свойствами для ИЕП (наилучшими стабилизирующими свойствами среди исследованных схем МИЭК), так как осуществляет стабилизацию тока нагрузки в широком диапазоне изменения частоты (от $0,7f_{рез}$ до $1,3f_{рез}$). Данная схема обладает высокими фильтрующими свойствами и может работать от несинусоидального источника напряжения.

Схема № 3 осуществляет стабилизацию тока нагрузки большей амплитуды.

Изменение сопротивления нагрузки в широких пределах не приводит к заметному изменению резонансной частоты.

По результатам исследования ЧХ двухсекционного МИЭК при различных способах подключения источника питания и нагрузки и соединения секций и стабилизационных свойств ИЕП на его основе можно сделать следующий вывод: изменение способа соединения секций позволяет расширить частотный диапазон работы ИЕП: резонансная частота может быть в диапазоне от $1,0f_{рез}$ до $1,5f_{рез}$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оценка стабилизационных свойств ИЕП на основе двухсекционного МИЭК при различных способах соединения секций МИЭК (последовательном и параллельном) и подключения источника питания и нагрузки с точки зрения оптимальности применения в ИЕП позволяет сказать, что:

– при необходимости усиления напряжения и тока и стабилизации тока в узком диапазоне изменения частоты наиболее оптимальной является схема № 1, занимающая промежуточное положение. Схема № 1 обладает более высоким коэффициентом усиления по напряжению по сравнению со схемой № 2 ($k_{U1} = 20 > k_{U2} = 13,5$), стабилизирует ток большей амплитуды ($i_{L1} = 0,352 > i_{L2} = 0,235$), но в узком диапазоне изменения частоты ($0,98f_{рез}$ до $1,02f_{рез}$). При этом схема № 1 обладает более широким частотным диапазоном ($0,98f_{рез}$ до $1,02f_{рез}$) по сравнению со схемой № 3 ($0,985f_{рез}$ до $1,003f_{рез}$), но стабилизирует ток меньшей амплитуды ($i_{L1} = 0,352 < i_{L3} = 1,23$), имеет меньший коэффициент усиления по напряжению ($k_{U1} = 20 < k_{U3} = 75$);

– схема № 2 обладает более подходящими свойствами для ИЕП (наилучшими стабилизирующими свойствами среди исследованных схем МИЭК), так как осуществляет стабилизацию тока нагрузки в широком диапазоне изменения частоты (от $0,7f_{рез}$ до $1,3f_{рез}$). Данная схема обладает высокими фильтрующими свойствами и может работать от несинусоидального источника напряжения;

– схема № 3 осуществляет стабилизацию тока нагрузки большей амплитуды ($i_{L3} = 1,23 > i_{L1} = 0,352 > i_{L2} = 0,235$), обладает наибольшим коэффициентом усиления по напряжению ($k_{U3} = 75 > k_{U1} = 20 > k_{U2} = 13,5$). Исследованные ИЕП на основе двухсекционного МИЭК могут использоваться в качестве УЗЕН при питании от источника напряжения синусоидальной формы.

Исследованные ИЕП на основе двухсекционного МИЭК могут использоваться в качестве УЗЕН при питании от источника напряжения синусоидальной формы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Конесев С.Г., Хазиева Р.Т. Индуктивно-емкостные преобразователи. Применение в электротехнике и обзор схемотехнических решений // Ресурсо-энергосбережение и эколого-энергетическая безопасность промышленных городов: сб. тр. 3-й Всерос. науч.-практ. конф.; Филиал ГОУ ВПО МЭИ. Волжский, 2010. С. 120-125.
2. Ильинский Н.Ф. Электропривод: энерго- и ресурсосбережение: учеб. пособие для вузов. М.: Изд-во Академия, 2008. 124 с.
3. Тарасов В.Т. Однофазный сварочный стабилизатор тока: пат. 2299794 РФ, БИ №15, 2007.
4. Индуктивно-емкостный преобразователь: пат. 77517 РФ. Саенко И.В., Опре В.М., Новик А.А., Кошелев П.А., Парамонов С.В., Дозоров С.А.
5. Источник неизменного тока: пат. 100687 РФ. Дозоров С.А., Кошелев П.А., Опре В.М., Парамонов С.В., Терещенко В.Н.
6. Высоковольтный источник неизменного тока: пат. 114567 РФ. Дозоров А.А., Дозоров С.А., Опре В.М., Сомов А.И., Терещенко В.Н.
7. O'Loughlin. M. An Interleaved PFC Preregulator for High-Power Converters // Topic 5: Texas Instrument Power Supply Design Seminar, 2007, pp. 5-1, 5-14.
8. Kit Sum. K. Improved valley-fill passive power factor correction current shaper approaches IEC specification limits // PCIM Magazine, Feb. 1998.
9. Chin, Shaoran A., John Tero, Milan M. Jovanovic, Raymond B. Ridley, Fred C. Lee. A New IC Controller for Resonant-Mode Power Supplies // IEEE Applied Power Electronics Conference Proceedings, Los Angeles, California, March 1990, pp. 459-466.
10. Musavi F., Eberle W., Dunford W.G. A phase shifted semi-bridgeless boost power factor corrected converter for plug in hybrid electric vehicle battery chargers // Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2011. Twenty-Sixth Annual IEEE, March 2011, pp. 821-828.
11. Morrow K., Karner D., Francfort J., Plug-in Hybrid Electric Vehicle Charging Infrastructure Review, U.S. Department of Energy - Vehicle Technologies Program, 2008.
12. Kokes M. Serienschwingkreis-Brückenwechselrichter für Mittelfrequenz. Patent DE 19624117 A1; publ. 18.12.1997.
13. John H. Alexander. Method of integrating electronic components into electronic circuit structures made using LTCC tape. Patent US 5661882 A; publ. 02.09.1997.
14. Gideon S. Grader, David W. Johnson, Jr., Apurba Roy, John Thomson, Jr. Method of making a multilayer monolithic magnetic component. Patent US 5479695 A, CA 2067008 A1, CA 2067008 C, DE 69202097 D1, DE 69202097 T2, EP 0512718 A1, EP 0512718 B1, US 5349743 A; publ. 02.01.1996.
15. Dale F. Regelman, Waseem A. Roshen, David E. Turcotte. Integrated power capacitor and inductors/transformers utilizing insulated amorphous metal ribbon. Patent US 4922156 A, DE 68908234 D1, DE 68908234 T2, EP 0336771 A2, EP 0336771 A3, EP 0336771 B1; publ. 01.05.1990.
16. Dale F. Regelman, Waseem A. Roshen, David E. Turcotte. Transformer/inductor with integrated capacitor using soft ferrites. Patent US 4837659 A, DE 68900037 D1, EP 0334520 A1, EP 0334520 B1; publ. 06.06.1989.
17. Дозоров С.А., Опре В.М. Электромагнитные процессы в трехфазных индуктивно-емкостных преобразователях // Силовая электроника. 2014. №46. С. 61-64.
18. Карла Х. Смит, Роберт М. VonHoene. Magnetic cores utilizing metallic glass ribbons and mica paper interlaminar in-

- sulation. Patent US 5091253 A, CA 2079324 A1, CA 2079324 C, DE 69100720 D1, DE 69100720 T2, EP 0528883 A1, EP 0528883 B1, WO1991018404 A1; publ. 25.02.1992.
19. Компьютерная модель системы заряда емкостного накопителя на основе индуктивно-емкостного преобразователя / С.Г. Конесев, Р.Т. Хазиева, Р.В. Кириллов, П.А. Хлюпин // Нефтегазовое дело. Электронный научный журнал. 2015. №4. С. 374-390. URL: http://ogbus.ru/issues/4_2015/ogbus_4_2015_p374-390_KonesevSG_ru.pdf (дата обращения: 09.09.2015).
 20. Месяц Г.А. Импульсная энергетика и электроника. М.: Наука, 2004. 704 с.
 21. Импульсный стабилизатор тока: пат. 2194352 РФ. Лачин В.И., Проус В.Р., Зиновьев Н.Д.
 22. Зарядное устройство: пат. 123266 РФ. Опре В.М., Кошелев П.А., Парамонов С.В., Дозоров С.А., Тимахович А.А.
 23. Burghartz J.N., Edelstein D.C., Jahnes C.V., Uzoh C.E. Integrated circuit spiral inductor. Patent US 6114937 A, US 5793272 A, US 5884990 A, US 6054329 A4; publ. 05.09.2000.
 24. Многофункциональный интегрированный электромагнитный компонент: пат. 2585248 РФ. Конесев С.Г.
 25. Устройство заряда емкостного накопителя: пат. 117748 РФ. Конесев С.Г., Хазиева Р.Т., Мухаметшин А.В., Кириллов Р.В., Садиков М.Р.
 26. Генератор импульсов напряжения: пат. 2477918 РФ. Конесев С.Г., Хазиева Р.Т., Кириллов Р.В., Мухаметшин А.В., Садиков М.Р.
 27. Конесев С.Г., Хазиева Р.Т., Конесев И.С., Нурлыгаянов А.Р. Индуктивно-емкостный преобразователь // Патент РФ на изобретение №2450413 от 10.05.2012. БИ №13, 2012.
 28. Конесев С.Г., Хазиева Р.Т., Кириллов Р.В. Анализ энергетических и частотных характеристик многофункциональных интегрированных электромагнитных компонентов // Энергетические и электротехнические системы: междунар. сб. науч. тр. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2014. С. 65-75.
 29. Конесев С.Г., Хазиева Р.Т. Оценка показателей надежности многофункциональных интегрированных электромагнитных компонентов // Современные проблемы науки и образования. Электронный научный журнал. 2015. №1. URL: <http://www.science-education.ru/121-18445> (дата обращения: 09.04.2015).
 30. Конесев С.Г., Хазиева Р.Т., Кириллов Р.В. Исследование частотных характеристик двухсекционных многофункциональных интегрированных электромагнитных компонентов // Вестник УГАТУ, 2015. Т.19 №.4 (70). С. 66-71.

Поступила в редакцию 20 июля 2016 г.

INFORMATION IN ENGLISH

STABILIZATION PROPERTIES OF INDUCTIVE-CAPACITIVE CONVERTERS WITH DIFFERENT CONNECTION METHODS OF HYBRID ELECTROMAGNETIC ELEMENTS

Sergey G. Konesev

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, the Department of Electrical Engineering and Electrical Equipment of Enterprises, Ufa State Oil Technical University, Ufa, Russia. E-mail: KonesevSG@yandex.ru.

Regina T. Khazieva

Post-graduate student, the Department of Electrical Engineering and Electrical Equipment of Enterprises, Ufa State Oil Technical University, Ufa, Russia. E-mail: khazieva@mail.ru.

The authors proposed to supply the load with the help of inductive-capacitive converters (ICC) based on hybrid electromagnetic elements (EME), which are referred to as multifunctional integrated electromagnetic components (MIEC). The use of hybrid EME can reduce the weight and size, increase the efficiency and reliability of current stabilization systems (CSS). The goal of the article is to investigate the stabilization properties of the three schemes proposed by the authors of IEP, based on the two-section MIEC with the different methods of connection MIEC sections and connection of the power supply and the load. The authors carried out the research and analysis of the frequency response (FR), evaluated the gains of voltage and current, power factor stabilizing the ICC based on the two-section MIEC with the different methods of connection MIEC sections and connection of the power supply and the load. Scheme no.1 has a higher voltage gain as compared with the scheme no.2 ($k_{U1} = 20 > k_{U2} = 13.5$), it stabilizes the current of greater amplitude ($i_{L1} = 0.352 > i_{L2} = 0.235$), but in a narrow frequency range (from $0.98f_{res}$ to $1.02f_{res}$). Thus, circuit №1 has a wide frequency range as compared with the scheme №3 (from $0.985f_{res}$ to $1.003f_{res}$), but it stabilizes current of smaller amplitude ($i_{L1} = 0.352$) and has a smaller voltage gain ($k_{U1} = 20 < k_{U3} = 75$). Scheme no.2 has the best stabilizing properties among the two-section schemes of MIEC. Scheme no.2 provides stabilization of the load current over a wide frequency range (from $0.7f_{res}$ to $1.3f_{res}$). This scheme has high filtering properties and can be operated by a non-sinusoidal voltage source. Scheme no.3 provides stabilization of

greater amplitude of the load current ($i_{L3} = 1.23$). It has the highest voltage gain ($k_{U3} = 75$). The investigated ICC based on the two-section MIEC can be used as capacitive storage charge devices powered by the source voltage sine wave.

Keywords: Stability criteria, converters, current supply, mathematical model, current-voltage characteristics, multifunctional integrated electromagnetic component, inductive-capacitive converter, frequency response, current stabilization, current stability.

