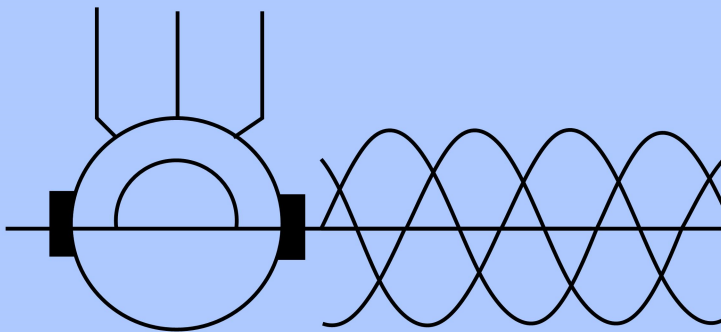
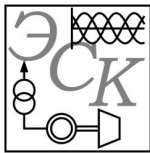


ISSN 2311-8318  
ISSN (online) 2658-3151

# Электротехнические Системы и Комплексы



№4(45), 2019



# ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

ИЗДАЕТСЯ С ЯНВАРЯ 1996 Г.

№ 4(45), ДЕКАБРЬ 2019

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

### Ответственный редактор:

**Е.А. Панова** – доц., 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. Пазерин** – проф., д-р техн. наук,  
УрФУ им. первого Президента России  
Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия;

**Е.Б. Азипитов** – 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;

**И.Ю. Андрушин** – канд. техн. наук,  
ПАО «ММК», г. Магнитогорск, Россия.

### Секции промышленной электроники, автоматики и систем управления; информационного, математического и программного обеспечения технических систем:

**О.С. Логунова** – 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. Ишметьев** – д-р техн. наук,  
ЗАО «КонсОМ СКС», г. Магнитогорск, Россия.

### Секция электротехнологий в промышленности:

**А.М. Зюзов** – 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. Кирандиев** – 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.П. Боjarова** – МГТУ им. Г.И. Носова,  
г. Магнитогорск, Россия;

**Е.А. Храмини** – МГТУ им. Г.И. Носова,  
г. Магнитогорск, Россия.

© ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2019

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.

Учредитель – Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова (455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38)

16+, в соответствии с Федеральным законом №436-ФЗ от 29.12.10.

#### Адрес редакции:

455000, Россия, Челябинская обл., г. Магнитогорск,  
пр. Ленина, д. 38, ауд. 342а, ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»  
e-mail: ecis.red@gmail.com

#### Адрес издателя:

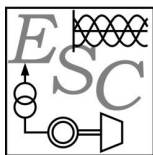
МГТУ им. Г.И. Носова, 455000, Челябинская обл.,  
г. Магнитогорск, пр. К. Маркса, 45/2,  
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», издательский центр.

#### Адрес типографии:

455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38,  
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»  
участок оперативной полиграфии.

Выход в свет 26.12.2019. Заказ 400. Тираж 500 экз.

Цена свободная.



# ELECTROTECHNICAL SYSTEMS AND COMPLEXES

PUBLISHED SINCE JAN., 1996

NO. 4(45) DEC, 2019

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. Khramshin** – Professor, D.Sc. (Engineering),  
NMSTU, Magnitogorsk, Russia.

### Executive Editor:

**E.A. Panova** – Associate Professor, 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. Dzhabarov** – 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.  
(Engineering), LSTU, Lipetsk, Russia.

### Section of Electric Power Supply:

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

**I.Yu. Andryushin** – Ph.D. (Engineering),  
MMK PJSC, Magnitogorsk, Russia.

### Section of Power Electronics, Automation and Control Systems; Technical Systems Dataware and Software:

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

**S.M. Andreev** – Associate Professor, Ph.D.  
(Engineering), NMSTU, Magnitogorsk, Russia;

**E.N. Ishmet'ev** – D.Sc. (Engineering),  
KonsOM SKS CJSC, Magnitogorsk, Russia.

### Section of Industrial Electro Technology:

**A.M. Zyuzev** – Associate Professor, D.Sc.  
(Engineering), 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.P. Boyarova** – NMSTU, Magnitogorsk, Russia;

**E.A. Khranshina** – NMSTU, Magnitogorsk, Russia.

© FSBEI HE NMSTU, 2019

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.

Founder – Novosibirsk State Technical University (38, pr. Lenina, Magnitogorsk 455000, Chelyabinsk Region)

16+ in accordance with Federal Law no. 436-FZ dated 29.12.10

### The publisher:

Nosov Magnitogorsk State Technical University  
455000, 38, Lenin ave., Magnitogorsk, Chelyabinsk region, Russia  
NMSTU publishing center

### The editorial office:

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

### The printing-office:

455000, 38, Lenin ave., Magnitogorsk, Chelyabinsk region, Russia  
Nosov Magnitogorsk State Technical University, printing section

Publication date: 26.12.2019. Order 400. Circulation: 500.  
Open price.

## СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРО- И ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА .....	4
<i>Паздерин А.В., Мурзин П.В., Одинаев И.Н., Бобокалонов Ф.З.</i> Направления исследований для повышения достоверности информации цифровой подстанции.....	4
ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА .....	12
<i>Русскин В.А., Балковой И.Н., Бутаков А.Н.</i> Возможности применения отечественного преобразователя сигналов датчиков перемещения 1310NM025 в системе управления двигателя-маховика.....	12
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ .....	21
<i>Влацкая Л.А., Семенова Н.Г.</i> Применение генетических алгоритмов в задачах оптимизации размещения компенсирующих устройств.....	21
ЭНЕРГО- И РЕСУРСОБЕРЕЖЕНИЕ .....	29
<i>Усков А.Ю., Цимбол А.И., Монастыренко В.И.</i> Способ коммутации электрических нагрузок жилых помещений .....	29
ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА, АВТОМАТИКА И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ .....	35
<i>Николаев А.А., Гилемов И.Г.</i> Улучшение качества напряжения в электрических сетях с активными выпрямителями за счет выбора оптимальных таблиц углов переключения ШИМ.....	35
<i>Воршевский А.А., Гришаков Е.С.</i> Импульсные помехи в судовом кабеле при воздействии электростатического разряда .....	43
ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ .....	47
<i>Бабкин С.Э., Лебедева М.Ю., Савченко Ю.И., Вострокнутова О.Н.</i> Измерение скорости поверхностных волн ферромагнитных материалов электромагнитно- акустическим способом .....	47
ИНФОРМАЦИОННОЕ, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ .....	52
<i>Сидоренко Н.С., Логунова О.С., Тяжельникова Л.Ю., Аркулис Н.В.</i> Информационные хранилища предприятий металлургической промышленности: трансформация структуры.....	52
МОНИТОРИНГ, КОНТРОЛЬ И ДИАГНОСТИКА ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ .....	58
<i>Панов А.Н., Бодров Е.Э., Лысенко А.А., Кривошеев Д.А., Киртянов Н.И.</i> Применение направленного микрофона для диагностики технического состояния электропривода по его акустической вибрации.....	58
<i>Дружинин Н.Н., Сарлыбаев А.А., Храмшина Е.А., Карандаева О.И.</i> Анализ электрических потерь в силовых трансформаторах с длительным сроком эксплуатации .....	64
СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ .....	74

## CONTENT

ELECTRIC POWER SUPPLY .....	4
<i>Pazderin A.V., Murzin P.V., Odinaev I.N., Bobokalonov F.Z.</i> Survey of Data Reliability in Digital Substation .....	4
THEORY AND PRACTICE OF AUTOMATED ELECTRIC DRIVE .....	12
<i>Russkin V.A., Balkovoy N.N., Butakov A.N.</i> Domestic Resolver-to-Digital Converter 1310NM025 Application Possibilities in Reaction Wheel Assembly Control System.....	12
ELECTRIC POWER SUPPLY .....	21
<i>Vlatskaya L.A., Semenova N.G.</i> Application of Genetic Algorithms in ProblemS of Placement Optimization of Compensating Devices.....	21
ENERGY- AND RESOURCES-ECONOMY.....	29
<i>Uskov A.Yu., Tsimbol A.I., Monastyrenko V.I.</i> Method of Switching Electrical Loads of Residential Premises .....	29
POWER ELECTRONICS, AUTOMATION AND CONTROL SYSTEMS .....	35
<i>Nikolaev A.A., Gilemov I.G.</i> Improvement of Power Quality in supply network with active rectifiers by Selecting Optimal Switching Angle Tables of PWM .....	35
<i>Worshesky A.A., Grishakov E.S.</i> Impulse Noise in the Ship Cable Caused by Under Electrostatic Discharge .....	43
INDUSTRIAL ELECTRO TECHNOLOGY .....	47
<i>Babkin S.E., Lebedeva M.Yu., Savchenko Yu.I., Vostroknutova O.N.</i> Measurement of Surface Waves Velocity of Ferromagnetic Materials by the Electromagnetic-Acoustic Method .....	47
TECHNICAL SYSTEMS DATAWARE AND SOFTWARE .....	52
<i>Sidorenko N.S., Logunova O.S., Tyazhelnikova L.Y., Arkulis N.V.</i> Information Storage of Metallurgical Enterprises: Transformation of the Structure.....	52
MONITORING, DIAGNOSTICS AND CONTROL OF ELECTRIC EQUIPMENT.....	58
<i>Panov A.N., Bodrov E.E., Lysenko A.A., Krivoshchev D.A., Kirtyanov N.I.</i> Diagnostics of Electric Drive by its Acoustic Vibration Using a Condenser Microphone .....	58
<i>Druzhinin N.N., Sarlybaev A.A., Khramshina E.A., Karandaveva O.I.</i> Analysis of Electric Losses in Power Transformers with Long Operating Life .....	64
СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ .....	74

## НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ДОСТОВЕРНОСТИ ИНФОРМАЦИИ ЦИФРОВОЙ ПОДСТАНЦИИ

В настоящее время большое внимание уделяется проблеме повышения точности измерительной информации, получаемой в электрической сети. Наибольшая погрешность наблюдается в токах, получаемых с помощью измерительных трансформаторов тока (ТТ), работающих на электромагнитном принципе. Объясняется это процессом насыщения сердечника ТТ при протекании в первичной обмотке больших токов КЗ, при переключениях и бросках тока намагничивания. Процесс насыщения может начаться как в первых периодах, так и в последующих периодах переходного процесса. В статье приведен обзор методов повышения достоверности информации, получаемой от ТТ в переходных и установившихся режимах. Рассмотрены методы, основанные на использовании искаженного вторичного тока, характеристики намагничивания магнитопровода ТТ и магнитного потока, соответствующего началу процесса насыщения в сердечнике ТТ. Выявлена степень проработанности существующих методов и показаны их достоинства и недостатки. В начале статьи выполнена систематизация существующих методов на основе классических и современных подходов. Классический подход характеризуется применением оптимизации абсолютной магнитной проницаемости сердечника. В современных методах восстановления вторичного тока используются методы математического моделирования с применением характеристики намагничивания и с прогнозированием мгновенных значений искаженного сигнала. Далее приводятся результаты апробации наиболее эффективных из современных методов и их сравнительный анализ. В процессе апробации определена точность восстановления тока с частотой дискретизации, соответствующей стандарту МЭК 61850 – 80 отсчетов на период промышленной частоты. В заключении были сделаны выводы о целесообразности использования рассмотренных методов и предлагаются направления дальнейших исследований.

**Ключевые слова:** трансформаторы тока (ТТ), вторичный ток, насыщение сердечника ТТ, намагничивающий ток, характеристика намагничивания.

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время одним из основных источников информации об электрической сети являются ТТ, работающие на электромагнитном принципе. Для повышения точности измерений ТТ был произведен ряд конструктивных изменений как магнитной системы, так и электрической части [1-3].

Как показывает опыт эксплуатации, при превышении предельно допустимых значений тока на первичной стороне возникают искажения измерительной информации, вызванные насыщением сердечника ТТ, вследствие чего погрешность выходит за допустимые пределы [4, 5]. Как правило, на этапе проектирования и реализации для компенсации этой погрешности выполняется витковая коррекция [5].

В целях избежания отрицательного влияния насыщения ТТ на работу релейной защиты (РЗ) на этапе проектирования систем РЗ с абсолютной селективностью часто используется тормозная характеристика, позволяющая повысить эффективность работы системы. Отсутствие универсального технического решения, обеспечивающего эффективное восстановление искаженного сигнала, полученного в переходном режиме, приводит к необходимости поиска новых решений для устранения таких недостатков.

В настоящее время в электроэнергетике большое внимание уделяется развитию технологий «цифровой подстанции», выполняющихся в рамках стандарта МЭК 61850 – «Сети и системы связи на подстанциях» [6, 7]. Достоинства стандарта заключаются в повышении эффективности построения вторичной системы на подстанциях – сокращения количества контрольных кабелей более чем в 3 раза, отсутствия необходимости использования громоздких кабельных лотков и функ-

циональная совместимость микропроцессорных устройств различных производителей [8].

В процессе своего развития микропроцессорные устройства (МПУ) значительно улучшили свои функциональные возможности. Современные МПУ позволяют интегрировать системы релейной защиты и автоматики (РЗА) с системой управления электрической сети [9, 10]. В настоящее время одним из важных вопросов РЗ является централизованная релейная защита и автоматика (ЦРЗА), реализуемая, в основном, на цифровых подстанциях [6, 7]. Однако как для ЦРЗА, так и для традиционной РЗА степень достоверности информации по току является одним из первостепенных факторов.

В настоящей работе рассматривается поведение вторичного тока в переходных режимах, выполнен обзор классических методов, основанных на схемотехнических решениях [1-3] и современных методов с применением математического моделирования [11-23]. Также выявлена степень проработанности рассматриваемых методов для решения проблем, связанных с насыщением сердечника ТТ.

### КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ КОМПЕНСАЦИИ ПОГРЕШНОСТЕЙ ТТ

По теме компенсации погрешности ТТ выполнено большое количество исследований. Изначально исследования посвящались повышению эффективности измерения при степени загрузки ТТ ниже номинального режима [1-3]. Существующие на сегодняшний день методы можно разделить на две основные части: классические и современные (рис. 1). К классическим методам можно отнести те разработки, которые исследовались до появления и активного применения в электроэнергетике МПУ. И соответственно, к современным методам относится разработка, исследованные при активном применении МПУ.

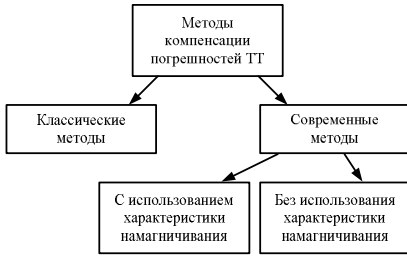


Рис. 1. Классификация методов компенсации погрешностей ТТ

Классические методы были направлены на оптимизацию магнитной системы ТТ, что частично сохранились и в современных методах [1-3]. Однако при появлении МПУ стало возможным применять методы, активно использующие математические модели.

МЕТОДЫ КОМПЕНСАЦИИ (ВОССТАНОВЛЕНИЯ) ВТОРИЧНОГО ТОКА С ПОМОЩЬЮ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАМАГНИЧИВАНИЯ

Рассматриваемые в работах [1-3] способы основаны на повышении абсолютной магнитной проницаемости  $\mu_a$  сердечника ТТ, которые путем изменения магнитной индукции  $B$  позволяют удерживать  $\mu_a$  в ее оптимальных значениях (рис. 2, зона б). Из этого рисунка также видно, что при малых или больших значениях индукции  $\mu_a$  низкая, вследствие чего происходит рост токовой погрешности ТТ (рис. 2, зоны а, с).

С точки зрения магнитного явления токовую погрешность ТТ можно представить в виде (1). Из выражения видно, что она обратно пропорционально  $\mu_a$ :

$$f_{in} = \frac{0,225I_2 z_2 I_m}{\sqrt{2}\mu_a S_m f w_{2n} F_1} \sin(\psi + \alpha) \cdot 100, \quad (1)$$

где  $I_m$  – средняя длина магнитного потока в магнитопроводе, м;  $z_2$  – полное сопротивление вторичной цепи и вторичной обмотки, Ом;  $f$  – частота переменного тока, Гц;  $S_m$  – действительное сечение магнитопровода, м<sup>2</sup>;  $\mu_a$  – абсолютная магнитная проницаемость;  $w_{2n}$  – номинальное число вторичных витков;  $F_1$  – первичная МДС, А;  $\psi$  – угол потерь;  $\alpha$  – угол между вторичным  $I_2$  и вторичной ЭДС  $E_2$ , град.

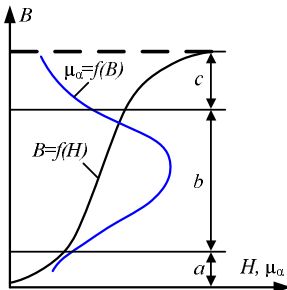


Рис. 2. Зависимость  $B=f(H)$  и  $\mu_a = f(B)$

Каждый из предложенных методов имеет свои достоинства. Однако данные методы не учитывают компенсацию токовой погрешности при больших кратностях первичного тока и в переходном режиме.

В [13, 16, 18] рассматриваются методы компенсации погрешностей ТТ, построенные на основе определения мгновенных значений намагничивающего и вторичного токов в режиме насыщения (2), (2а), (2б) использовании тригонометрических функций (3), применении численного дифференцирования вторичного тока (4) и вычислении намагничивающего тока по смещенным на  $T/4$  отсчетам вторичного тока (5). В [13, 16] предлагается метод для уменьшения влияния погрешности ТТ на работу дифференциальной защиты, который, по мнению авторов, считается одним из наиболее эффективных, затем в [17, 18] производится анализ методов, предложенных в [13, 16] с новыми разработанными методами.