REFERENCES

1. Konesev S.G., Khazieva R.T. Inductive-capacitive transducers. Application in electrical engineering and a review of circuit solutions. *Resurso-energobezrezhenie i ekologo-energeticheskaya bezopasnost' promyshlennykh gorodov: sb. tr. 3-y Vseros. nauch.-prakt. konf* [Resource-saving and environmental-energy security of industrial cities, the 3rd national conf.] MEI, Volga Publ., 2010, pp. 120–125. (In Russian)
2. Ilyinsky N.F. *Elektroprivod: energo- i resursosbezrezhenie* [Electric drive: energy and resource saving: a textbook for high schools.]. Moscow, Publishing House of the Academy, 2008. 124 p.
3. Tarasov V.T. *Odnofaznyi svarochnyi stabilizator toka* [Alternating welding current stabilizer], Patent RF, no. 2299794, 2007.
4. Saenko I.V., Opre V.M., Novik A.A., Koshelev P.A., Paramonov S.V., Dozorov S.A. *Induktivno-yomkostnyi*

- preobrazovatel* [Inductive-capacitive converter]. Patent RF, no. 77517, 2008.
5. Dozorov S.A., Koshelev P.A., Opre V.M., Paramonov S.V., Tereshchenko V.N. *Istochnik neizmennogo toka* [A constant current source]. Patent RF, no. 100687, 2010.
 6. Dozorov A.A., Dozorov S.A., Opre V.M., Somov A.I., Tereshchenko V.N. *Vysokovolnyi istochnik neizmennogo toka* [High-voltage constant current]. Patent RF, no. 114567, 2012.
 7. O'Loughlin. M. An Interleaved PFC Preregulator for High-Power Converters. Topic 5: Texas Instrument Power Supply Design Seminar, 2007, pp. 5-1, 5-14.
 8. Kit Sum. K. Improved valley-fill passive power factor correction current shaper approaches IEC specification limits. PCIM Magazine, Feb. 1998.
 9. Chin, Shaoan A., John Tero, Milan M. Jovanovic, Raymond B. Ridley, Fred C. Lee. A New IC Controller for Resonant-Mode Power Supplies. IEEE Applied Power Electronics Conference Proceedings, Los Angeles, California, March 1990, pp. 459-466.
 10. Musavi F., Eberle W., Dunford W.G. A phase shifted semi-bridgeless boost power factor corrected converter for plug in hybrid electric vehicle battery chargers. Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2011. Twenty-Sixth Annual IEEE, March 2011, pp. 821-828.
 11. Morrow K., Karner D., Francfort J., Plug-in Hybrid Electric Vehicle Charging Infrastructure Review, U.S. Department of Energy - Vehicle Technologies Program, 2008.
 12. Kokes M. Serienschwingkreis-Brückenwechselrichter für Mittelfrequenz. Patent DE 19624117 A1; publ. 18.12.1997.
 13. John H. Alexander. Method of integrating electronic components into electronic circuit structures made using LTCC tape. Patent US 5661882 A; publ. 02.09.1997.
 14. Gideon S. Grader, David W. Johnson, Jr., Apurba Roy, John Thomson, Jr. Method of making a multilayer monolithic magnetic component. Patent US 5479695 A, CA 2067008 A1, CA 2067008 C, DE 69202097 D1, DE 69202097 T2, EP 0512718 A1, EP 0512718 B1, US 5349743 A; publ. 02.01.1996.
 15. Dale F. Regelman, Waseem A. Roshen, David E. Turcotte. Integrated power capacitor and inductors/transformers utilizing insulated amorphous metal ribbon. Patent US 4922156 A, DE 68908234 D1, DE 68908234 T2, EP 0336771 A2, EP 0336771 A3, EP 0336771 B1; publ. 01.05.1990.
 16. Dale F. Regelman, Waseem A. Roshen, David E. Turcotte. Transformer/inductor with integrated capacitor using soft ferrites. Patent US 4837659 A, DE 68900037 D1, EP 0334520 A1, EP 0334520 B1; publ. 06.06.1989.
 17. Dozorov S.A., Opre V.M. Electromagnetic processes in the three-phase inductive-capacitive converters. *Silovaya elektronika* [Power electronics], 2014, no. 46, pp. 61-64. (In Russian)
 18. Charles H. Smith, Robert M. VonHoene. Magnetic cores utilizing metallic glass ribbons and mica paper interlaminar insulation. Patent US 5091253 A, CA 2079324 A1, CA 2079324 C, DE 69100720 D1, DE 69100720 T2, EP 0528883 A1, EP 0528883 B1, WO1991018404 A1; publ. 25.02.1992.
 19. Konesev S.G., Khazieva R.T., Kirillov R.V., Khlopun P.A. Computer model of the capacitive storage charge system based on inductive-capacitive transducer. *Neftegazovoe delo. Elektronnyy nauchnyy zhurnal* [Oil and Gas Business: electronic scientific journal], 2015, no. 4, pp. 374-390. Available at: http://ogbus.ru/issues/4_2015/ogbus_4_2015_p374-390_KonesevSG_ru.pdf (Accessed 09.09.2015). (In Russian)
 20. Mesyats G.A. *Impulsnaya energetika i elektronika* [Pulsed power and electronics], Moscow, Science Publ., 2004. 704 p.
 21. Lachin V.I., Prous V.R., Zinoviyev N.D. *Impul'snyi stabilizator toka* [DC switching regulator]. Patent RF, no. 2194352, 2002.
 22. Opre V.M., Koshelev P.A., Paramonov S.V., Dozorov S.A., Timokhovitch A.A. *Zaryadnoe ustroystvo* [Charging device]. Patent RF, no. 123266, 2012.
 23. Burghartz J.N., Edelstein D.C., Jahnes C.V., Uzoh C.E. Integrated circuit spiral inductor. Patent US 6114937 A, US 5793272 A, US 5884990 A, US 6054329 A4; publ. 05.09.2000.
 24. Konesev S.G. *Mnogofunktsionalnyi integrirovannyi elektromagnitnyi component* [Multifunctional integrated electromagnetic component]. Patent RF, no. 2585248, 2016.
 25. Konesev S.G., Khazieva R.T., Kirillov R.V., Muhametshin A.V., Sadikov M.R. *Ustroystvo zaryada yomkostnogo nakopitelya* [Capacitive storage device charge]. Patent RF, no. 117748, 2012.
 26. Konesev S.G., Khazieva R.T., Kirillov R.V., Muhametshin A.V., Sadikov M.R. *Generator impul'sov napryazheniya* [Voltage pulse generator]. Patent RF, no. 2477918, 2013.
 27. Konesev S.G., Khazieva R.T., Konesev I.S., Nurlygayanov A.R. *Induktivno-yomkostnyi preobrazovatel* [Inductive-capacitive converter]. Patent RF, no. 2450413, 2012.
 28. Konesev S.G., Kirillov R.V., Khazieva R.T. Analysis of energy and frequency characteristics of the multifunction integrated electromagnetic components. *Energeticheskie i elektrotekhnicheskie sistemy: mezhdunar. sb. nauch. tr.* [Energy and electrical systems: university collection of scientific articles], Magnitogorsk, 2014, pp. 65-75.
 29. Konesev S.G., Khazieva R.T. Evaluation of reliability indices multifunctional integrated electromagnetic components. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya. Elektronnyy nauchnyy zhurnal* [Modern problems of science and education: electronic scientific journal], 2015, no. 1. Available at: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=18445>.
 30. Konesev S.G., Khazieva R.T., Kirillov R.V. Research of frequency responses of the two-section multifunctional integrated electromagnetic components. *Vestnik UGATU* [Vestnik of UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University)], 2015, vol. 19, no. 4 (70), pp. 66-71.

Конесев С.Г., Хазиева Р.Т. Анализ стабилизационных свойств индуктивно-емкостных преобразователей при различных способах подключения гибридных электромагнитных элементов // Электротехнические системы и комплексы. 2017. №1(34). С. 49-55. doi: 10.18503/2311-8318-2017-1(34)-49-55

Konesev S.G., Khazieva R.T. Stabilization Properties of Inductive-Capacitive Converters with Different Connection Methods of Hybrid Electromagnetic Elements. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2017, no.1(34), pp. 49-55. (In Russian) doi: 10.18503/2311-8318-2017-1(34)-49-55

Хуснутдинов А.Н., Идиятуллин Р.Г., Аухадеев А.Э., Филина О.А.

ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»

ОПЫТ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭЛЕКТРОЩЕТОК С ПОВЫШЕННЫМ РЕСУРСОМ В РЕАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

В работе описывается применение разрезной электрощетки с повышенным ресурсом. Приводится сравнение электрощеток серийных заводских с предлагаемыми по конструктивным, надежностным и стоимостным характеристикам. Предложен метод совершенствования конструкций серийных электрощеток и построена диаграмма динамических характеристик.

Ключевые слова: электрическая машина, электрощетка, графитовая вставка, ресурс, коммутация, коллектор, переходное сопротивление.

ВВЕДЕНИЕ

Эксплуатация электрических машин подвижного состава предполагает периодическую замену электрических щеток, подверженных механическому и электроэрозионному износу.

Исследования, проведенные в условиях эксплуатации, показывают, что ресурс серийной электрощетки имеет значительную дисперсию из-за влияния различных эксплуатационных факторов. Он значительно ниже по сравнению с расчетными значениями. Это объясняется влиянием неблагоприятных факторов, заложенных на заводе-изготовителе: низким качеством материалов; технологическими отклонениями (отклонение геометрии коллектора из-за усадки изоляции); плохой настройкой зоны безыскровой работы машины; низким качеством балансировки вращающихся частей машины и др. Все эти факторы ускоряют износ электрощеток и снижают их ресурс.

Многолетние исследования показывают, что бороться с этими негативными явлениями просто невозможно, т.е. этот путь является неэффективным. Требуется большая работа по созданию более жестких нормативных актов для изготовления электрических машин; коренное обновление технологического оборудования на заводах-изготовителях и др. Необходим поиск эффективных технологических путей решения, направленных на повышение ресурса, технологичности, снижение себестоимости и повышение эксплуатационной надежности электрощеток [1 – 3].

ОПИСАНИЕ ЭЛЕКТРОЩЕТОК С ПОВЫШЕННЫМ РЕСУРСОМ

Рекомендуемая электрощетка принципиально отличается по конструктивным признакам и по сроку эксплуатации от существующих. Данная электрощетка является составной [4], в то время как существующие конструкции электрощеток цельные. Химический состав и пропорции компонентов составных электрощеток, их размеры не отличаются от серийных. Конструктивные параметры электрической машины и щеткодержателя также остаются неизменными. Это подтверждает отсутствие малейшего технологического риска при эксплуатации нового вида электрощеток [5,6].

Основной идеей проекта является увеличение срока эксплуатации (ресурса) электрощеток электрических машин (дополнительно от 30 до 44 %) в зависимости от их конструкции.

При эксплуатации электродвигателя происходит постоянный непрерывный износ электрощеток. Изношенные щетки не восстанавливаются и подлежат замене вместе с дорогостоящими элементами конструкции:

- 1) провод гибкий неизолированный плетеный. Материал – рафинированная медь;
- 2) наконечники луженые. Материал – медь;
- 3) неизношенная часть электрощетки (электрощетка изнашивается на 2/3 своей высоты). Материал – графит, сажа, медь;
- 4) материалы для соединения токоведущего провода с угольно-графитовой частью щетки (конопатка, электропроводящий клей).

Ориентировочная стоимость недоиспользованной верхней части электрощетки составляет 40 % от общей ее стоимости.

Предлагаемая технология позволяет использовать верхнюю (недоиспользованную) часть электрощетки многократно при применении сменной вставки, что существенно снижает эксплуатационные затраты. Весь процесс замены сменной вставки значительно облегчает работу обслуживающего персонала и сокращает время профилактических работ до 70 %. Это достигается тем, что отпадает необходимость отворачивания и закрепления болта наконечника токопроводящего шунта электрощетки.

На **рис. 1** приведено схематическое изображение серийной электрощетки с указанием основных ее составляющих.

Составная электрощетка функционально подобна серийной. Основное отличие заключается в ее конструкции. Она состоит из двух частей: основной, посредством которой осуществляется подвод электроэнергии от щеткодержательного аппарата, и сменной графитовой вставки. По мере эксплуатации электрической машины сменная графитовая вставка изнашивается практически полностью и во время профилактического осмотра, ремонта заменяется на новую.

В состав основной части новой электрощетки входят дорогостоящие элементы конструкции, описанные выше. За счет того, что изнашиваемой

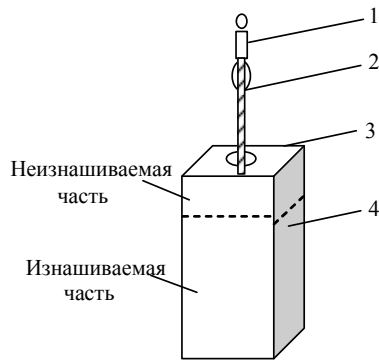


Рис. 1. Конструкция серийной электрощетки:
1 - наконечник луженый; 2 - медный провод гибкий
неизолированный плетеный; 3 - материалы
для соединения токоведущего провода с угольно-
графитовой частью щетки (конопатка,
электропроводящий клей);
4 - угольно-графитовая часть

частью электрощетки при правильной ее эксплуатации является сменная графитовая вставка, верхняя ее часть не изнашивается и не требует замены. Это показывает очевидную возможность экономии на дорогостоящих элементах конструкции, которые являются отходами при эксплуатации серийной электрощетки. Таким образом, применение составной электрощетки исключает возможность недоиспользования заложенного ресурса электрощетки.