В первом методе используются выражения (2), (2а), (2б) описывающие мгновенное значение вторичного и намагничивающего токов для насыщенного участка при синусоидальной форме первичного тока для модели ТТ со спрямленной характеристики намагничивания (СХН), имеющие следующий вид:

$$a = b \cdot ci_2 = \frac{\omega L_0}{\sqrt{R_2^2 + \omega^2 L_0^2}} I_{m1} \times \sin \left( \omega t + \arctg \left( \frac{1}{\omega T_2} \right) \right) + A_2 \exp \left( -\frac{t - t_s^n}{T_2} \right), \quad (2)$$

$$i_2 = \frac{\omega L_0}{\sqrt{R_2^2 + \omega^2 L_0^2}} I_{m1} \times \sin \left( \omega t + \arctg \left( \frac{1}{\omega T_2} \right) \right) + A_2 \exp \left( -\frac{t - t_s^n}{T_2} \right), \quad (2a)$$

$$i_1^i = i_2 + i_0, \quad (2б)$$

где  $i_1^i$ ,  $i_2$ ,  $i_0$  – мгновенные значения первичного, вторичного и соответственно намагничивающего токов ТТ;  $R_2$ ,  $L_0$  – нагрузка вторичной цепи и индуктивность намагничивания;  $\omega$  – циклическая частота;  $I_{m1}$  – амплитуда первичного тока КЗ;  $T_2$  – постоянная времени вторичной цепи,  $T_2 = R_2/L_0$ ;  $A_2$  – амплитуда аperiodической составляющей, возникающая вследствие насыщения сердечника;  $t_s^n$  – начальный момент насыщения.

По известному току  $i_2$  можно получить его амплитуду и фазу, а по  $R_2$  и  $L_0$  амплитуду и фазу тока  $i_0$ . При сложении этих токов получится восстановленный ток  $i_1^i$  на вторичной стороне (2б).

Во втором методе для нахождения намагничивающего тока  $i_0$  используется выражение (3), а для определения восстановленного тока  $i_1^i$  – (2б):

$$i_0 = i_2 \frac{R_2}{\omega \cdot L_0} \operatorname{tg}(\omega t - \arctg(\omega T_2)). \quad (3)$$

Основой третьего метода является численное дифференцирование вторичного тока  $i_2$ . Намагничивающий ток  $i_0$  определяется по (4), а восстановленный ток  $i_1$  по (26):

$$i_0 = -\frac{R_2}{\omega x_0} \cdot \frac{di_2}{dt}. \quad (4)$$

Принцип работы четвертого метода заключается в вычислении намагничивающего тока  $i_0$  по смещенным на  $T/4$  отсчетам периодической составляющей вторичного тока:

$$i_0 = i_2 \left( t - \frac{T}{4} \right) \cdot \frac{R_2}{\omega L_0}. \quad (5)$$

После вычисления намагничивающего тока  $i_2$  по (26) определяется восстановленный ток  $i_1$ .

Среди предложенных методов наиболее эффективным является алгоритм численного дифференцирования вторичного тока [18]. К достоинствам этого метода относится относительно небольшое количество вычислений, а основным недостатком является его зависимость от параметров магнитопровода ТТ, которые имеют различные значения при разных переходных режимах и разной остаточной (рабочей) магнитной индукции [13,16]. Также при глубоком насыщении вторичного тока предложенный метод не способен восстановить ток  $i_2$ , так как после возникновения насыщения ток  $i_2$  стремится к нулю.

В [19, 20] авторами был предложен метод восстановления вторичного тока, затем метод, позволяющий производить детектирование начала процесса насыщения [21] и в последующей работе, объединяются и модернизируются эти методы [22]. В данных методах для детектирования используется производная вторичного тока  $i_2$ , а для вычисления тока  $i_0$  характеристика, представленная на рис. 3. По (6) производится обнаружение насыщения сердечника ТТ с использованием разностной функции  $\operatorname{del}_2$ :

$$\operatorname{del}_2 = i_2(k+1) - 2i_2(k) + i_{2e}(k-1), \quad (6)$$

где  $k$  – дискретное время;  $i_{2e}$  – прогнозируемый вторичный ток, который получается путем экстраполяции измеренного в интервале правильной трансформации (ИПТ) вторичного тока  $i_2$ :

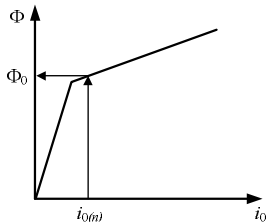


Рис. 3. Зависимость  $i_0=f(\Phi)$

Затем согласно (7) при известном магнитном потоке  $\Phi(t_0)$ , соответствующем началу насыщения сердечника ТТ, можно вычислить магнитный поток  $\Phi(t)$ , после этого с использованием зависимости  $i_0=f(\Phi)$ , полученную на основе измерений или справочных данных, можно определить намагничивающий ток  $i_0$ :

$$\Psi(t) \equiv w_2 [\Phi(t) - \Phi(t_0)] = \int_{t_0}^t i_2(\lambda) d\lambda + L_2 [i_2(t) - i_2(t_0)]. \quad (7)$$

По (8) определяется магнитный поток  $\Phi(t_0)$  и после определения намагничивающего тока по (26) выполняется расчет восстановленного тока  $i_1$ :

$$\Phi(t_0) = -\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \bar{\Phi}(t_0 + k\Delta T), \quad (8)$$

где  $N$  – количество отсчетов в период;  $\Delta T$  – интервал дискретизации.

Преимущество предложенного метода заключается в быстром и простом детектировании насыщения сердечника ТТ. Однако магнитная система ТТ от партии к партии имеет заметные различия, поэтому восстановление тока с использованием априорно заданных характеристик намагничивания не обеспечивает высокую точность. Более того, восстановление вторичного тока с использованием характеристики, близкой к прямоугольной характеристике намагничивания (ПХН) ТТ, приводит к большим погрешностям.

МЕТОДЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ВТОРИЧНОГО ТОКА БЕЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАМАГНИЧИВАНИЯ

В [11,12] используется алгоритм, основанный на (10), в котором для получения неискаженного вторичного тока сначала рассчитывается  $i_0$ , который затем добавляется к измеренному току  $i_2$ . Процесс вычисления начинается при возникновении насыщения магнитопровода, для определения этого момента используется процедура сегментации – разграничения интервалов правильной и искаженной трансформации.

На рис. 4 представлена схема замещения ТТ, для данной схемы справедливо следующее уравнение:

$$L_0 \frac{di_0}{dt} = R_2 i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt}. \quad (9)$$

В соответствии с [11,12] ток  $i_0$  можно определить по выражению (10). После вычисления тока  $i_0$  по выражению (26) определяется восстановленный вторичный ток  $i_1$ :

$$i_0(k) = (\gamma + \theta) i_2(k) + (\gamma + \theta) i_2(k-1) + i_0(k-1), \quad (10)$$

где  $\gamma$  и  $\theta$  – вспомогательные коэффициенты, заменяющие параметры ТТ ( $R_2$ ,  $L_2$ ,  $L_{m0}$ ) и определяются следующим образом:

$$\gamma = \frac{R_2 \Delta t}{2L_0}, \quad (11)$$

$$\theta = \frac{L_2}{L_0}. \quad (12)$$

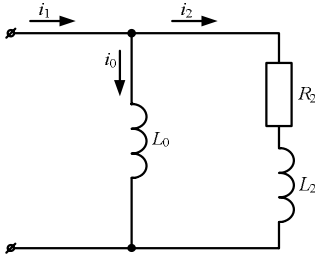


Рис. 4. Схема замещения ТТ

Преимуществом данного метода является небольшое количество коэффициентов в уравнениях, что позволяет сократить количество измерений и упростить систему уравнений. Главным недостатком предложенного метода является его невысокая точность, т.к. при КЗ, вызывающем насыщение магнитопровода ТТ, погрешность может достигать 20% [12].

В [14, 15] рассматривается метод, который обеспечивает восстановление вторичного тока ТТ на насыщенном участке с помощью процедуры прогнозирования. Данный метод основывается на ИПТ, который позволяет получить четыре основных параметра входного тока: амплитуду  $A$  и  $B$ , постоянную времени первичного тока  $T_1$  и начальный угол  $\varphi$  (формула 13). Для прогнозирования искаженной части вторичного тока ТТ достаточно получить три отсчета на ИПТ, после чего составляется система трансцендентных уравнений, решая которую получим значения  $A$ ,  $B$ ,  $T_1$  и  $\varphi$ . Подставив затем полученные результаты в (13), можно определить ток на насыщенном участке:

$$i_1(t) = A \sin(\omega t + \varphi) + B \cdot e^{-\frac{t}{T_1}}. \quad (13)$$

Используя формулу преобразования сумм тригонометрических функции и ряд Тейлора, выражение (13) можно переписать следующим образом:

$$i_1(t) = I_m \cos(\varphi) \sin(\omega t) + I_m \sin(\varphi) \cos(\omega t) - \frac{t}{T_1} I_m + I_m. \quad (13a)$$

Известно, что при глубоком насыщении ИПТ сжимается до 2–3 мс [13]. Согласно стандарту МЭК 61850 на таком ИПТ можно получить достаточное количество отсчетов для решения трансцендентных уравнений [6, 7]. Получив достоверные отсчеты, затем по (13б) можно определить неизвестные коэффициенты ( $C_1 - C_4$ ).

$$i_1(t) = C_1 \sin(\omega t) + C_2 \cos(\omega t) - C_3 t + C_4. \quad (13б)$$

Преимущество такого подхода заключается в повышенной точности при известной форме первичного тока. Однако в ходе апробации данного алгоритма выявлено, что изменение  $T_1$  в сторону уменьшения приводит к большим погрешностям восстановленного тока, вследствие чего интервал точного прогнозирования будет уменьшаться.

В работах [23] предложен алгоритм разностной функции, который позволяет производить искусственное расширение ИПТ. Предложенный метод основан на том предположении, что приращение вторичного тока в ИПТ между отсчетами одинаковое. Таким образом, используя несколько отсчетов ИПТ, можно прогнозировать следующий отсчет вне этой зоны. Для наиболее точного прогнозирования авторы предлагают следующую формулу:

$$i_{2e}(k) = 4i_2(k-1) - 6i_2(k-2) + 4i_2(k-3) - i_2(k-4). \quad (14)$$

К достоинству предложенного метода можно отнести высокую точность восстановленных отсчетов  $i_1'$  на коротком интервале прогнозирования и простоту определения начала процесса насыщения ТТ. Однако погрешность этого метода прямо пропорциональна количеству прогнозируемых отсчетов, вследствие чего количество отсчетов  $i_1'$  ограничено.

АПРОБАЦИЯ МЕТОДОВ

В настоящем разделе рассматриваются результаты апробации рассмотренных ранее современных алгоритмов [11, 12, 14, 15, 17-23] в среде Matlab с использованием математической модели ТТ, предложенной в [24]. Характеристика намагничивания модели ТТ близка к ПХН [4]. В данной модели используется ТТ ТФНД – 110М со следующими параметрами:  $R_2=3,7$  Ом,  $L_2=3,566$  мГн,  $n_1=800/5$  и  $S=17,75 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup> [25]. Форма первичного тока  $i_1$  при КЗ описывается следующей формулой:

$$i_1(t) = 45000 \sin\left(314t - \frac{\pi}{2}\right) + 47000e^{-\frac{t}{0.1}}. \quad (15)$$

Поскольку предложенный в [17,18] метод не способен восстанавливать искаженный вторичный ток ТТ с характеристикой намагничивания, близкой к ПХН, то используется модель ТТ с СХН. В модель закладывается ТПЛ–10К со следующими параметрами:  $R_2=1$  Ом,  $L_2=1,0828$  мГн,  $n_1=300/5$  и  $S=12,75 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup> [25]. Форма входного сигнала описывается следующим выражением:

$$i_1(t) = 13200e^{-\frac{t}{0.1}} \sin(314t) + 14800e^{-\frac{t}{0.1}}. \quad (16)$$

На рис. 5 представлена осциллограмма токов модели ТТ с СХН. Линия 1 соответствует первичному току (16), а линия 2 – вторичному току.

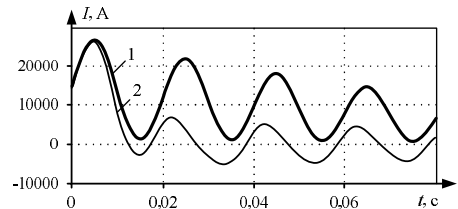


Рис. 5. Осциллограмма токов ТТ с СХН

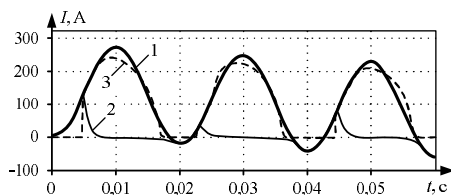


Далее приводятся результаты, полученные в ходе вычислительных экспериментов с использованием численного моделирования.

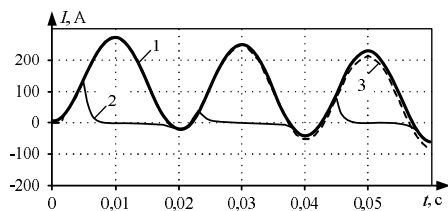
На **рис. 6** представлен результат работы метода, рассматриваемого в [11,12]. Сплошная линия 1 соответствует приведенному ко вторичной цепи первичному току, сплошная линия 2 – искаженному вследствие насыщения вторичному току, а пунктирная линия 3 – восстановленному току.

Результат восстановления вторичного тока с помощью метода, предложенного в работах [14,15], представлен на **рис. 7**. Из осциллограммы видно, что в ИПТ (сплошная линия 2) присутствуют отсчеты, которых достаточно для решения уравнений (14), (15). В момент времени 4,5 мс начинается искажение вторичного тока  $i_2$  относительно приведенного ко вторичной цепи первичного тока (сплошная линия 1). Алгоритм обнаруживает начало этого участка и запускает процесс восстановления (пунктирная линия 3).

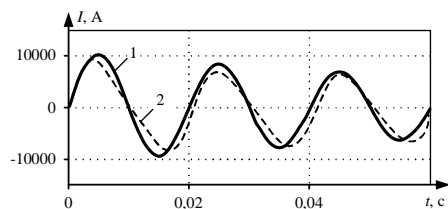
Результат восстановления вторичного тока с помощью метода, предложенного в работах [17,18], представлен на **рис. 8**. Пунктирная линия 1 соответствует приведенному ко вторичной цепи первичному току, а сплошная линия 2 – периодическому восстановленному току.



**Рис. 6.** Восстановление вторичного тока методом [11, 12]



**Рис. 7.** Восстановление вторичного тока методом [14, 15]

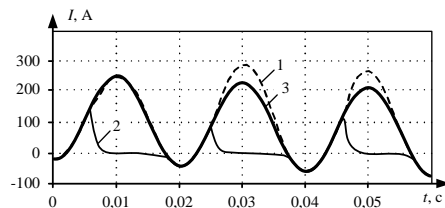


**Рис. 8.** Восстановление вторичного тока методом [17, 18]

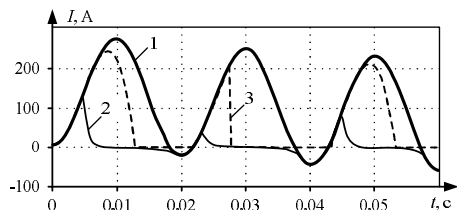
На **рис. 9** представлен результат работы алгоритма, предложенного в работах [20, 22]. На этом рисунке сплошные линии 1 и 2 соответствуют приведенному к вторичной цепи первичному току и, соответственно, измеренному вторичному току, а пунктирная линия 3 – восстановленному току. Как видно из рисунка, после КЗ в магнитопроводе ТТ повышается индукция, вызывающая искажение вторичного тока. После обнаружения роста индукции происходит запуск алгоритма, и по зависимости  $i_{02}=f(\Phi)$  (см. **рис. 3**), которая получается на базе вольт-амперной характеристики [21], отыскивается намагничивающий ток  $i_0$ , который складывается с искаженными отсчетами вторичного тока  $i_2$ .

Результат аппроксимации метода, предложенного в [23], показан на **рис. 10**. Как видно из осциллограммы, после начала искажения вторичного тока (сплошная линия 2) от приведенного ко вторичной цепи первичного тока (сплошная жирная линия 1) происходит частичное восстановление тока (пунктирная линия 3). Из данного графика хорошо видно, что зона точной экстраполяции меняется в зависимости от ширины ИПТ.

В **таблице** приведено сравнение рассмотренных ранее методов с различными подходами к восстановлению вторичного тока, для каждого из них определена токовая  $f_i$  и полная погрешность  $\varepsilon$  [5] восстановленного тока на интервале моделирования (6 мс). Необходимо отметить, что токовая погрешность  $f_i$  вторичного тока моделируемого сигнала  $i_2$  без использования методов компенсации при насыщении сердечника составляет порядка 70–80%.



**Рис. 9.** Восстановление вторичного тока методом [20, 22]



**Рис. 10.** Расширение ИПТ методом [24]

Сравнительная таблица методов восстановления вторичного тока в режиме насыщения сердечника ТТ

Источник	Подход	Достоинства и недостатки	$f_i$ , %	$\epsilon$ , %
[11-12]	На основе вторичного тока без использования характеристики намагничивания	(+) Небольшое количество коэффициентов позволяет сократить ИПТ (-) Невысокая точность	4,9	22,3
[14,15]		(+) Высокая точность (-) При длительном переходном процессе будет возрастать погрешность	3	8,77
[23]*		(+) Обладает высокой точностью при небольшом расширении ИПТ (-) Не обладает способностью полностью восстановить искаженный ток	31,7	77,9
[17-18]	На основе определения индукции и индуктивности намагничивания с использованием характеристики намагничивания	(+) Небольшое количество вычисления (-) При глубоком насыщении не способен восстановить искаженный ток	9,8	30,3
[20,22]		(+) Способность восстанавливать искаженный сигнал независимо от степени насыщения сердечника (-) Зависимость от точности используемой характеристики намагничивания	-13,5	7,9

\*Метод предназначен только для расширения ИПТ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В работе выполнен обзор существующих методов восстановления вторичного тока при КЗ с содержанием в первичном токе аperiodической составляющей. Выявлена степень проработанности методов повышения точности измерения вторичного тока в электрических сетях. Определены достоинства и недостатки существующих методов.

2. Погрешность ТТ в режимах КЗ выходит за пределы ее допустимости (10%), вследствие чего происходит отбраковка передаваемых данных, влияющая на правильную работу РЗА. В связи с этим при разработке алгоритмов, закладываемых в современных МПУ, должна быть предусмотрена компенсация искажений тока в режиме насыщения сердечника ТТ.