Возможность широкого применения предлагаемой конструкции электрощетки определяется стандартной конструкцией щеткодержательного аппарата. Данное устройство предназначено для обеспечения точного положения электрощеток на коллекторе и надежного контакта. Конструкция щеткодержателя должна обеспечивать также практически стабильное нажатие на щетку независимо от степени износа её по высоте, надежную изоляцию от корпуса. В щеткодержателе электрощетки устанавливаются в специальные гильзы. Техническое состояние щеткодержательного узла должно удовлетворять ТУ на их эксплуатацию.

На **рис. 2** показан фрагмент серийного щеткодержательного аппарата. В гильзе щеткодержательного аппарата 1 располагается верхняя часть составной электрощетки 2 и нижняя сменная графитовая вставка 3, скользящая по коллектору 4 электрической машины. Прижим электрощетки к коллектору осуществляется пружиной 5. Данное усилие создает надежный контакт в контактной поверхности 6 между основной частью составной электрощетки и сменной графитовой вставкой. Для осмотра технического состояния электрощеток и замены предельно изношенной нижней сменной части используется специальный съемник 8. Острие съемника 8 вводится в отверстие 7 нижней сменной части 3. Затем съемником 8 нижняя сменная часть 3 вынимается из гильзы щеткодержателя 1.

Рекомендуемая электрощетка с увеличенным ресурсом прошла успешные испытания в реальных условиях эксплуатации на опытном парке троллейбусов и трамваев в МУП «Метроэлектротранс» (г. Казань), а также на базе ОАО «Нижнекамскнефтехим» (г. Нижнекамск) и ООО «Электротранспорт» (г. Набережные Челны). Данные испытания подтвердили повышение ресурса и надежность ее эксплуатации как на подвиж-

ном составе, так и на синхронных машинах. Ежегодные осмотры электродвигателей, оборудованных составными электрощетками показали отсутствие каких-либо следов нежелательных процессов в электродвигателях (искрение, местное выгорание коллекторных пластин, разрушение щеток, «круговой огонь», перенапряжение в обмотках, возникновение пульсаций тока, приводящих к динамическим биениям якоря тягового электродвигателя и др.).

По мере износа сменных вставок электрощеток с повышенным ресурсом требуется их замена. Для улучшения условий коммутации новых вставок рекомендуется их предварительная притирка под радиус коллектора. Для этого разработана шлифовальная матрица (**рис. 3**). Удобство обращения и небольшие габариты позволяют ускорить процесс установки сменных вставок, что, в свою очередь, помогает до минимума сократить время простоя электрической машины.

Динамические характеристики исследуемых разрезных электрощеток приведены на **рис. 4** [7, 8].

Использование разрезных электрощеток позволяет:

1. Снизить силу удара коллектора.
2. Раздвинуть во времени импульсы ударов F_2 и F_3 .
3. Снизить уровень отрыва электрощетки от поверхности коллектора.
4. Улучшить коммутацию и снизить переходное сопротивление в переходном контакте (коллектор – щетка).
5. За счет снижения уровня воздействия механических и электрических (коммутационных) факторов снизить износ элементов трущейся пары – коллектора и электрощеток.

Существующая технологическая схема эксплуатации электрощеток является неэффективной. Она приводит:

- к недоиспользованию ресурса электрощеток и в отдельных случаях может достигать 44 %;
- перерасходу меди;
- значительным трудозатратам при их обслуживании.

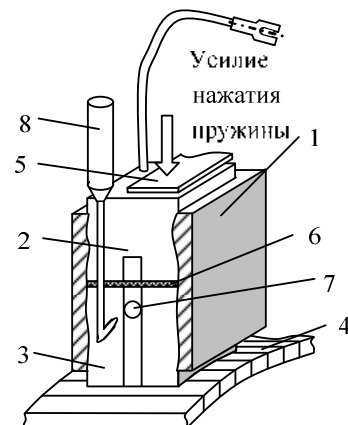


Рис. 2. Схематическое изображение гильзы щеткодержательного аппарата с составной электрощеткой: 1 – гильза щеткодержательного аппарата; 2 – верхняя часть составной электрощетки; 3 – нижняя сменная вставка; 4 – коллектор; 5 – пружина щеткодержателя; 6 – контактная поверхность между частями составной электрощетки; 7 – отверстие для съемника сменной графитовой вставки; 8 – съемник

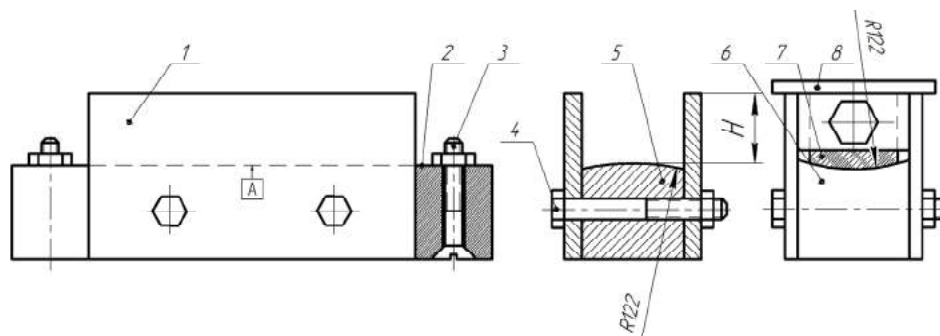


Рис. 3. Матрица шлифовальная:

1 – щека; 2 – абразивный шлифовальный лист; 3 – винт; 4 – болт; 5 – матрица (с выгнутым рельефом); 6 – матрица (с вогнутым рельефом); 7 – электрощетка; 8 – щеткодержатель на 2 электрощетки

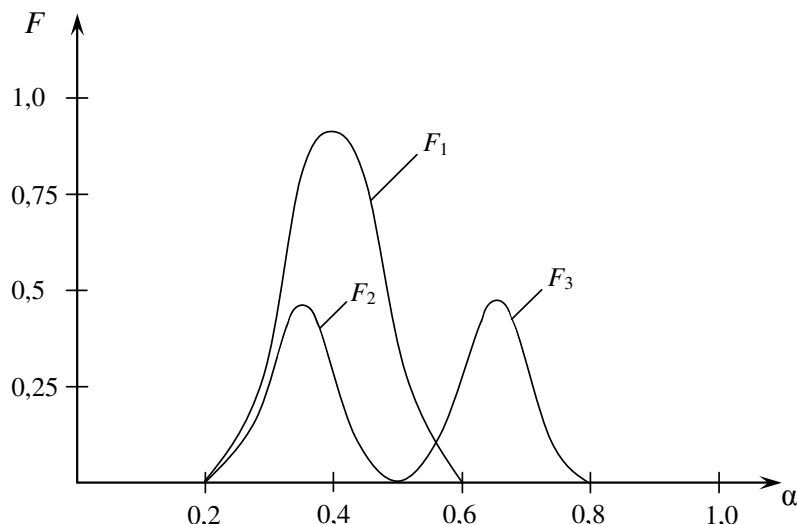


Рис. 4. Динамические характеристики разрезных электрощеток:

F_1 – импульс от удара монолитной электрощетки; F_2 – импульс от удара верхней части электрощетки; F_3 – импульс от удара нижней вставки

В связи с этим рекомендуется новая технология эксплуатации электрощеток электрических машин, позволяющая устранить указанные недостатки. При этом конструкция щеткодержателей электрических машин и марка электрощеток не изменяется. Проведенные лабораторные и эксплуатационные исследования подтвердили обоснованность использования новой технологии эксплуатации электрощеток. Их работа на тяговых двигателях городского электрического транспорта (трамваи и троллейбусы), электровозах и тепловозах дали обнадеживающие результаты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, на основании проведенных эксплуатационных испытаний на тепловозах, электровозах (Казанское отделение Горьковской железной дороги), трамваях, троллейбусах (МУП «Метроэлектротранс», г. Казань) получены следующие важные результаты:

- ресурс электрощеток, используемых по новой технологии, по сравнению с существующими увеличивается на 30% и более, в зависимости от высоты электрощетки;
- стоимость новой электрощетки снижается на 28,8%;
- трудозатраты сокращаются до 70%; срок окупаемости равен нулю.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ермуратский П.В., Косякин А.А., Листвин А.С. Справочное пособие по основам электротехники и электроники. М.: Энергоатомиздат, 1995. 353 с.
2. Справочник по электрическим машинам / под общ. ред. И.П. Копылова Т.1. М.: Энергоатомиздат, 1988. 453 с.
3. Справочник по электрическим машинам / под общ. ред. И.П. Копылова Т.2. М.: Энергоатомиздат, 1988. 688 с.
4. Щеточный узел электрической машины: пат. 64821 Рос. Федерация, МПК Н 01 R 39/40/ Идиятуллин Р.Г.; заявитель и патентообладатель Идиятуллин Р.Г. №2007102195/22; опубл. 19.01.2007.
5. Литвиненко Р.С., Идиятуллин Р.Г., Аухадеев А.Э. Моделирование отказов электротехнического комплекса и его элементов на этапе разработки // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2015. № 4. Т. 11. С. 17 – 25.
6. Оценка эксплуатационной надежности тяговых генераторов / Р.Г. Идиятуллин, А.Н. Хуснутдинов, А.М. Вдовин, А.В. Попов, Л.Н. Киснеева // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2012. №1 1-12. С. 108 – 114.
7. Филина О.А., Идиятуллин Р.Г. Аппроксимация вольтамперной характеристики щеточного контакта составной щетки с повышенным ресурсом // Современные тенденции развития науки и техники. 2015. № 8-1. С.134 – 136.
8. Хуснутдинов А.Н., Рыбаков Р.Б., Аллямова Н.М. Применение итерационных методов при проектировании электрических машин // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2014. №1-2. С.272 – 274.

Поступила в редакцию 29 сентября 2016 г.

INFORMATION IN ENGLISH

OPERATING EXPERIENCE OF COLLECTOR BRUSHES WITH IMPROVED SERVICE LIFE IN REAL-LIFE OPERATING CONDITIONS

Azat N. Khusnutdinov

Lecturer, the Department of Electrotechnical complexes and systems, Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. e-mail: aktuba@mail.ru

Rinat G. Idiyatullin

D.Sc. (Engineering), Professor, the Department of Electrotechnical complexes and systems, Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. E-mail: mcelt@rambler.ru

Aver E. Aukhadeev

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, the Department of Electrotechnical complexes and systems, Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. E-mail: aukhadeevkgma@rambler.ru

Ol'ga A. Filina

Assistant Professor, the Department of Electrotechnical complexes and systems, Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. E-mail: olga_yuminova83@mail.ru

The paper describes the application of split brushes with improved service life. Conventional brushed are compared with the modified ones by such characteristics as design features, reliability and cost. The suggested method improves the design of collector brushes; the diagram of dynamic characteristics is also given in the paper.

Keywords: Electrical machine, collector brush, graphite insertion, service life, switching, collector, transient resistance.

REFERENCES

1. Ermuratsky P. V., Kosyakin A. A., Listvin A. S. *Spravochnoe posobie po osnovam elektrotekhniki i elektroniki* [Reference book on fundamentals of electrical equipment and Electronics]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1995. 353 p.
2. *Spravochnik po elektricheskim mashinam* [Reference book on electrical machines]. Under the general editorship of I.P. Kopylov. Vol. 1. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1988. 453 p.
3. *Spravochnik po elektricheskim mashinam* [Reference book on electrical machines]. Under the general editorship of I.P. Kopylov. Vol. 2. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1988. 688 p.
4. Idiyatullin R. G. *Schetochnyi uzel elektricheskoy mashiny* [Brush group of the electrical machine]. Patent RF, no. 2007102195/22, 2007.
5. Litvinenko R. S., Idiyatullin R. G., Aukhadeev A.E. Failure simulation of an electrotechnical complex and its elements at the development stage. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy* [Electrotechnical and information complexes and systems], 2015, no. 4, vol. 11, pp. 17 – 25. (In Russian)
6. Idiyatullin R. G., Khusnutdinov A.N., Vdovin A. M., Popov A. V., Kisneeva of L. N. Assessment of operational reliability of traction generators. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki* [News of higher educational institutions. Power problems], 2012, no. 11-12, pp. 108 – 114. (In Russian)
7. Filina O. A., Idiyatullin R. G. Approximation of volt-ampere characteristic of brush contact of a compound brush with improved service life. *Sovremennye tendentsii razvitiya nauki i tekhniki* [Current trends of development of science and technology], 2015, no. 8-1, pp. 134 – 136. (In Russian)
8. Khusnutdinov A. N., Rybakov R. B., Allyamova N. M. Application of iterative methods when designing electrical machines. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka* [Scientific problems of transport of Siberia and the Far East], 2014, no. 1-2, pp. 272 – 274. (In Russian)

Хуснутдинов А.Н., Идиятуллин Р.Г., Аухадеев А.Э., Филина О.А. Опыт эксплуатации электрощеток с повышенным ресурсом в реальных технологических условиях // Электротехнические системы и комплексы. 2017. №1(34). С. 56-59. doi: 10.18503/2311-8318-2017-1(34)-56-59

Khusnutdinov A.N., Idiyatullin R.G., Aukhadeev A.E., Filina O.A. Operating Experience of Collector Brushes with Improved Service Life in Real-life Operating Conditions. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2017, no.1(34), pp. 56-59. (In Russian) doi: 10.18503/2311-8318-2017-1(34)-56-59

Зюзев А.М., Метельков В.П.