3. Отсутствие универсального технического решения приводит к необходимости поиска новых подходов, способных компенсировать искажения вторичного тока как в установившихся, так и в переходных режимах. Для решения этой проблемы предлагается рассмотреть разработку алгоритмов, использующих избыточность получаемой информации для повышения точности измерений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Трансформаторы тока : учеб. пособие / В.В. Афанасьев, Н.М. Адоньев, Л.В. Жалалис, И.М. Сирота, Б.С. Стогний. Ленинград : Энергия, 1980. 344 с.
2. Трансформаторы тока : учеб. пособие / В.В. Афанасьев, Н.М. Адоньев, В.М. Кибель, И.М. Сирота, Б.С. Стогний. Ленинград : Энергоатомиздат, 1989. 416 с.
3. Бачурин Н.И. Трансформаторы тока : учеб. пособие / Н.И. Бачурин. Москва: Энергия, 1964. 376 с.
4. Кужиков С.Л., Синельников В.Я. Защита шин электростанции и подстанции : учеб. пособие. М.: Энергоатомиздат, 1983. 184 с.
5. РД 153-34.0-35.301-2002. Инструкция по проверке трансформаторов тока, используемых в схемах релейной защиты и измерения. ОАО «Фирма ОРГЭС» и ОАО «Институт Энергосетьпроект».
6. Status on the First IEC 61850 Based Protection and Control, Multi-Vendor Project in the United States / The Grid Modernization Journal, №8, 2007.

7. Case Studies. IEC 61850 at work / ABB Review Special Report, № 8, 2010.
8. C. Wong. IEC 61850 Next Gen Substation Automation / Materials of the Emerging Technology Roundtable – Substation Automation/IEC 61850. USA, 2016.
9. Иванов С.В., Бузов А.В. Централизованная релейная защита подстанции 110/35/6 кВ на принципах системной интеграции алгоритмов защит в едином устройстве [Электронный ресурс] // Электроэнергия. Передача и распределения. 2017. №5.
10. WG K15 Report – Centralized substation protection and control, 2015.
11. Атишкин А.Б. Коррекция вторичного тока при насыщении измерительных трансформаторов [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://releematika.ru/images/news/Корректор%20тока.pdf>
12. Атишкин А.Б. Адаптивные модификации алгоритма дифференциальной защиты трансформатора : автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02 / Нижегородский гос. техн. ун-т. Чебоксары, 2019. 24 с.
13. Кужиков С.Л. Обеспечение правильной работы микропроцессорных устройств дифференциальной защиты при насыщении трансформаторов тока // Известия вузов. Электромеханика. 2009. №4. С. 12-18.
14. Jiuping P. An efficient compensation algorithm for CT saturation effects [Electronic source] / IEEE Transactions on power delivery. 2004. №19. P. 1623-1628.
15. Рыбалкин А.Д., Шурупов А.А., Ермолкин И.А. Прогнозирование тока КЗ при насыщении ТТ [Электронный ресурс] // Цифровая электротехника: проблемы и достижения. 2016. № 5. С. 55-65. Режим доступа: <https://ezgroxy.ufr.ru:3054/item.asp?id=30489960>
16. Кужиков С.Л. О способах уменьшения влияния погрешностей ТТ в переходных режимах на работу релейной защиты электроэнергетических систем [Электронный ресурс] // Современные направления развития систем РЗА энергосистем. 2009. С. 99-104.
17. Дегтярев А.А. Автоматизированный контроль состояния трансформаторов тока высокого и сверхвысокого напряжения : автореф. дис. ... канд. техн. наук 02.14.02 / Южно-Российский гос. техн. ун-т. Новочеркасск, 2011. 16 с.
18. Кужиков С.Л., Дегтярёв А.А. О восстановлении периодической составляющей первичного тока ТТ в переходном режиме // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2011. №3. С. 29-31.
19. Kang Y.C., Kang S.H., Park J.K., Johns A.T., Aggarwal R.K. Development and hardware implementation of a com-

- pensating algorithm for the secondary current of current transformers [Electronic source] // IEEE Proc. Electr. Power appl. 1996. No.143. P. 41-49.
20. Kang Y.C. Park J.K., Kang S.H., Johns A.T., Aggarwal R.K. An algorithm for compensating secondary current of current transformers [Electronic source] // IEEE Transactions power delivery. 1997. No.12. P. 116-122.
  21. Kang Y. An algorithm for detecting CT saturation using the secondary current third-derivative function [Electronic source] / Y. Kang, S. Kang, P. Crossley // IEEE Bologna PowerTech Conf. 2003. P. 320-326.
  22. Kang Y.Ch., Ui J.L., Sang H.K., Crossley P. Compensation of the distortion in the secondary current caused by saturation and remanence in a CT [Electronic source] // IEEE Transactions power delivery. 2004. №19. P. 1642-1649.
  23. Wiszniewski A., Rebizant W., Schiel L. Correction of current transformer transient performers [Electronic source] // IEEE Transactions power delivery. 2008. №23. P. 624-632.
  24. Петелин С. Модель однофазного трансформатора тока с насыщением [Электронный ресурс] // Цифровая подстанция. Режим доступа: <http://digitalsubstation.com/blog/2017/05/29/model-odnofaznogo-transformatora-toka-s-nasyshheniem/>
  25. Королев Е.П., Либерзон Э.М. Расчет допустимых нагрузок в токовых цепях релейной защиты. М.: Энергия, 1980. 208 с.

Поступила в редакцию 11 сентября 2019 г.

INFORMATION IN ENGLISH

SURVEY OF DATA RELIABILITY IN DIGITAL SUBSTATION

Andrey V. Pazderin

D.Sc. (Engineering), Professor, Head of the Department of Automated Electrical Systems, Ural Federal University named after the first president of Russia B.N. Yeltsin, Ural Power Engineering Institute, Yekaterinburg, Russia. E-mail: a.v.pazderin@urfu.ru. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4826-2387>.

Pavel V. Murzin

Assistant Professor, Department of Automated Electrical Systems, Ural Federal University named after the first president of Russia B.N. Yeltsin, Ural Power Engineering Institute, Yekaterinburg, Russia. E-mail: p.v.murzin@urfu.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1593-9833>.

Ismoil N. Odinaev

Postgraduate Student, Research Engineer, Department of Automated Electrical Systems, Ural Federal University named after the first president of Russia B.N. Yeltsin, Ural Power Engineering Institute, Yekaterinburg, Russia. E-mail: ismoil.odinaev@urfu.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2434-1929>.

Faridun Z. Bobokalonov

Master's Degree Student, Research Engineer, Department of Automated Electrical Systems, Ural Federal University named after the first president of Russia B.N. Yeltsin, Ural Power Engineering Institute, Yekaterinburg, Russia. E-mail: faridun.94@iist.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8740-0303>.

At present, great attention is paid to the problem of improving the accuracy of measurement information received in the electrical networks. The highest error is observed in currents obtained using instrumental electromagnetic current transformers (CT). It takes place due to CT saturation core during transient states including fault in the primary, costumer commutations and magnetizing-current inrush. The saturation process can start in the first cycle or in the following cycles of transient state.

The article represents literature analysis of increasing data reliability received from CT during both transient state and steady-state mode. The techniques based on usage of distorted secondary current, CT core magnetization curve and magnetic flux according to start of saturation process in the CT magnetic system. The sophistication of existing methods was revealed and their advantages and disadvantages are showed.

In the beginning of the paper, the systematization of existing methods was performed on the basis of classical and modern methods. Classical methods are characterized using optimization of core absolute permeability. Modern techniques of secondary current compensation make use of the mathematic modeling using curve magnetization and prediction of the transient values of the distorted signal. Further, testing results of more effective existing techniques and their comparison analysis are performed. During testing, the accuracy of secondary current compensation is determined with sampling rate according to IEC 61 850 standard i.e. 80 samples per cycle of commercial frequency (4 kHz). In conclusion, the appropriateness of making use of the

described techniques was proved and future work in this direction was proposed.

**Keywords:** current transformer (CT), secondary current, CT core saturation, magnetizing current, magnetization curve.

REFERENCES

1. Afanasiev V.V., Adoniev N.M., Kibel V.M., Sirota I.M., Stognij B.S. Transformatory toka [Current transformers]. Leningrad: Energy, 1989. 419 p. (In Russian)
2. Afanasiev V.V., Adoniev N.M., Zhalalis L.V., Sirota I.M., Stognij B.S. Transformatory toka [Current transformers]. Leningrad: Energy, 1980. 344 p. (In Russian)
3. Bachurin N.I. Transformatory toka [Current transformers]. Moscow: Energy, 1964. 376 p. (In Russian)
4. Kuzhekov S.L. Zashhita shin jelektrostantsii i podstancii [Busbar protection]. Moscow: Energoatomizdat, 1983. 184 p. (In Russian)
5. RD 153-34.0-35.301-2002. Instrukcija po proverke transformatorov toka, ispolzuemyh v shemah relejnoj zashhity i izmerenija [Instruction for checking CT used in protective relay schemes]. OJSC «Firma ORGRJeS» and OJSC «Power Grid Planning Institute». (In Russian)
6. Status on the First IEC 61850 Based Protection and Control, Multi-Vendor Project in the United States / The Grid Modernization Journal, no. 8, 2007.
7. Case Studies. IEC 61850 at work / ABB Review Special Report, no. 8, 2010.

8. C. Wong. IEC 61850 Next Gen Substation Automation / Materials of the Emerging Technology Roundtable – Substation Automation/IEC 61850. USA, 2016.
9. Ivanov S. V., Burov A. V. Centralized substation protection 110/35/10 kV based on principles of system integration of protection algorithms in a single device. *Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenija* [Electricity. Transmission and distribution], 2017, no. 5. (In Russian)
10. WG K15 Report – Centralized substation protection and control, 2015.
11. Atnishkin A.B. Secondary current correction during instrument transformer saturation. <https://reematika.ru/images/news/Koppekrop%20roka.pdf>
12. Atnishkin A.B. Adaptivnye modifikatsii algoritma differentsial'noj zashhity transformatora. Avtoref. Kand. Diss. [Adaptive modifications of the differential protection algorithm of the transformer. Abstract of Ph.D. Diss.]. Cheboksary, 2019, 24 p.
13. Kuzhekov S.L. Providing the correct operation of microprocessor differential protection device. *Izvestija vuzov. Elektromekhanika* [News of Higher Educational Institutions. Electrician], 2009, no. 4, pp. 12-18. (In Russian)
14. Jiuping P. An efficient compensation algorithm for CT saturation effects [Electronic source] // *IEEE Transactions on power delivery*, 2004, no. 19, pp. 1623-1628.
15. Rybalkin A.D., Shurupov. A.A., Ermolkin I.A. Prediction on short current during CT saturation. *Tsifrovaja elektrotehnika, problemy i dostizhenija* [Digital electrical engineering, Challenges and achievements], 2016, no. 5, pp. 55-56. (In Russian)
16. Kuzhekov S.L., Degtjarev A. A. About reducing influence of CT errors on the relay protection operation of electrical power systems. *Sovremennye napravlenija razvitiya sistem RZiA energosistem* [Modern trends in development of electrical systems protection], 2009, pp. 99-104. (In Russian)
17. Degtjarev A. A. Avtomatizirovannyj kontrol sostojanija transformatorov toka vysokogo i sverhвысокogo naprjazhenija. Avtoref. Kand. Diss. [Automated control of the state of high and extra high voltage CT. Thesis of a Ph.D. Diss.]. Novoherkassk, 2011. 16 p. (In Russian)
18. Kuzhekov S.L., Degtjarev A. A. On the correction of the periodic component of the CT primary current during transition mode. *Izvestija vuzov Jelektromekhanika* [News of Higher Educational Institutions. Electrician], 2011, no. 3, pp. 29-31. (In Russian)
19. Kang Y.C., Kang S.H., Park J.K., Johns A.T., Aggarwal R.K. Development and hardware implementation of a compensating algorithm for the secondary current of current transformers [Electronic source] // *IEEE Proc. Electr. Power appl.* 1996, no. 143, pp. 41-49.
20. Kang Y.C., Park J.K., Kang S.H., Johns A.T., Aggarwal R.K. An algorithm for compensating secondary current of current transformers [Electronic source] // *IEEE Transactions power delivery*. 1997, no. 12, pp. 116–122.
21. Kang Y., Kang S., Crossley P. An algorithm for detecting CT saturation using the secondary current third-derivative function [Electronic source] // *IEEE Bologna PowerTech Conf.* 2003, pp. 320–326.
22. Kang Y. Ch., Ui J.L., Sang H.K., Crossley P. Compensation of the distortion in the secondary current caused by saturation and remanence in a CT [Electronic source] // *IEEE Transactions power delivery*. 2004, no. 19, pp. 1642–1649.
23. Wiszniewski A., Rebizant W., Schiel L. Correction of current transformer transient performers [Electronic source] // *IEEE Transactions power delivery*. 2008, no. 23, pp. 624–632.
24. Petelin S. Singl phase CT model with saturation. *Cifrovaja podstancija* [Digital substation], <http://digitalsubstation.com/blog/2017/05/29/model-odnofaznogo-transformatora-toka-s-nasyshheniem/>
25. Korolev E.P., Liberzon Je.M. Raschet dopustimyh nagruzok v tokovyh tseppjah relennoj zashhity [Calculation of loadability in the current circuits of relay protection]. Moscow: Energy, 1980, 208 p. (In Russian)

Направления исследований для повышения достоверности информации цифровой подстанции / А.В. Паздерин, П.В. Мурзин, И.Н. Одинаев, Ф.З. Бобокалон // *Электротехнические системы и комплексы*. 2019. № 4(45). С. 4-11. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-4\(45\)-4-11](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-4(45)-4-11)

Pazderin A.V., Murzin P.V., Odinaev I.N., Bobokalonov F.Z. Survey of Data Reliability in Digital Substation. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2019, no. 4(45), pp. 4-11. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-4\(45\)-4-11](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-4(45)-4-11)

Русскин В.А., Балковой Н.Н., Бутаков А.Н.

Акционерное общество «Научно-производственный центр «Полус»

## ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ОТЕЧЕСТВЕННОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ СИГНАЛОВ ДАТЧИКОВ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ 1310НМ025 В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ ДВИГАТЕЛЯ-МАХОВИКА

Рассмотрены особенности проектирования системы автоматического управления двигателя-маховика системы ориентации и стабилизации космического аппарата. Представлены алгоритмы обработки данных микросхемы 1310НМ025 производства АО «ПКК «Миландр», работающей в режиме следящего аналого-цифрового преобразователя сигналов синусно-косинусного вращающегося трансформатора с формированием кодов угла и скорости. Эта микросхема применена в качестве источника сигнала обратной связи по частоте вращения астатической системы управления динамическим моментом. Приведенные алгоритмы позволяют расширить разрешающую способность выходной координаты микросхемы, не ограничивая при этом входные сигналы по частоте вращения датчика. Два измерительных канала микросхемы настроены на разную разрешающую способность и принимают одинаковые модулированные сигналы указанного трансформатора, используемого в качестве датчика положения ротора. Таким образом, с помощью предлагаемого алгоритма сигналы двух измерительных каналов сведены с расширением разрядной сетки искомого сигнала частоты вращения при максимально возможной для микросхемы 1310НМ025 разрешающей способности. По отдельному алгоритму определено количество переполнений первого (точного) канала по сигналам второго (грубого) канала в момент включения прибора. При помощи этого же алгоритма проведен контроль правильности формирования частоты вращения в целом. Рассмотренная система реализована на полностью отечественной элементной базе. Программная реализация алгоритмов выполнена с использованием языка описания цифровой аппаратуры Verilog HDL. Разработанный макет преобразователя сигнала частоты вращения и всей системы управления динамическим моментом двигателя-маховика с обратной связью по скорости прошел лабораторные испытания с положительными результатами.

**Ключевые слова:** измерение частоты вращения, астатическая система управления, управляющий двигатель-маховик, программируемая логика, следящий аналого-цифровой преобразователь, динамический момент, ускорение, отечественная элементная база, система ориентации и стабилизации космического аппарата, вращающийся трансформатор, датчик положения ротора, цифровая система управления, сведение сигналов измерительных каналов, повышение разрядности.

### ВВЕДЕНИЕ

Управляющие двигатели-маховики (УДМ) находят широкое применение в системах ориентации и стабилизации средних и малых космических аппаратов [1–4]. Основным управляющим воздействием для системы ориентации является динамический момент, который складывается из создаваемого электромеханическим преобразователем электромагнитного момента и суммы механических и аэродинамических моментов сопротивления вращению ротора УДМ [5, 6]. Очевидно, что для наилучшей работы таких систем необходимо, чтобы динамический момент мог регулироваться в широком диапазоне и не было статической ошибки, то есть во всем диапазоне скоростей должно быть сформировано одинаковое ускорение, соответствующее заданному коду управления.

В качестве электромеханического преобразователя используются двухфазные синхронные двигатели с постоянными магнитами и синусоидальным распределением магнитного поля в зазоре, обладающие высокой степенью надежности, большим ресурсом, линейной механической характеристикой, а создаваемый ими электромагнитный момент прямо пропорционален току в фазах. Нагрузки механической части (маховик, подшипники, смазка) в целом имеют вентиляторный характер, а момент трогания обусловлен трением покоя подшипников и смазки. Эти факторы являются возмущающими воздействиями для УДМ. Вентиляторный характер нагрузки приводит к тому, что мо-

мент сопротивления увеличивается в квадратичной зависимости от частоты вращения вала. Это в результате приводит к снижению динамического момента на более высоких частотах вращения, за счет чего появляется ошибка регулирования по возмущению при управлении по току.

Момент трогания не позволяет использовать малые управляющие воздействия, так как создаваемого электромагнитного момента не хватает для его преодоления, вследствие чего возникает зона нечувствительности прибора. Эта проблема известна, достаточно подробно описана в литературе вместе со способами ее решения: использованием системы автоматического управления с обратной связью по частоте вращения [7] или углу [8–10]. Исходя из сказанного, предлагается система с обратной связью по частоте вращения и повышенной разрешающей способностью на основе отечественного преобразователя сигналов датчиков перемещения 1310НМ025 производства АО «ПКК «Миландр».