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД ОЦЕНКИ НАГРЕВА ОБМОТКИ РОТОРА ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ В ПУСКОВЫХ РЕЖИМАХ

Для снижения просадки напряжения в процессе запуска высоковольтных асинхронных двигателей широко используются устройства плавного пуска на основе тиристорных преобразователей напряжения. При таком запуске высокоинерционных электроприводов наблюдается перегрев роторной обмотки двигателя, что вызывает серьезный термомеханический стресс для элементов ротора, приводящий к выходу машины из строя. Целью работы является получение аналитических соотношений для приближенной оценки перегрева обмотки ротора в пусковых режимах. В работе применялись аналитические методы на основе интегральных уравнений Фредгольма и численное моделирование на основе метода тепловых схем в пакете Matlab/Simulink. На основе решения уравнения Фредгольма второго рода получены аналитические соотношения для расчета максимума температуры обмотки ротора при пуске с учетом теплоотдачи в окружающую среду. Результаты расчетов по этим выражениям были проверены с помощью комплексной модели, которая включает в себя все элементы привода от питающей сети до рабочего механизма. Показано, что адиабатический подход для оценки максимума температуры роторной обмотки при пуске, не учитывающий теплоотдачу в окружающую среду, может приводить к существенной ошибке. Получены аналитические выражения, позволяющие выполнить приближенный учет неравномерности распределения температуры вдоль обмотки ротора при оценке ее максимальной температуры. Обоснован подход, который позволяет выполнить оценку максимума температуры обмотки в пусковых режимах на основе соотношений, устанавливающих взаимосвязь между температурой элементов двигателя и энергией, которая выделяется в них и передается в окружающую среду, без решения дифференциальных уравнений, которые описывают изменение температуры во времени. Полученные результаты позволяют провести оценку максимальной температуры обмотки ротора в пусковых режимах без привлечения методов численного моделирования, для использования которых у проектировщика электропривода зачастую недостаточно информации о конструктивных особенностях двигателя.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, обмотка ротора, интегральное уравнение Фредгольма, тепловая модель, термомеханический стресс.

ВВЕДЕНИЕ

Прямой пуск высоковольтных асинхронных двигателей (АД) сопровождается пусковыми токами, в 5-7 раз превышающими номинальный ток. Столь высокие токи могут вызывать просадки напряжения сети, превышающие допустимые значения. Для уменьшения этого эффекта широко используются устройства плавного пуска на основе тиристорных преобразователей напряжения (ТПН). Однако использование таких устройств приводит к проблемам, связанным с перегревом обмоток машины, особенно в высокоинерционных приводах. Согласно некоторым источникам [1, 2] температура обмотки ротора при пуске может достигать 600 °С. Это вызывает серьезный термомеханический стресс для элементов ротора АД, что может приводить к выходу машины из строя [3, 4]. На **рис. 1** показан выход стержня ротора двигателя АДЧР-1600-6.0-4У1 из паза вследствие перегрева при запуске многоступенчатого нагнетателя типа RC 4A-3N-95 фирмы MAN TURBO AG (фото предоставлено ОАО «Соликамскбумпром»). Указанные обстоятельства свидетельствуют о том, что, несмотря на отсутствие изоляции у обмотки ротора, и, следовательно, отсутствие проблем, связанных с ускоренным истощением термического ресурса изоляции, проблема оценки теплового состояния обмотки ротора АД в пусковых режимах является актуальной. В частности, представляет интерес получение простых способов приближенной оценки нагрева обмотки ротора, поскольку не всегда имеется достаточно информации для детального моделирования.



Рис. 1. Выход стержня ротора двигателя АДЧР-1600 из паза

РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ

Адиабатический подход

Известны упрощенные методы расчета подъема температуры в процессе пуска, основанные на адиабатическом подходе [5]. Тем не менее подъем средней температуры $\Delta\theta_r$ элементов ротора, имеющих теплоемкость C_r , в течение времени пуска (t_n) будет определяться разностью между выделившейся в этих элементах энергией ($W_{\Sigma r}$) и энергией, ушедшей в окружающую среду (W_{out}):

$$\Delta\theta_r = (W_{\Sigma r} - W_{out}) / C_r. \quad (1)$$

а) Джоулевы потери в обмотке ротора

В [6, 7] показано, что в случае разгона АД при постоянной скорости вращения магнитного поля статора (прямой пуск, пуск при использовании устройств на основе ТПН) количество энергии, выделяющейся в роторной обмотке за время пуска (W_r), может быть

представлено суммой двух составляющих. Одна из них является долей энергии, которая определяется изменением кинетической энергии системы ($W_{r.din}$), а другая определяется работой по преодолению момента сопротивления, создаваемого рабочим механизмом (W_{rc}). Проанализируем связь величины W_r с параметрами механической характеристики привода.

Если выразить момент двигателя из уравнения движения электропривода, пренебрегая разницей между электромагнитным и механическим моментом, появляется возможность записать выражение для мощности потерь в обмотке ротора в следующем виде [6]:

$$\Delta P_r = M\omega_0 s = \left(J_\Sigma \omega_0 \frac{d\omega}{dt} - J_\Sigma \omega \frac{d\omega}{dt} \right) + M_c (\omega_0 - \omega), \quad (2)$$

где M – момент двигателя; M_c – момент сопротивления на валу двигателя; J_Σ – суммарный момент инерции привода; ω_0 – скорость вращения магнитного поля; ω – скорость двигателя; s – скольжение.

Интегрируя (2), получаем выражение для энергии, выделяющейся в обмотке ротора в процессе пуска:

$$W_r = J_\Sigma \left(\omega_0 \int_{\omega_{нач}}^{\omega_{кон}} d\omega - \int_{\omega_{нач}}^{\omega_{кон}} \omega d\omega \right) + \int_0^{t_n} M_c (\omega_0 - \omega) dt, \quad (3)$$

где $\omega_{нач}$ и $\omega_{кон}$ – начальная и конечная скорости в процессе разгона.

Из выражения (3) получим (при $\omega_{нач} = 0$)

$$W_{r.din} = J_\Sigma \left(\omega_0 \omega_{кон} - \frac{\omega_{кон}^2}{2} \right). \quad (4)$$

Для мощных двигателей, у которых рабочий участок механической характеристики имеет очень высокую жесткость, значение $\omega_{кон}$ очень близко к ω_0 , поэтому величина $W_{r.din}$ практически совпадает с величиной кинетической энергии (W_{kin}), которая запасается во вращающихся массах привода к концу разгона:

$$W_{r.din} \approx W_{kin} = J_\Sigma \frac{\omega_{кон}^2}{2}. \quad (5)$$

Получим выражение для W_{rc} . Представим выражение для момента сопротивления, создаваемого рабочим механизмом в следующем виде:

$$M_{ct} = M_{c0} + M_{c.vN} \left(\frac{\omega}{\omega_N} \right)^m, \quad (6)$$

где M_{c0} – постоянная составляющая момента сопротивления; $M_{c.vN}$ – величина переменной составляющей момента сопротивления при номинальной скорости; ω_N – номинальная скорость.

Получение аналитических выражений $\omega(t)$ весьма затруднительно из-за индивидуальных особенностей механических характеристик различных двигателей.

Кроме того, эта задача дополнительно осложняется необходимостью учета влияния вытеснения тока в проводниках обмотки ротора. Поэтому, в целях получения приближенных выражений, используем аппроксимацию зависимости скорости от времени при пуске степенной функцией:

$$\omega = a_\omega t^n, \quad (7)$$

где величина n находится между 1 и 2...3.

В этом случае из (6) получим следующее выражение:

$$M_c = M_{c0} + M_{c.vN} \left(\frac{a_\omega}{\omega_N} \right)^m t^{nm}. \quad (8)$$

Из (3) с учетом (7) и (8) можно записать

$$W_{rc} = \omega_0 M_{c0} t_n + \omega_0 M_{c.vN} \left(\frac{a_\omega}{\omega_N} \right)^m \frac{t_n^{nm+1}}{nm+1} - \frac{M_{c0} a_\omega t_n^{n+1}}{n+1} - \frac{M_{c.vN} a_\omega^{m+1}}{\omega_N^m (nm+n+1)} t_n^{nm+n+1}. \quad (9)$$

Поскольку $\omega_{кон} = a_\omega t_n^n$, выражение (9) может быть переписано в следующем виде (если $\omega_{кон} = \omega_N$):

$$W_{rc} = M_{c0} \left(\omega_0 - \frac{\omega_N}{n+1} \right) t_n + M_{c.vN} \left(\frac{\omega_0}{nm+1} - \frac{\omega_N}{nm+n+1} \right) t_n. \quad (10)$$

Для мощных двигателей, где ω_N близко к ω_0 , можно без существенной ошибки записать выражение (10) как

$$W_{rc} = \left[M_{c0} \frac{n}{n+1} + M_{c.vN} \frac{n}{(nm+n+1)(nm+1)} \right] \times \omega_N t_n. \quad (11)$$

Как видно из (11), энергия, расходуемая на преодоление момента сопротивления, уменьшается с увеличением коэффициентов n и m , но увеличивается при росте продолжительности пуска и номинальной скорости двигателя. При правильном согласовании по мощности двигателя и приводимого механизма в приводах с более скоростными двигателями значения M_{c0} и $M_{c.vN}$ будут меньше (обратно пропорциональны номинальной скорости двигателя). Поэтому при одинаковой мощности двигателей с различными значениями номинальной скорости величина W_{rc} зависит только от времени разгона.

б) Учет добавочных потерь

В общем балансе потерь, выделяющихся в роторной обмотке, есть еще одна компонента кроме джоулевых потерь – добавочные потери ($\Delta P_{r.доб}$). Получим выражение для энергии добавочных потерь, выделяющихся в обмотке ротора при пуске ($W_{r.доб}$). Добавочные потери при нагрузке в АД пропорциональны квадрату тока нагрузки [8]. В процессе пуска, когда токи большие, можно принять, что ток нагрузки пропорционален току статора I_1 . Существует несколько видов добавочных потерь. Используя выражения для расчета раз-

личных видов добавочных потерь, приведенные в [9], $\Delta P_{r,доб}$ можно представить в следующем виде (здесь рассматривается пуск АД с использованием ТПН при ограничении тока статора):

$$\Delta P_{r,доб} = \Delta P_{добN} k_{I1}^2 \times \left[a_{r,доб} + b_{r,доб} \left(\frac{\omega}{\omega_N} \right)^{1,5} + c_{r,доб} \left(\frac{\omega}{\omega_N} \right)^2 \right], \quad (12)$$

где $\Delta P_{добN}$ – мощность добавочных потерь в номинальном режиме; $k_{I1} = I_{1п}/I_{1N}$; $I_{1п}$ – ток статора при пуске; I_{1N} – номинальный ток статора.

Выразим в (12) скорость через время с помощью (7) и, интегрируя результат от 0 до t_n , получим выражение для энергии $W_{r,доб}$ при $\omega_{кон} = \omega_N$:

$$W_{r,доб} = \Delta P_{добN} k_{I1}^2 \left(a_{r,доб} + \frac{b_{r,доб}}{1,5n+1} + \frac{c_{r,доб}}{2n+1} \right) t_n. \quad (13)$$

Полная энергия, выделяющаяся в обмотке ротора в течение пуска:

$$W_{\Sigma r} = W_{r,дин} + W_{rc} + W_{r,доб}. \quad (14)$$

Учет теплоотдачи в окружающую среду

а) Обоснование «энергетического подхода» для оценки нагрева ротора

Анализ нагрева ротора, так же как и других элементов электродвигателя, на основе методов численного моделирования, дает возможность получить информацию, относящуюся лишь к отдельным случаям с набором параметров для конкретного привода. В то же время имеется необходимость в получении выводов общего характера, которые бы позволили проследить влияние различных факторов на нагрев ротора. Это можно сделать только на основе аналитических выражений. Получение аналитических выражений для температуры обмотки в конце пуска, базирующихся на решении дифференциальных уравнений, описывающих процессы в двигателе, практически невозможно по причине сложного характера теплообмена между обмоткой и другими частями двигателя, входящими в термодинамическую модель, а также из-за температурной зависимости сопротивления обмотки, влияния вытеснения тока в пазах и других обстоятельств. Рассмотрим возможность использования для этого «энергетического подхода». Под термином «энергетический подход» в данном случае будем подразумевать подход, базирующийся на энергетическом балансе. Этот подход предусматривает использование выражений, которые устанавливают взаимосвязь между температурой элементов двигателя и энергией, которая выделяется в них и передается в окружающую среду, без привлечения дифференциальных уравнений, решение которых описывает изменение температуры во времени.

б) Вывод уравнения Фредгольма

Энергия, отдаваемая в окружающую среду, может быть представлена следующим образом:

$$W_{out} = \int_0^{t_n} \lambda_{r,out}(t) [\Delta\theta_r(t) - \Delta\theta_{out}(t)] dt, \quad (15)$$

где $\lambda_{r,out}(t)$ – тепловая проводимость от элементов ротора к окружающей среде, которая является функцией скорости вращения ротора; $\Delta\theta_r(t)$ – зависимость от времени усредненной величины подъема температуры элементов ротора относительно начального значения; $\Delta\theta_{out}(t)$ – зависимость от времени усредненной величины подъема температуры окружающей среды относительно начального значения:

$$\Delta\theta_{out} = \frac{\sum_{i=1}^l \Delta\theta_{out,i} \lambda_{r,out,i}}{\sum_{i=1}^l \lambda_{r,out,i}}, \quad (16)$$

где $\Delta\theta_{out,i}$ – подъем температуры i -го элемента окружающей среды, к которому направлен тепловой поток от ротора; $\lambda_{r,out,i}$ – тепловая проводимость от ротора к i -му элементу окружающей среды; l – количество элементов окружающей среды, к которым идет тепловой поток от ротора.

Обозначим

$$\lambda_{r,out}^*(t) = \lambda_{r,out}(t) / \lambda_{r,outN}, \quad (17)$$

где $\lambda_{r,outN}$ – тепловая проводимость от ротора к элементам окружающей среды при номинальной скорости двигателя.

Запишем выражение (1) в следующем виде:

$$\Delta\theta_r = \Delta\theta_r' - W_{out} / C_r, \quad (18)$$

где $\Delta\theta_r' = W_{\Sigma r} / C_r$ – максимум подъема температуры, который был бы при адиабатическом нагреве.

Второе слагаемое в правой части выражения (18), принимая во внимание (17), может быть представлено таким образом:

$$\frac{W_{out}}{C_r} = \int_0^{t_n} \frac{\lambda_{r,out}^*(t)}{T_{r,outN}} [\Delta\theta_r(t) - \Delta\theta_{out}(t)] dt, \quad (19)$$

где $T_{r,outN} = C_r \lambda_{r,outN}$ – отношение суммарной теплоемкости элементов, принимаемых во внимание при оценке нагрева во время пуска, к тепловой проводимости от них к элементам окружающей среды (включая воздух) при номинальной скорости двигателя.

Представим разность $\Delta\theta_r(t) - \Delta\theta_{out}(t)$, как $\bar{k}_{\theta,out,r} \Delta\theta_r(t)$. Учтем, что окружающей средой для элементов ротора являются элементы конструкции двигателя, которые имеют весьма значительную тепловую инерцию, а также охлаждающий воздух, температура которого к концу пуска значительно ниже температуры интенсивно греющихся элементов ротора. Это дает возможность принять, что средняя за время пуска величина $\bar{k}_{\theta,out,r}$ близка к 0,5.

Принимая во внимание выражение для $\bar{k}_{\theta,out,r}$, а также выражение (19), можем переписать (18) в виде

$$\Delta\theta_r = \Delta\theta_r' - \frac{\bar{k}_{\theta,out,r}}{T_{r,outN}} \int_0^{t_n} \lambda_{r,out}^*(t) \Delta\theta_r(t) dt. \quad (20)$$

Уравнение (20) является уравнением Фредгольма второго рода, которое, при определенных условиях,

может иметь аналитическое решение. Ядром этого уравнения является функция $\lambda_{r.out}^*(t)$.

Принимая во внимание нелинейную связь между теплоотдачей с поверхности и скоростью потока охлаждающей среды, можно аппроксимировать зависимость $\lambda_{r.out}^*(t)$ выражением

$$\lambda_{r.out}^*(t) = a_\lambda + \frac{b_\lambda \omega^\beta(t)}{\omega_N^\beta}, \quad (21)$$

где $a_\lambda + b_\lambda = 1$, величина a_λ является постоянной составляющей теплоотдачи, а b_λ – переменная составляющая теплоотдачи при номинальной скорости.

С учетом (21) получим из (20) уравнение Фредгольма второго рода с вырожденным ядром, которое имеет аналитическое решение. Найдем решение этого уравнения.

в) Решение уравнения Фредгольма

В общем случае уравнение Фредгольма второго рода с вырожденным ядром может быть записано в следующем виде:

$$y(x) - \chi \int_a^b \left[\sum_{k=1}^n g_k(x) h_k(t) \right] y(t) dt = f(x), \quad (22)$$

где n – количество слагаемых в ядре уравнения.

Решение уравнения (22) выглядит следующим образом [10]

$$y(x) = f(x) + \chi \sum_{k=1}^n A_k g_k(x). \quad (23)$$

Постоянные A_k находятся из решения системы линейных алгебраических уравнений:

$$A_m - \chi \sum_{k=1}^n S_{mk} A_k = f_m, \quad m = 1, 2, \dots, n, \quad (24)$$

где m – номер уравнения в системе.

Отметим, что коэффициенты A_k могут быть найдены и непосредственно по формуле [10]

$$A_k = \int_a^b h_k(t) y(t) dt, \quad (25)$$

однако для этого необходимо сначала найти зависимости $y(t)$, что в нашем случае, само по себе, очень сложная задача. Определение коэффициентов A_k из решения системы уравнений (24) позволяет избежать этих сложностей.

Величины S_{mk} и f_m могут быть найдены с использованием следующих выражений:

$$S_{mk} = \int_a^b h_m(x) g_k(x) dx; f_m = \int_a^b f(x) h_m(x) dx, \quad (26)$$

$$m, k = 1, 2, \dots, n.$$

В нашем случае $n=2$, $g_1(x) = 1$ и $g_2(x) = 1$, поэтому решение (23) будем искать в форме

$$y(x) = f(x) + \chi(A_1 + A_2). \quad (27)$$

По (27) получим решение интегрального уравнения в следующем виде:

$$\Delta\theta_r = \Delta\theta_r' \times \left[1 + a_\lambda D + \frac{1 + DB}{1 - \chi a_\lambda t_n} \cdot \left(\frac{1}{\chi t_n B} - 1 - dB \right)^{-1} \right], \quad (28)$$

$$\text{где } D = \frac{\chi t_n}{1 - \chi a_\lambda t_n}; B = b_\lambda \frac{a_\omega^\beta}{\omega_N^\beta (n\beta + 1)} t_n^\beta; \chi = -\frac{k_{\theta r}}{T_{r.out N}}.$$

Физический смысл выражения (28) заключается в том, что второе и третье слагаемое в квадратных скобках показывают ту долю, на которую уменьшается максимум температуры в процессе пуска за счет отдачи части выделившейся энергии в окружающую среду (эти слагаемые здесь отрицательные, поскольку $\chi < 0$).

Количественный анализ решения

а) Термодинамическая схема для двигателя со стержневой сварной обмоткой ротора

Рассмотрим пример использования полученных соотношений для двигателя АДЧР-1600-6.0-4У1 (1600 кВт, 1500 об/мин). Этот двигатель имеет стержневую сварную обмотку ротора и радиальные каналы охлаждения. На **рис. 2** показан фрагмент из 6 элементов, входящих в состав упрощенной тепловой схемы термодинамической модели АД с такой обмоткой ротора. Пунктирной линией охвачены элементы модели, рассматриваемые в этом исследовании. Штрихпунктирной линией охвачены те элементы модели ротора, которые целесообразно принимать во внимание при анализе нагрева стержневой обмотки в пусковых режимах.

На **рис. 2** обозначено: 1 – пазовая часть обмотки ротора; 2 – короткозамыкающее кольцо; 3 – сталь ротора; 4 – воздух (внутренний воздух для двигателя закрытого исполнения, проходящий охлаждающий воздух для защищенного двигателя); 5 – сталь статора; 6 – вал; λ_{ij} – тепловые проводимости.

Расчетное значение постоянной времени $T_{r.out}$ для двигателя АДЧР-1600-6.0-4У1 при номинальной скорости вращения составляет 62,1 с, а расчетная величина a_λ близка к 0,5. Относительно малое значение постоянной $T_{r.out}$, соизмеримое с продолжительностью пуска, предопределяет более выраженное влияние теплоотдачи от обмотки на максимумы ее температуры в пусковых режимах, чем для двигателей с заливкой обмоткой, где условный средний зазор между алюминием и сталью ротора принимается от $0,6 \cdot 10^{-6}$ до $0,6 \cdot 10^{-5}$ м [11], и можно рассматривать обмотку и сталь ротора как единое целое. Таким образом, и характерные величины χt_n оказываются по модулю, как минимум, на порядок больше, чем для двигателей с заливкой обмоткой.

б) Результаты расчета при адиабатическом подходе и оценка влияния теплоотдачи в окружающую среду

На **рис. 3** показана поверхность $\Delta\theta_r / \Delta\theta_r' = f(\chi t_n, a_\lambda)$ при $\omega_{кон} = \omega_N$, а на **рис. 4** – линии уровня этой поверхности. Из этих графиков следует, что, как правило, для двигателей со стержневой обмоткой ротора оценивать максимум температуры ротора в пусковых режимах по

адиабатической модели нельзя из-за слишком большого влияния теплоотдачи от обмотки. В случае электропривода нагнетателя RC 4A-3N-95 с двигателем АДЧР-1600-6.0-4У1 время пуска при уставке ограничения тока статора на уровне четырех номиналов составляет 36 с, что для этого двигателя соответствует $\chi t_n = -0,58$. При таком значении χt_n и $a_\lambda = 0,5$ погрешность расчета максимума средней температуры обмотки по адиабатической модели может составить порядка 30%, поэтому необходимо пользоваться более точным выражением (28) или использовать численное моделирование.

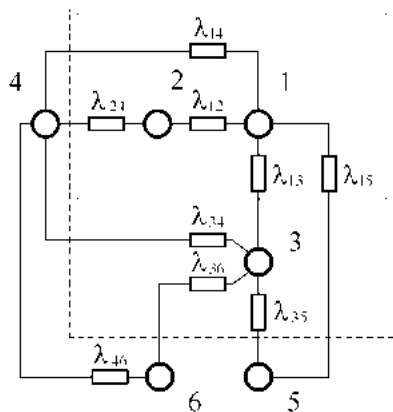


Рис. 2. Фрагмент тепловой схемы термодинамической модели АД со стержневой сварной обмоткой ротора

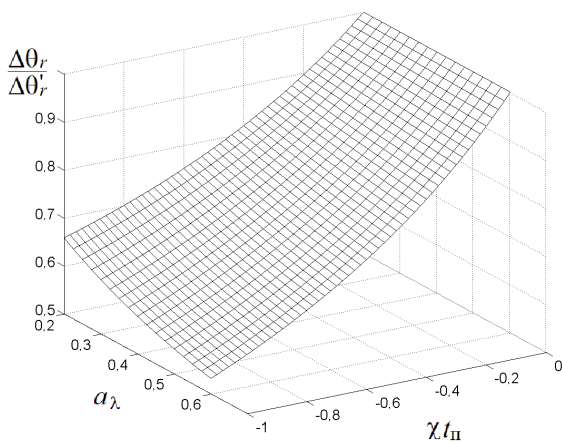


Рис. 3. Зависимость отношения $\Delta\theta_r / \Delta\theta_r'$ от безразмерных факторов χt_n и a_λ при $n=1$ и $\omega_{\text{кон}}=\omega_N$

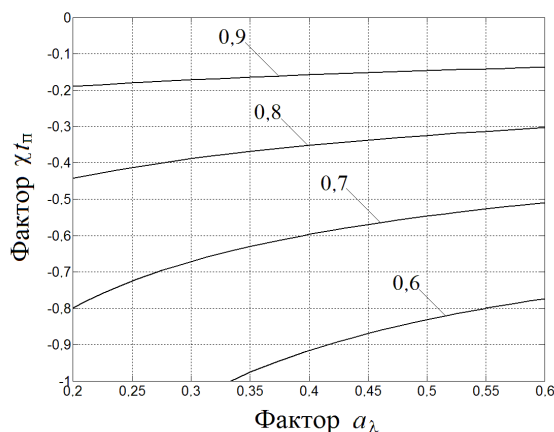


Рис. 4. Линии уровня поверхности $\Delta\theta_r / \Delta\theta_r'$

ПРОВЕРКА АНАЛИТИЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ НА МОДЕЛИ

Описание модели

Экспериментальное исследование нагрева короткозамкнутой обмотки ротора асинхронного двигателя весьма затруднительно. Существуют способы оценки нагрева обмоток асинхронного двигателя без непосредственного измерения температуры [12 – 14], однако предлагаемые подходы дают усредненное значение температуры обмотки, точно так же, как и упрощенные методы расчета. В то же время для оценки точности, обеспечиваемой упрощенными аналитическими методами расчета, интерес представляет и информация о распределении температуры обмотки по различным ее участкам. Неравномерность нагрева обмотки может быть воспроизведена при использовании численного моделирования. С этой целью была создана комплексная модель асинхронного электропривода с двигателем АДЧР-1600-6.0-4У1, приводящим в движение многоступенчатый нагнетатель типа RC 4A-3N-95 фирмы MAN TURBO AG [15, 16]. Термодинамическая подмодель этой комплексной модели построена на основе тепловой схемы, содержащей 71 узел, включая 23 узла для обмотки ротора и столько же узлов для обмотки статора. Такая модель предъявляет существенно меньшие требования к вычислительным ресурсам, чем FEM и CFD-модели [17 – 19] и обеспечивает относительно высокую скорость расчетов, позволяющую исследовать относительно длительные процессы нагрева. При большом диапазоне изменения температуры элементов двигателя в процессе пуска представляется необходимым учитывать и температурную зависимость некоторых параметров [20]. При создании обсуждаемой здесь модели были учтены зависимости от температуры сопротивлений обмоток ротора и статора, а также теплоемкости роторной обмотки.