### ОПИСАНИЕ РАЗРАБАТЫВАЕМОЙ СИСТЕМЫ

Система подчиненного регулирования (рис. 1) включает в себя цифровой регулятор скорости (РС), реализованный на ПЛИС, и регулятор тока (РТ), задающий ток в фазах  $I_{ф.удм}$  УДМ. Датчик тока (ДТ) формирует аналоговый эквивалент мгновенного тока в фазе двигателя в качестве обратной связи. Датчиком положения ротора (ДПР) служит синусно-косинусный вращающийся трансформатор, сигналы фаз которого преобразуются микросхемой 1310НМ025 в цифровые коды скорости и угла для РС. Выходными переменными системы являются динамический и кинетический моменты.



Таблица 1  
Настройка разрядности скорости микросхемы 1310НМ025 при номинальной тактовой частоте  $f_{clk}$

Vel_resolution	Максимальная частота вращения, Гц	Значение младшего разряда, Гц
0	$\pm 122$	0,0037
2	$\pm 488$	0,0149
3	$\pm 976$	0,0298
5	$\pm 3904$	0,1192
7	$\pm 5000$	0,4768
9	$\pm 5000$	1,9072
11	$\pm 5000$	7,6288
13	$\pm 5000$	30,5152

АЛГОРИТМ ВЫЧИСЛЕНИЯ КОДА СКОРОСТИ

Вопрос переполнения регистра скорости остается открытым, так как максимальный код скорости  $N_{\omega_{max}}$  (соответствующий частоте ДПП  $\omega_{max}$ ) при малых значениях  $Vel\_resolution$  существенно ниже требуемой максимальной частоты вращения ДПП привода. При  $Vel\_resolution = 0$  максимальная допустимая частота ДПП  $\omega_{max} = \pm 122$  Гц при необходимых  $\pm 300$  Гц, а в 3-й ревизии регистр кода скорости переполняется при  $\omega_{max} = \pm 12,2$  Гц. Контроль скорости в заданном диапазоне обеспечивается алгоритмом (рис. 3).

На рис. 4 символом  $Vel$  обозначено цифровое значение необработанного кода скорости с точного канала, а  $N_{\omega_{oc}}$  – полученного по вышеприведенному алгоритму кода частоты вращения расширенной разрядности и используемого в обратной связи корректирующего устройства. Символ  $N$  показывает номер диапазона (количество переполнений точного канала). Максимальный код регистра  $Vel$ , после которого он переполняется, обозначен как  $N_{\omega_{max}}$ .

Примем допущение, что при включении прибора частота вращения была нулевой (либо находилась в диапазоне, при котором  $N=0$ ). Поскольку сигнал частоты ДПП является зашумленным, то в точках, обозначенных на рис. 2 «Переход 1» и «Переход 2», будет не одиночное, а многократное переполнение (дребезг). Для получения гладкого перехода используется следующая методика. Вычисляется разность между текущим и предыдущим отсчетами необработанного кода скорости  $Vel$ . Очевидно, что если эта разность близка или равна  $2N_{\omega_{max}}$  (на практике можно использовать гораздо меньшее число), то переполнение произошло из отрицательной области в положительную (частота вращения ДПП уменьшилась), и наоборот, если разность около  $-2N_{\omega_{max}}$ , то переполнение произошло из положительной области в отрицательную (то есть частота увеличилась). Проблема дребезга кода скорости решается тем, что в случае ускорения количество переходов через переполнение будет нечетным. В то же время, если

при ускорении в точке перехода двигатель начал тормозиться, то количество переходов останется четным. Другими словами, четность или нечетность количества переходов через переполнение однозначно зависит только от того, вышел ли сигнал из переполнения в ту же полуплоскость, в которую и заходил, или же вышел с другой стороны. Имеются в виду положительная и отрицательная полуплоскости на графике  $Vel$  (рис. 4). Значение кода скорости для осуществления обратной связи  $N_{\omega_{oc}}$  вычисляется по формуле

$$N_{\omega_{oc}} = Vel + N \cdot 2N_{\omega_{max}} + N, \tag{2}$$

где  $N_{\omega_{oc}}$ , о.е. – итоговый код скорости, используемый в качестве сигнала обратной связи;  $Vel$ , о.е. – код скорости точного канала микросхемы 1310НМ025;  $N$  – количество переполнений регистра  $Vel$  (текущий номер интервала суммирования);  $2N_{\omega_{max}}$ , о.е. – абсолютное значение размера регистра  $Vel$  для микросхемы 1310НМ025.

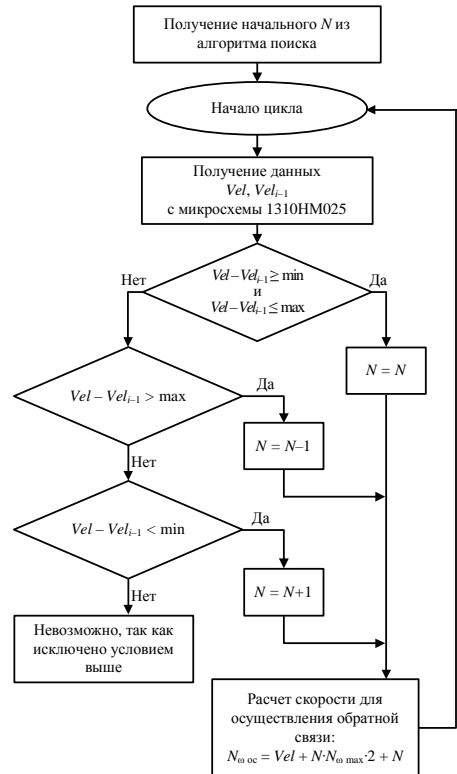


Рис. 3. Блок-схема алгоритма вычисления кода скорости

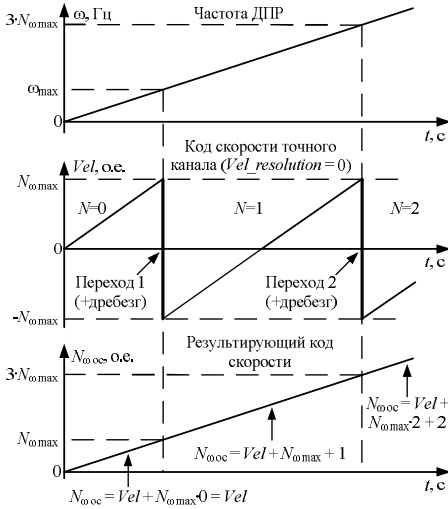


Рис. 4. Временные диаграммы работы алгоритма суммирования кода скорости

Для микросхемы 3-й ревизии  $N_{\omega \max}=3276$  о.е., а для остальных ревизий  $N_{\omega \max}=32767$  о.е.

Дребезг в моменты перехода сигнала точного канала скорости (с  $Vel\_resolution = 0$ ) возникает из-за зашумленности выходного кода скорости. Рассмотрим участок дребезга более подробно (рис. 5).

На рис. 5 точки перехода из положительной области в отрицательную имеют нечетные номера, а из отрицательной области в положительную – четные. Если разность между текущим измеренным значением скорости  $Vel$  и предыдущим  $Vel_{i-1}$  меньше, чем максимально допустимое приращение скорости за интервал ее обновления с учетом зашумленности сигнала точного канала, то, очевидно, произошел переход из положительной области в отрицательную, и необходимо увеличить значение выходного кода счетчика интервалов суммирования  $N$  на единицу. Переход из отрицательной области в положительную осуществляется аналогично с уменьшением кода счетчика интервалов на единицу. Результирующий код  $N_{\omega oc}$  по формуле (2) получится таким, каким было бы записанное в регистр  $Vel$  значение при отсутствии переполнения. Количество переходов при дребезге не играет роли, потому что переход в отрицательную область всегда нечетный. А это означает, что результирующий код счетчика  $N$  всегда будет больше либо меньше начального на единицу при многократном переходе через переполнение, остальные переходы вследствие дребезга будут взаимно скомпенсированы.