Сравнение теоретических и модельных результатов

При пуске АД происходит вытеснение тока в обмотке ротора, но только в стержнях. Примем начальную кратность сопротивления обмотки ротора равной отношению высоты паза ротора (60 мм у рассматриваемого двигателя) к глубине проникновения поля в паз (для алюминия 14,1 мм при 50 Гц [21]). Усреднив это значение за время пуска, получим коэффициент увеличения мощности потерь в стержнях из-за вытеснения тока $\bar{k}_{\text{skin}}$ (для этого двигателя $\bar{k}_{\text{skin}} = 2,13$).

В конце разгона существенную роль играет сильный нагрев стержней обмотки. Поэтому, несмотря на то, что масса колец составляет существенную долю от всей обмотки, большая часть потерь при пуске выделяется в стержнях. Изменение температуры стержней обмотки с 25 до 300-350 °С вызывает увеличение удельного сопротивления алюминия в 2,1–2,3 раза. Усредняя это значение за все время пуска, получим коэффициент увеличения мощности потерь в стержнях из-за увеличения температуры $\bar{k}_\theta$ (при запуске рассматриваемого привода $\bar{k}_\theta \approx 1,6$).

Примем (в первом приближении), что добавочные потери в короткозамыкающих кольцах не выделяются, тогда получим выражение для расчета уровня средней температуры стержней при адиабатическом нагреве следующим образом. Введем обозначения:

$W_{ring} = w_{ring} m_{ring}$ – энергия, выделяющаяся за время пуска в короткозамыкающих кольцах; w_{ring} – удельная (на единицу массы) энергия, выделяющаяся за время пуска в короткозамыкающих кольцах; m_{ring} – масса короткозамыкающих колец;

$W_{bar} = w_{bar} m_{bar} + W_{r.доб}$ – энергия, выделяющаяся за время пуска в стержнях обмотки ротора; $w_{bar} = w_{ring} \bar{k}_{skin} \bar{k}_\theta$ – удельная (на единицу массы) энергия, выделяющаяся за время пуска в стержнях обмотки ротора; m_{bar} – масса стержней; $W_{r.доб}$ – энергия добавочных потерь, выделяющаяся за время пуска в стержнях обмотки ротора.

$$W_{bar} = w_{ring} \bar{k}_{skin} \bar{k}_\theta (1 - k_{m.ring}) m_{\Sigma r} + W_{r.доб}; \quad (29)$$

$$W_{\Sigma r} = W_{ring} + W_{bar} = w_{ring} k_{m.ring} m_{\Sigma r} + w_{ring} \bar{k}_{skin} \bar{k}_\theta (1 - k_{m.ring}) m_{\Sigma r} + W_{r.доб}, \quad (30)$$

где $k_{m.ring}$ – доля массы короткозамыкающих колец в общей массе обмотки ротора.

Из (30) получим

$$w_{ring} = \frac{W_{\Sigma r} - W_{r.доб}}{m_{\Sigma r} [k_{m.ring} + (1 - k_{m.ring}) \bar{k}_{skin} \bar{k}_\theta]}. \quad (31)$$

Подставим (31) в выражение (29):

$$W_{bar} = \frac{(W_{\Sigma r} - W_{r.доб})(1 - k_{m.ring}) \bar{k}_{skin} \bar{k}_\theta}{k_{m.ring} + (1 - k_{m.ring}) \bar{k}_{skin} \bar{k}_\theta} + W_{r.доб}. \quad (32)$$

Адиабатический подъем средней температуры стержней

$$\Delta \theta'_{r.bar} = \frac{W_{bar}}{(1 - k_{m.ring}) C_{\Sigma r}}. \quad (33)$$

Из (32) и (33) получим

$$\Delta \theta'_{r.bar} = \frac{\Delta \theta'_r}{1 - k_{m.ring}} \times \left[\frac{\left(1 - \frac{W_{r.доб}}{W_{\Sigma r}}\right) (1 - k_{m.ring}) \bar{k}_{skin} \bar{k}_\theta}{k_{m.ring} + (1 - k_{m.ring}) \bar{k}_{skin} \bar{k}_\theta} + \frac{W_{r.доб}}{W_{\Sigma r}} \right]. \quad (34)$$

Расчет по (34) дает $\Delta \theta'_{r.bar} = 498,7$ °С. При рассмотрении средней температуры только стержней (в этом случае $T_{r.out} = 48,0$ с) получим по (28) $\Delta \theta_{r.bar} / \Delta \theta'_{r.bar} = 0,74$, откуда $\Delta \theta_{r.bar} = 367,8$ °С.

На рис. 5 показано распределение максимальной за время пуска температуры обмотки ротора в аксиальном направлении (1); адиабатическое значение усредненной температуры обмотки (2); усредненная температура всей обмотки с учетом теплоотдачи в окружающую среду (3); усредненная температура стержней с учетом теплоотдачи в окружающую среду (4). Значения температур приведены при температуре окружающего воздуха $\theta_0 = 25$ °С.

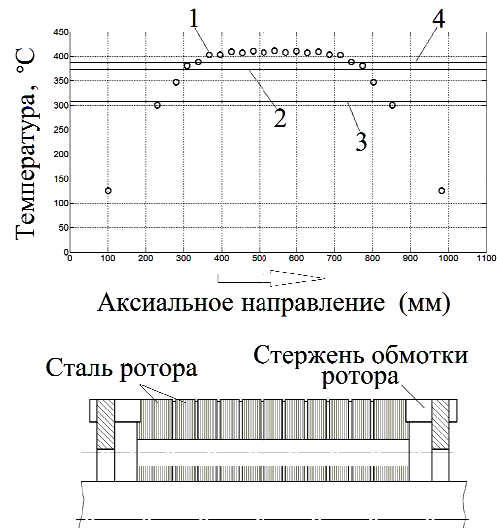


Рис. 5. Распределение максимальной температуры обмотки ротора в аксиальном направлении и расчетные значения температур

На рис. 5 видно, что оценка средней температуры стержней с использованием выражения (34) дает весьма хорошее приближение к максимальным значениям, полученным с помощью моделирования (расхождение менее 4,5%).

Здесь для расчета значений $\bar{k}_{skin}$ и $k_{m.ring}$ требуются достаточно легко измеряемые геометрические данные ротора. Значения $\bar{k}_\theta$ могут быть уточнены итерационно по ходу расчета. Наибольшие трудности представляет оценка величины $T_{r.out}$ для расчета χ . Значение $T_{r.out}$ может быть приблизительно определено из следующих соображений, базируясь на уже рассчитанных значениях для двигателя-аналога: $T_{r.out} \sim C_r \rho_{r.out} \sim L^3 / L^2 \sim L \sim V_r^{1/3}$, где L – характерный линейный размер ротора; V_r – объем ротора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При расчете максимума температуры сварной обмотки ротора в пусковых режимах адиабатический подход может давать существенную ошибку.

Расчет максимума температуры обмотки ротора при пуске с учетом теплоотдачи в окружающую среду предлагается выполнять по аналитическим выражениям, полученным на основе решения уравнения Фредгольма второго рода, построенного на основе теплового баланса для обмотки ротора.

Сравнение результатов, полученных с использованием предложенных аналитических выражений и результатов численного моделирования, показало, что наиболее точная оценка максимума температуры достигается при рассмотрении нагрева стержней обмотки ротора отдельно от короткозамыкающих колец.

Получены выражения, позволяющие выполнить приближенный учет разницы между средней температурой всей обмотки ротора и ее стержней.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A Survey of Condition Monitoring and Protection Methods for Medium-Voltage Induction Motors / P. Zhang, Y. Du, T.G. Habetler, B. Lu // IEEE Trans. Ind. Appl. 2011. No. 1. Vol. 47. P. 34-46.
2. Albers T., Bonnett A. H. Motor temperature considerations

- for pulp and paper mill applications // IEEE Trans. Ind. Appl. 2002. No. 6. Vol. 38. P. 1701–1713.
3. Bonnett A.H., Soukup G.C. Cause and analysis of stator and rotor failures in three-phase squirrel-cage induction motors // IEEE Trans. Ind. Appl. 1992. No. 4. Vol. 28. P. 921–937.
4. Condition Monitoring of Rotating Electrical Machines / Tavner P., Ran L., Penman J., Sedding H. London: The Institution of Engineering and Technology, 2008. 304 p.
5. Fu F.L. Engineering calculation of the starting temperature rise for the asynchronous motor // Electr. Machinery Technol. 1993. Vol. 2. P. 9–11.
6. Ключев В.И. Теория электропривода. М.: Энергоатомиздат, 1985. 560 с.
7. Sheng Z. W. Calculation of temperature rise of rotor bars and end rings of squirrel cage induction motors during starting // Explosionproof Electr. Mach. 2005. Vol. 40. P. 12–14.
8. ГОСТ Р МЭК 60034-2-1-2009. Машины электрические вращающиеся. Ч. 2-1: Стандартные методы определения потерь и коэффициента полезного действия вращающихся электрических машин (за исключением машин для подвижного состава). М.: Стандартинформ, 2011. 53 с.
9. Асинхронные двигатели общего назначения / Бойко Е.П., Гаинцев Ю.В., Ковалев Ю.М. и др. М.: Энергия, 1980. 488 с.
10. Полянин А. Д., Манжиров А.В. Справочник по интегральным уравнениям. М.: Физматлит, 2003. 608 с.
11. Staton D., Susnjic L. Induction Motors Thermal Analysis // Strojarstvo. 2009. Vol. 51 (6). P. 3–631.
12. Chan C.C., Wang H.-Q. An effective method of rotor resistance identification for high-performance induction motor vector control // IEEE Trans. Ind. Electron. 1990. Vol. 37. No. 6. P. 477–482.
13. A robust rotor temperature estimator for induction machines in the face of changing cooling conditions and unbalanced supply / Gao Z., Habetler T.G., Harley R.G. // Proc. of the IEEE Int. Elect. Mach. Drives Conference. San Antonio, TX, May 15–18, 2005. P. 591–596.
14. A sensorless rotor temperature estimator for induction machines based on a current harmonic spectral estimation scheme / Z. Gao, T.G. Habetler, R.G. Harley, S. Colby // IEEE Trans. Ind. Electron. 2008. No. 1. Vol. 55. P. 407–416.
15. Зюзев А.М., Метельков В.П., Яшин Д.А. Анализ пусковых режимов асинхронного электропривода нагнетателя RC 4A-3N-95 // Автоматизация в электроэнергетике и электротехнике // Материалы II Международной научно-технической конференции (21–22 апреля 2016 г.). Пермь: ПНИИПУ, 2016. С. 136–143.
16. Ziuzev A.M., Metelkov V.P. Research of the start-up modes of multi-stage blower asynchronous drive // Proc. IEEE IX Int. Conf. on Power Drives Systems (ICPDS), Perm, Oct. 3–7, 2016, pp.1–5.
17. Boglietti A., Cavagnino A., Staton D.A. TEFC Induction Motors Thermal Models: A Parameter Sensitivity Analysis // IEEE Trans. on Ind. Appl. 2005. Vol. 41. Issue 3. P. 756–763.
18. Evolution and Modern Approaches for Thermal Analysis of electrical machines / A. Boglietti, A. Cavagnino, D. Staton, M. Shanel, M. Mueller, C. Mejuto // IEEE Trans. Ind. Electron. 2009. No. 3. Vol. 56. pp. 871–882.
19. Tang W.H., Wu Q.H., Richardson Z.J. A Simplified Transformer Thermal Model Based on Thermal-Electric Analogy // IEEE Trans. On Power Delivery. 2004. No. 3. Vol. 19. P. 1112–1119.
20. Зюзев А.М., Метельков В.П. О температурной зависимости параметров термодинамических моделей электродвигателей // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2016, № 2 (544), С. 12–17.
21. Шрейнер Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты. Екатеринбург: УРО РАН, 2000, 654 с.

Поступила в редакцию 17 января 2017 г.

INFORMATION IN ENGLISH

ANALYTICAL METHOD FOR EVALUATION OF HIGH-VOLTAGE INDUCTION MOTOR ROTOR WINDING HEATING AT START-UP MODE

Anatoliy M. Ziuzev

D.Sc. (Engineering). Professor, Department of Electric drive and automation of industrial plants, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia.

Vladimir P. Metelkov

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Department of Electric drive and automation of industrial plants, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia. E-mail: v.p.metelkov@urfu.ru

Soft starters based on thyristor voltage converters are widely used to reduce the voltage dips during start-up of high-voltage induction motors. In this way, the start of the high inertial electric drives is accompanied by overheating of the rotor winding, which causes severe thermomechanical stress for the rotor elements leading to the motor failure. The aim of this work is to obtain analytical relations for approximate estimation of the rotor winding overheating in the starting modes. In this paper, we used analytical methods based on Fredholm integral equations and numerical simulation based on the method of thermal circuits in Matlab/Simulink. Based on solution of the Fredholm equation, the analytical relations were obtained to calculate the maximum temperature of the rotor winding during starting considering of heat transfer into the environment. The calculation results obtained by these expressions were tested using an integrated

model that includes all the elements of the drive from the supply net to the operating mechanism. It is shown that the adiabatic approach to estimating of the rotor winding temperature maximum during start-up at which the heat transfer to the environment is not taken into account can lead to substantial error. The analytical expressions were obtained to perform approximate allowance for the uneven distribution of rotor winding temperatures when evaluating its maximum temperature. The proposed approach allows estimation of the maximum winding temperature at start-up on the basis of the relations between the temperature of motor components and the energy that is released in them and transferred to the environment, without the solution of differential equations, which describe the time variation of temperature. The obtained results make it possible to evaluate the maximum temperature of the rotor

winding at start-up modes without the involvement of the numerical modeling, for which the electric drive designer often does not have not enough information.

Keywords: Induction motor, rotor winding, Fredholm integral equation, thermal model, thermomechanical stress.

REFERENCES

1. Zhang P., Du Y., Habetler T.G., and Lu B. A Survey of Condition Monitoring and Protection Methods for Medium-Voltage Induction Motors. *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 47, no. 1, pp. 34-46, 2011.
2. Albers T. and Bonnett A. H. Motor temperature considerations for pulp and paper mill applications. *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 38, no. 6, pp. 1701-1713, 2002.
3. Bonnett A.H., Soukup G.C. Cause and analysis of stator and rotor failures in three-phase squirrel-cage induction motors. *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 28, no. 4, pp. 921-937, 1992.
4. Tavner P., Ran L., Penman J., Sedding H. Condition Monitoring of Rotating Electrical Machines, London: The Institution of Engineering and Technology, 2008, 304 pp.
5. Fu F.L. Engineering calculation of the starting temperature rise for the asynchronous motor. *Electr. Machinery Technol.*, vol. 2, pp. 9-11, 1993.
6. Klyuchev V.I. *Teoriya elektroprivoda* [Theory of electric drive]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1985, 560 pp. (In Russian)
7. Sheng Z. W. Calculation of temperature rise of rotor bars and end rings of squirrel cage induction motors during starting. *Explosionproof Electr. Mach.*, vol. 40, pp. 12-14, 2005.
8. IEC 60034-2-1:2007. Rotating electrical machines – Part 2-1: Standard methods for determining losses and efficiency from tests (excluding machines for traction vehicles).
9. Boyko E.P., Gaintsev Yu.V., Kovalev Yu.M., et al. *Asinhronnye dvigateli obshchego naznacheniya* [Induction motors of general purpose]. Moscow, Energiya Publ., 1980, 488 pp. (In Russian)
10. Polyanin A.D., Manjirov A.V. *Spravochnik po integralnym uravneniyam* [Handbook of Integral Equations]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2003, 608 pp. (In Russian)
11. Staton D., Susnjic L. Induction Motors Thermal Analysis. *Strojarstvo*, vol. 51 (6), pp. 623-631, 2009.
12. Chan C.C., Wang H.-Q. An effective method of rotor resistance identification for high-performance induction motor vector control. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 37, no. 6, pp.477-482, 1990.
13. Gao Z., Habetler T.G., Harley R.G. A robust rotor temperature estimator for induction machines in the face of changing cooling conditions and unbalanced supply. *Proc. IEEE Int. Elect. Mach. Drives Conf.*, San Antonio, TX, May 15-18, 2005, pp. 591-596.
14. Gao Z., Habetler T.G., Harley R.G., Colby S. A sensorless rotor temperature estimator for induction machines based on a current harmonic spectral estimation scheme. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, no. 1, pp. 407-416, 2008.
15. Ziuzev A.M., Metelkov V.P., Yashin D.A. Analysis of start-up modes of asynchronous electric drive for supercharger RC 4A-3N-95. *Avtomatizaciya v ehlektroehnergetike i ehlektrotekhnike. Materialy II mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii* [II International Scientific and Technical Conference on Automation in Power industry and Electrical Engineering]. APEE, 2016 (21-22 April 2016), pp. 136-143. (In Russian)
16. Ziuzev A.M.; Metelkov V.P. Research of the start-up modes of multi-stage blower asynchronous drive. *Proc. IEEE IX Int. Conf. on Power Drives Systems (ICPDS)*, Perm, Oct. 3-7, 2016, pp.1-5.
17. Boglietti A., Cavagnino A., Staton D.A. TEFC Induction Motors Thermal Models: A Parameter Sensitivity Analysis. *IEEE Trans. on Ind. Appl.*, vol. 41, issue 3, pp. 756-763, 2005.
18. Boglietti A., Cavagnino A., Staton D., Shanel M., Mueller M., Mejuto C. Evolution and Modern Approaches for Thermal Analysis of electrical machines. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 56, no. 3, pp. 871-882, 2009.
19. Tang W.H., Wu Q.H., Richardson Z.J. A Simplified Transformer Thermal Model Based on Thermal-Electric Analogy. *IEEE Trans. On Power Delivery*, vol. 19, no. 3, pp. 1112-1119, 2004.
20. Zyuzev A.M., Metelkov V.P. On the Temperature Dependence of the Electric Motors Thermodynamic Models Parameters. *Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenij. Ehlektromekhanika* [Russian Electromechanics], 2016, no. 2 (544), pp. 12-17. (In Russian)
21. Shreiner R.T. *Matematicheskoe modelirovanie ehlektroprivodov peremennogo toka s poluprovodnikovymi preobrazovatelyami chastoty* [Mathematical modeling of AC drives with solid-state frequency converters]. Ekaterinburg: URO RAN Publ., 2000, 654 pp. (in Russian)

Зюзов А.М., Метельков В.П. Аналитический метод оценки нагрева обмотки ротора высоковольтных асинхронных двигателей в пусковых режимах // *Электротехнические системы и комплексы*. 2017. №1(34). С. 60-67. doi: 10.18503/2311-8318-2017-1(34)-60-67

Zyuzev A.M., Metel'kov V.P. Analytical Method for Evaluation of High-Voltage Induction Motor Rotor Winding Heating at Start-Up Mode. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2017, no.1(34), pp. 60-67. (In Russian) doi: 10.18503/2311-8318-2017-1(34)-60-67

**28 января 2017 г. исполнилось 65 лет
САРВАРОВУ АНВАРУ САБУЛХАНОВИЧУ,
члену редакционной коллегии
журнала «Электротехнические системы и комплексы»**

Анвар Сабулханович родился в 1952 г. в г. Магнитогорске Челябинской области.

В 1974 году с отличием окончил энергетический факультет Магнитогорского горно-металлургического института им. Г.И. Носова, квалификация инженер-электрик по специальности «Электропривод и автоматизация промышленных установок» и остался работать в ВУЗе на кафедре общей и специальной электротехники. В 1979 поступил в аспирантуру Московского энергетического института на кафедру автоматизированного электропривода и в 1982 г. успешно защитил диссертацию под руководством А.В. Шинянского. После аспирантуры работал на кафедре электротехники и электроники (в дальнейшем электроники и микроэлектроники) МГТУ старшим преподавателем, доцентом, профессором. В 1988 г. ему присвоено ученое звание доцента по кафедре электротехники и промышленной электроники. В 2002 г. защитил диссертацию в Южно-Уральском государственном университете на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы. В 2003 г. ему присвоено ученое звание профессора по кафедре электроники и микроэлектроники; 1998-2000 гг. – декан энергетического факультета; 2002-2006 г. – декан заочного факультета; 2006-2011 гг. – декан факультета автоматики и вычислительной техники; 2011-2013 гг. – директор института энергетики и автоматизации университета; 2012-2014 гг. – заведующий кафедрой автомати-



зированного электропривода и мехатроники; 2014-2016 гг. главный редактор журнала «Электротехнические системы и комплексы». Плодотворная работа в вузе отмечена в 2002 г. Почетной грамотой губернатора Челябинской области и знаком «Почетный работник высшего профессионального образования РФ». За вклад в развитие изобретательства Российская академия естествознания удостоила его медали имени Нобеля.

Под его научным руководством была выполнена составная часть НИР совместно с НПО «Андроидная техника» по шифру «Спасатель-Н». Эта работа связана с новым научным направлением, а именно с созданием биоморфных роботов. Работа выполнялась при финансировании из фонда перспективного развития РФ по соответствующей государственной программе.

Юбиларом опубликовано около 200 научных и методических работ, в том числе 30 публикаций в центральных изданиях, получено

13 патентов и авторских свидетельств на изобретения, издано 6 монографий и 8 учебных пособий. Начиная с 1982 г. многократно принимал участие в работе международных научно-технических конференций. Особое внимание он уделяет подготовке научно-педагогических кадров в университете. При его активном участии состоялось открытие аспирантуры и диссертационного совета в МГТУ им. Г.И. Носова. В период 2000 – 2016 гг. им подготовлены 12 кандидатов наук, и при его научном консультировании защищены две докторские диссертации.

Анвар Сабулханович ведет большую общественную работу, являясь членом Общественного совета при управлении МВД РФ по г. Магнитогорску. Участвует в работе двух диссертационных советов по присуждению ученых степеней (г. Челябинск, г. Магнитогорск); работает в составе редколлегии в двух журналах из перечня ВАК РФ; участвует в составе оргкомитетов международных конференций по автоматизированному электроприводу и электроприводу переменного тока.

Вне научной деятельности он продолжает оставаться открытым, общительным человеком для друзей, искренне любящим свою семью, родных и близких. Его гражданская позиция определяется тем, что особое внимание он уделяет изучению истории не только в большом понимании, но и в малом: истории жизни поколений близких людей, на долю которых выпала лихая пора испытаний во время репрессий и в годы Великой Отечественной войны.

*Редакционная команда журнала
«Электротехнические системы и комплексы»
сердечно поздравляет Анвара Сабулхановича с 65-ым юбилеем,
желает ему здоровья, творческих успехов
и дальнейшей успешной работы!*

**22 февраля 2017 г. исполнилось 70 лет
ЗЮЗЕВУ АНАТОЛИЮ МИХАЙЛОВИЧУ,
члену редакционной коллегии
журнала «Электротехнические системы и комплексы»**

Анатолий Михайлович родился в 1947 г. в п. Северский, г. Полевской Свердловской области.

В 1970 году окончил электротехнический факультет Уральского политехнического института им. С. М. Кирова (г. Свердловск), квалификация инженер-электромеханик по специальности «Электропривод и автоматизация промышленных установок». В 1970 – 1971 гг. работал инженером ОГК ЭПА НИИТЯЖМАШ УЗТМ. В 1971 – 1974 гг. – аспирант на кафедре электропривода и автоматизации промышленных установок УПИ. В 1974 году защитил диссертацию на тему «Разработка и исследование режимов тиристорного динамического торможения асинхронных трехфазных электродвигателей» по специальности электрооборудование. После аспирантуры работал на кафедре электропривода и автоматизации промышленных установок УПИ младшим научным сотрудником, старшим научным сотрудником, с 1986 г. – доцент кафедры, с 2005 г. – профессор кафедры. В 1978 г. – присвоено ученое звание старшего научного сотрудника по специальности «Электрооборудование»; в 1988 г. – присвоено ученое звание доцента по кафедре электропривода и автоматизации промышленных установок. В 2004 году защитил докторскую диссертацию на тему «Развитие теории и обобщение опыта разработки автоматизированных электроприводов агрегатов нефтегазового комплекса» по специальности 05.09.03 – Электротехнические комплексы



и системы. Имеющиеся награды: бронзовая и серебряная медали ВДНХ СССР (1976/78 г.), знак «Изобретатель СССР» (1985 г.), лауреат премии им. И.И. Ползунова Правительства Свердловской области (2004 г.), почетная грамота Министерства образования и науки Российской Федерации (2009 г.), занесён в энциклопедию «Инженеры Урала» (2014 г.).

Зюзов А.М. основатель нового для УПИ научного направления, связанного с исследованием и разработкой систем автоматизированного электропривода для агрегатов нефтегазового комплекса. Под его руководством разработаны математические модели электроприводов ряда технологических агрегатов нефтегазовой отрасли, позволившие разработать и научно обосновать рекомендации по построению высокоэффективных систем автоматизированного электропривода отраслевого назначения.

Имеет более 160 научных трудов, опубликованных в России и более 30 публикаций в зарубежных изданиях из баз Scopus и Web of Science, 15 авторских свидетельств СССР и 12 патентов РФ на изобретения, 12 свидетельств РФ о регистрации программ для ЭВМ. Начиная с 1993 г. многократно принимал участие в работе международных научно-технических конференций с выездом за рубеж. Неоднократно руководил научно-исследовательскими работами, выполняемыми по заказам ведущих предприятий г. Екатеринбурга: ОАО «Уралмаш», ОАО «УралНИТИ», ФГУП «НПО Автоматики». При его непосредственном участии было подготовлено 2 кандидата технических наук.

Зюзов А.М. ведет большую общественную работу, является ученым секретарем и членом двух диссертационных советов по присуждению ученых степеней (г. Екатеринбург, г. Магнитогорск), в качестве секретаря неизменно входит в состав международной научно-технической конференции «Электроприводы переменного тока» (г. Екатеринбург), является членом оргкомитета международной научно-технической конференции Пром-Инжиниринг (г. Челябинск) и членом редколлегий ряда научных журналов.

Нам особенно приятно отметить прекрасные человеческие качества юбиляра – подлинную интеллигентность, доброжелательность, отличную физическую подготовку и превосходные творческие таланты!

*Редакционная команда журнала
«Электротехнические системы и комплексы»
сердечно поздравляет Анатолия Михайловича с семидесятилетием,
желает ему здоровья, творческой энергии
и дальнейшей успешной работы в составе нашего журнала!*

**30 марта 2017 г. исполнилось 75 лет
ОСИПОВУ ОЛЕГУ ИВАНОВИЧУ,
члену редакционной коллегии
журнала «Электротехнические системы и комплексы»**

Олег Иванович родился в 1942 г. в г. Пестово Новгородской области.

С 1959 по 1963 гг. являлся студентом энергетического факультета Таджикского политехнического института. В 1963 г. продолжил обучение на кафедре электропривода Челябинского политехнического института (в настоящее время – Южно-Уральский государственный университет). После окончания института был направлен на Ульяновский завод тяжёлых и уникальных станков, где работал в должности инженера-исследователя. Затем проходил службу в рядах Советской Армии.

Олег Иванович прошёл ступени научной «лестницы» от ведущего инженера до старшего научного сотрудника. В 1970-1973 гг. проходил обучение в аспирантуре, кандидатскую диссертацию защитил в 1975 г. в СЗПИ (г. Ленинград). Ученое звание доцента присвоено в 1979 г. В 1994 в Московском энергетическом институте защитил докторскую диссертацию по научной проблеме технического диагностирования автоматизированных электроприводов. Ученое звание профессора присвоено в 1996 г. В 1997 г. перешёл на работу в Московский энергетический институт.

Большую часть своей деятельности Олег Иванович посвятил работе со студентами. Он прошёл путь от ассистента до профессора, подготовил сотни высококвалифицированных специалистов. При этом он всегда уделял большое



внимание подготовке специалистов высшей квалификации – кандидатов и докторов наук. Только из Магнитогорского государственного технического университета (МГТУ) им подготовлено три доктора и четыре кандидата технических наук, успешно защитивших диссертации в МЭИ. Тем самым Олег Иванович внес значительный вклад в развитие научной школы автоматизированного электропривода в городе Магнитогорске.

Имя Осипова О.И. хорошо известно на магнитогорском металлургическом комбинате, с которым его тесно связывает плодотворная научная деятельность. Под его руководством и при непосредственном участии выполнены десятки научно-исследовательских работ, направленных на совершенствование автоматизированных электроприводов и систем управления агрегатами прокатного производства. Олег Иванович является час-

тым гостем на ММК, его общение со специалистами-электриками всегда приносит пользу предприятию и направлено на взаимное обогащение знаниями.

Осипов О.И. является известным ученым в области автоматизированного электропривода. Он автор более 200 научных трудов, в числе которых большое количество авторских свидетельств и патентов на изобретения. Высокой оценки заслуживают учебные пособия, рекомендованные министерством образования и УМО для подготовки специалистов по электротехническим направлениям.

Олега Ивановича и коллектив Магнитогорского технического университета связывает многолетняя тесная дружба. Многие сотрудники МГТУ считают его своим учителем, наставником, другом. Мы высоко оцениваем научные разработки Олега Ивановича, его вклад в развитие научных связей электротехнических кафедр МГТУ с родственными кафедрами МЭИ и Южно-Уральского государственного университета.

Нам особенно приятно отметить прекрасные человеческие качества юбиляра – жизнелюбие, оптимизм, доброжелательное, внимательное отношение к людям, постоянную готовность прийти на помощь.

**С днем рождения, уважаемый
Учитель! Счастья Вам, дорогой
Друг!**

*Коллектив Магнитогорского государственного технического университета
и редакционная коллегия журнала «Электротехнические системы и комплексы»
сердечно поздравляют Олега Ивановича с юбилеем, желают ему огромного человеческого счастья,
здоровья, творческих успехов, новых открытий,
надежных друзей, верных помощников!*

Авербух Михаил Александрович – д-р техн. наук, доц., проф. каф. электроэнергетики и автоматики, ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» г. Белгород, Россия. E-mail: avers45@rambler.ru

Аухадеев Авер Эрикович – канд. техн. наук, доц., каф. электротехнических комплексов и систем, ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», г. Казань, Россия. E-mail: auhadeevkma@rambler.ru

Бодрова Елена Сергеевна – аспирант, каф. электрических станций, сетей и систем электроснабжения, политехнический институт, ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», г. Челябинск, Россия. E-mail: lennok13@mail.ru

Гасияров Вадим Рашитович – канд. техн. наук, доц., заведующий базовой каф. мехатроники и автоматизации, ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», г. Челябинск, Россия. E-mail: gasiyarovvr@gmail.com

Демин Юрий Константинович – аспирант, каф. теплотехнических и энергетических систем, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия.

Зюев Анатолий Михайлович – д-р техн. наук, проф., каф. электропривода и автоматизации, ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия.

Идиятуллин Ринат Гайсович – д-р техн. наук, проф., каф. электротехнических комплексов и систем, ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», г. Казань, Россия. E-mail: mcelt@rambler.ru

Картацев Сергей Владимирович – д-р техн. наук, проф., каф. теплотехнических и энергетических систем, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия.

Климаш Владимир Степанович – д-р техн. наук, проф., каф. промышленной электроники, ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет», Комсомольск-на-Амуре, Россия. E-mail: klimash@yandex.ru

Конесев Сергей Геннадьевич – канд. техн. наук, доц., каф. электротехники и электрооборудования предприятий, ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», г. Уфа, Россия. E-mail: konesevSG@yandex.ru

Коробатов Денис Владимирович – канд. техн. наук, доц., каф. электрических станций, сетей и систем электроснабжения, политехнический институт, ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», г. Челябинск, Россия. E-mail: denis_vk@inbox.ru

Лавренов Александр Сергеевич – аспирант, каф. промышленной электроники, ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет», г. Комсомольск-на-Амуре, Россия. E-mail: lavrenov22@gmail.com

Маклаков Александр Сергеевич – аспирант, каф. мехатроники и автоматизации, политехнический институт, ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», г. Челябинск, Россия. E-mail: maklakov.work@gmail.com

Мартыанов Андрей Сергеевич – канд. техн. наук, доц., каф. электрических станций, сетей и систем электроснабжения, политехнический институт, ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», г. Челябинск, Россия. E-mail: martyanov_andrey@mail.ru

Метельков Владимир Павлович – канд. техн. наук, доц., каф. электропривода и автоматизации, ФГАОУ ВО «Уральский фе-

деральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия. E-mail: v.p.metelkov@urfu.ru

Нешпоренко Евгений Григорьевич – канд. техн. наук, доц., каф. теплотехнических и энергетических систем, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия.

Паздерин Андрей Андреевич – соискатель, каф. автоматизированных электрических систем, ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», нач. отд. технологического присоединения филиала ПАО «Федеральная сетевая компания Единой энергетической системы» – «Магистральные электрические сети Урала», г. Екатеринбург, Россия. E-mail: paa_83@mail.ru

Паздерин Андрей Владимирович – д-р техн. наук, проф., зав. каф. автоматизированных электрических систем, ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия. E-mail: a.v.pazderin@urfu.ru

Платоненков Сергей Владимирович – ст. преподаватель, каф. автоматики и управления в технических системах, ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова», г. Северодвинск, Россия. E-mail: platonenkov@mail.ru

Прасол Дмитрий Александрович – аспирант, каф. электроэнергетики и автоматики, ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» г. Белгород, Россия. E-mail: dapras@mail.ru

Радионов Андрей Александрович – д-р техн. наук, проф., проректор по учебной работе, ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», г. Челябинск, Россия. E-mail: radionov.mail@gmail.com

Сакович Игорь Александрович – рук-ль группы разработки и внедрения информационных технологий, ЗАО «Биус», г. Северодвинск. E-mail: igorsakovitch@gmail.com

Филина Ольга Алексеевна – ст. преподаватель, каф. электротехнических комплексов и систем, ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», г. Казань, Россия. E-mail: olga_yuminova83@mail.ru

Хазиева Регина Тагировна – аспирант, каф. электротехники и электрооборудования предприятий, ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», г. Уфа, Россия. E-mail: khazievart@mail.ru

Хасанова Резеда Валлямовна – магистрант, каф. теплотехнических и энергетических систем, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия.

Хворостенко Станислав Витальевич – аспирант, каф. электроэнергетики и автоматики, ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» г. Белгород, Россия. E-mail: staskhvorostenko@mail.ru

Хуснутдинов Азат Назипович – преподаватель, каф. электротехнических комплексов и систем, ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», г. Казань, Россия. E-mail: aktuba@mail.ru

Черевко Александр Иванович – д-р техн. наук, проф., зав. каф. судовой электроэнергетики и электротехники, ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова», г. Северодвинск, Россия. E-mail: cherevko-ai@mail.ru

Четошников Сергей Александрович – аспирант, каф. электрических станций, сетей и систем электроснабжения, политехнический институт, ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», г. Челябинск, Россия. E-mail: tchetser@gmail.com

Уважаемые коллеги!

Приглашаем Вас опубликовать статьи в журнале «*Электротехнические системы и комплексы*».

Журнал «Электротехнические системы и комплексы» основан в 1996 году на базе международного сборника научных трудов, в котором публиковались статьи студентов, аспирантов и ученых, как из России, так и из-за рубежа. Начиная с 2014 года «Электротехнические системы и комплексы» выпускается как журнал с периодичностью четыре номера в год.

С 02.02.2016 журнал входит в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук по группам научных специальностей 05.09.00 – электротехника, 05.13.00 – информатика, вычислительная техника и управление, 05.14.00 – энергетика.

Журнал публикует научные работы по следующим рубрикам:

- теория и практика автоматизированного электропривода;
- электро- и теплоэнергетика;
- электроснабжение;
- энерго- и ресурсосбережение;
- промышленная электроника, автоматика и системы управления;
- электротехнологии в промышленности;
- мониторинг, контроль и диагностика электрооборудования.

Публикация статей является бесплатной.

Статьи, направленные в адрес журнала, проходят обязательное научное рецензирование и редактирование. Несоответствие материалов требованиям к статьям может служить поводом для отказа в публикации.

Статья должна быть набрана в шаблоне, который размещен на сайте журнала esik.magtu.ru в разделе «Руководство для авторов». Там же находится инструкция по его заполнению, в которой приведены требования к оформлению статей.

Авторы статьи должны гарантировать, что их работа публикуется впервые. Если элементы рукописи ранее были опубликованы в другой работе (статье, монографии, автореферате и т.д.), в том числе на другом языке, авторы обязаны сослаться на более раннюю работу. При этом они обязаны указать, в чем существенное отличие новой работы от предыдущей и, вместе с тем, выявить ее связь с результатами исследований и выводами, представленными в предыдущей работе. Дословное копирование собственных работ или ее элементов более чем на 30 % и их перефразирование не приемлемы!

Пакет подаваемых документов:

- рукопись статьи;
- информация об авторах;
- экспертное заключение о возможности опубликования;
- лицензионный договор, заполненный на каждого автора в двух экземплярах (отсканированная копия отправляется в формате pdf, оригиналы – по почте вместе с остальными документами).

С уважением,

редакция журнала «Электротехнические системы и комплексы»

E-mail: ecis.red@gmail.com



Научно-образовательный центр «Шнейдер Электрик – МГТУ им. Г.И.Носова



Концептуальной основой НОЦ является интегрированная автоматизированная система управления (ИАСУ), позволяющая на технических и программных средствах SE изучать и проектировать как локальные объекты электроснабжения и электропривода, так и АСУ различных уровней. Такой подход при создании Центра дал возможность в процессе обучения не только изучать конкретное оборудование и программное обеспечение ИАСУ, но и разрабатывать собственные АСУ и системы автоматизации.

Наполнение центра современным оборудованием с возможностью включения его в АСУ различного уровня делает привлекательным прохождение теоретических и практических занятий как для разработчиков и проектировщиков, так и для служб эксплуатации и наладки промышленных предприятий.

Образовательный центр включает в себя компьютерный класс на 12 ПК и 24 посадочных места (разработка программно-технических комплексов с базовым программным обеспечением), мульти-медийный класс на 18 посадочных мест (проведение презентаций, докладов и теоретических занятий), 4 лабораторных стенда, моделирующих работу интегрированной распределенной АСУ участка, цеха.



Перечень направлений подготовки в рамках НОЦ для бакалавров и магистрантов:

- 27.03.04 и 27.04.04 «Управление в технических системах»;
- 13.03.02 и 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника» (профили «Электропривод и автоматика» и «Электроснабжение»);
- 15.03.06 и 15.04.06 «Мехатроника и робототехника» (профиль «Мехатронные системы в автоматизированном производстве»).

Совместно разработанные программы «Шнейдер Электрик– МГТУ им. Г.И.Носова:

- системы управления электроприводами на базе преобразователей частоты ATV32, ATV71 и ATV93 и библиотеки SoMove;
- примеры архитектур локальной автоматизации. Особенности конфигурирования контроллера Modicon M251и разработка приложений SoMachin;
- интеграция оборудования распределения электроэнергии и АСУТП в единую систему управления. Организация сетей CANOpen и Ethernet. Современные подходы к построению программно-технических комплексов.