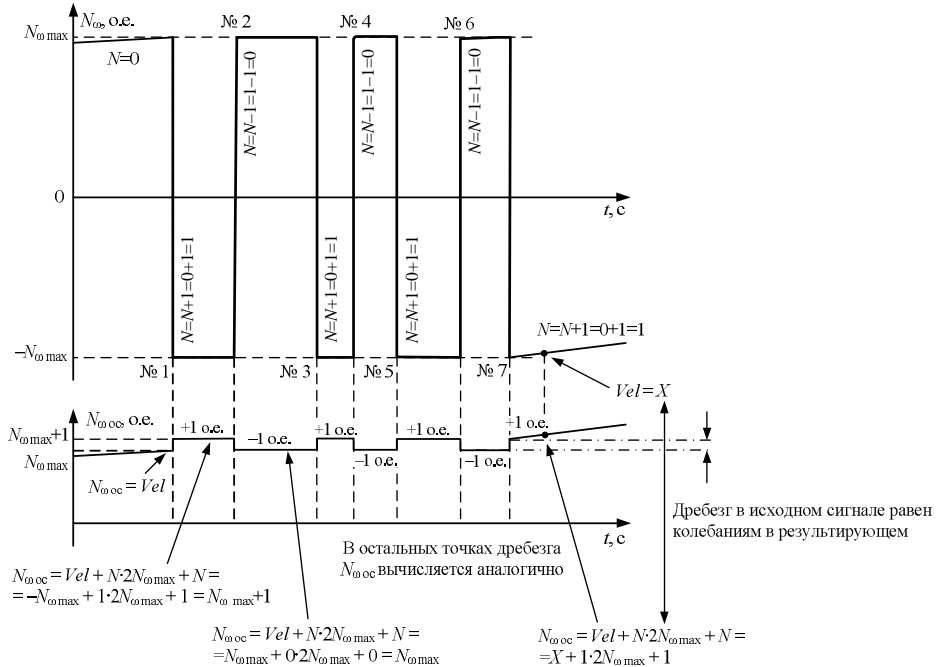


Рис. 5. Временные диаграммы работы алгоритма суммирования кода скорости во время переполнения исходного сигнала



АЛГОРИТМ ПОИСКА НАЧАЛЬНОГО ЗНАЧЕНИЯ

Вышеописанный алгоритм не учитывает поведение системы, если при включении прибора скорость была ненулевой (не в интервале  $N=0$ ), и в этом случае код  $N_{0\text{ос}}$  будет определен неправильно. Для устранения этой ошибки был разработан алгоритм определения начального участка скорости (рис. 6). Определить этот участок возможно, если использовать второй измерительный канал микросхемы 1310HM025 и подать на него тот же сигнал, что и на первый. Требуемые настройки микросхемы указаны в табл. 2.

В регистре  $C2ResCntnl$  биты с 8-го по 11-й относятся к регистру  $Vel\_resolution$  второго канала. Их необходимо установить так, чтобы полный диапазон частоты ДПР попадал в диапазон кодов скорости в регистре  $Vel$  второго (грубого) канала скорости ( $\pm 3276$  о.е. и  $\pm 32767$  о.е. для 3-й и остальных ревизий соответственно).

Алгоритм начинает свою работу в случае, если при включении код скорости грубого канала составляет больше  $N_{0\text{max}2}$ . Расчет кода счетчика интервалов подчиняется следующей зависимости (для случая, когда  $|Vel2| > N_{0\text{max}2} + \Delta$ ):

$$N = \frac{|Vel2| - (N_{0\text{max}2} + \Delta + 1)}{2N_{0\text{max}2}} + 1, \quad (3)$$

где  $N$  – код счетчика количества переполнений регистра  $Vel$  (текущий номер интервала суммирования);  $Vel2$  – код скорости грубого канала;  $N_{0\text{max}2}$  – код скорости грубого канала, при котором происходит первое переполнение точного канала (при  $N=0$ );  $2N_{0\text{max}2}$  – код скорости грубого канала, соответствующий диапазону переполнения точного канала (полный диапазон точного канала от минимального отрицательного значения до максимального положительного).

Для 3-й ревизии используется  $Vel\_resolution = 5$ . Частоте ДПР 300 Гц соответствует код 2518 о.е. по грубому каналу, а частоте  $\omega_{\text{max}}=12,2$  Гц, при которой точный (первый) канал с  $Vel\_resolution = 0$  переполняется первый раз, – код грубого канала  $N_{0\text{max}2}=102$  о.е.

Необходимо учесть тот факт, что грубый канал также является зашумленным и имеет дребезг такого же рода, как и точный. Для этого нужно рассматривать не точки грубого канала, при которых происходит переполнение точного, а их окрестности  $\pm\Delta$ , заведомо выбрав это значение больше уровня шума. Поиск начального интервала скорости выполняется по алгоритму (рис. 6) один раз после включения, и по окончании его работы коду счетчика интервалов суммирования сигнала скорости точного канала присваивается значение  $N$ . Далее работа алгоритма суммирования кода скорости продолжается уже с этим значением в качестве начального. Вследствие параллельной архитектуры синтезированного на ПЛИС устройства возможно использование данного алгоритма в режиме реального времени совместно с цифровым регулятором с целью отслеживания и коррекции ошибок суммирования кода скорости в целом.

Таблица 2

Настройки 1310HM025 для работы алгоритма поиска начального значения

Наименование регистра	Значение в двоичном коде
<i>AFE_conf</i>	0100 0000 0101 1011
<i>Mode_stat</i>	1010 1111 0100 1111
<i>C1Cntnl</i>	1010 0010 0001 0100
<i>C2Cntnl</i>	0010 1010 0000 1110
<i>C2ResCntnl</i>	0000 0101 1100 0010

В начальный момент времени, когда двигатель вращается с некоторой скоростью, возможны следующие варианты численного значения частоты ДПР:

- на интервале непрерывности кода скорости по точному каналу за пределами  $\Delta$ -окрестности;
- в окрестности точки переполнения точного канала  $\pm\Delta$ .

В первом случае необходимо провести расчет начального значения  $N$  по формуле (3). В случае если  $Vel2 \leq N_{0\text{max}2} + \Delta$ , необходимо принять  $N = 0$  (см. рис. 6). Знак кода счетчика интервалов  $N$  берется таким же, как и знак кода скорости грубого канала  $Vel2$ . Для этого достаточно подставить старший бит кода  $Vel2$  вместо старшего бита кода  $N$ . На этом работа алгоритма поиска начального интервала суммирования заканчивается, далее работает основной алгоритм.

Во втором случае необходима проверка дополнительных условий. После вычисления начального значения  $N$  необходимо вычислить код скорости грубого канала, соответствующий частоте вращения СКВТ, при которой код скорости точного канала переполняется. Расчет выполняется по формуле

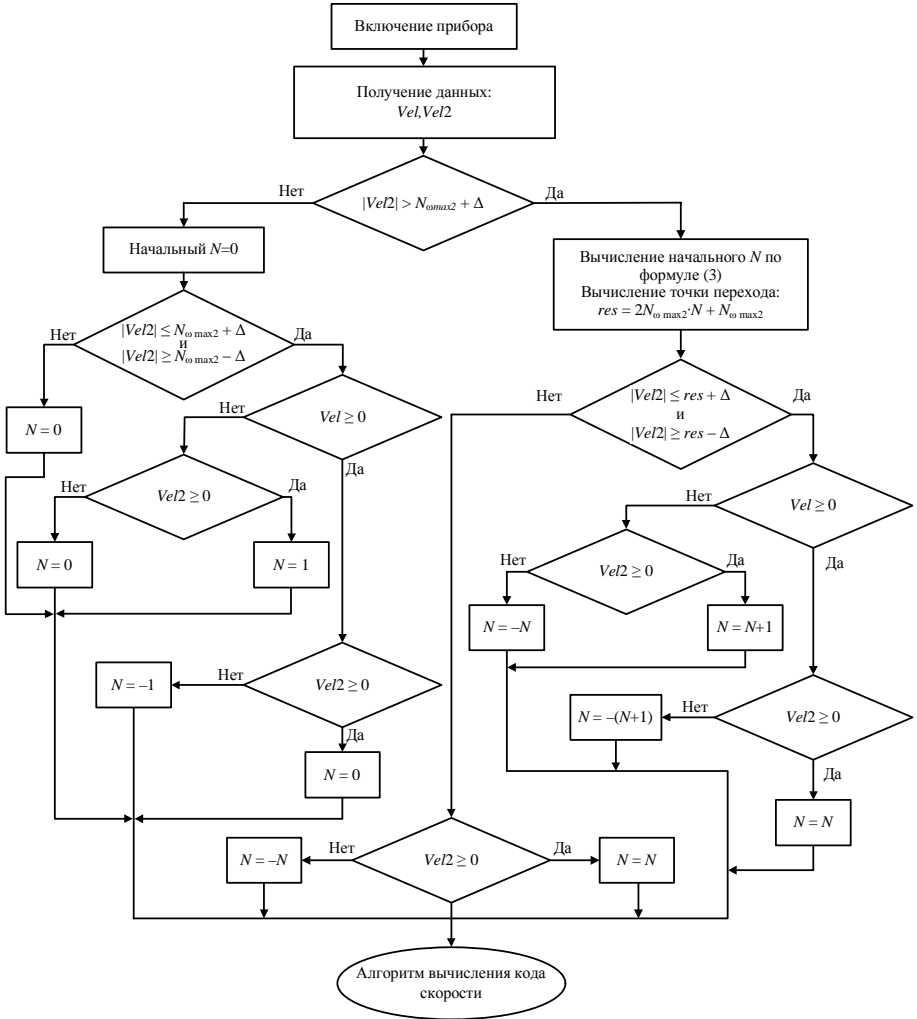
$$res = 2N_{0\text{max}2}N + N_{0\text{max}2}, \quad (4)$$

где  $N$  – начальный номер интервала суммирования,  $N_{0\text{max}2}=102$  для 3-й ревизии.

Код счетчика интервалов  $N$  не может колебаться более чем на единицу только в одну сторону, то есть в окрестности точки перехода (где и происходит дребезг) могут быть только два известных значения  $N$ , причем одно из них вычисляется по формуле (3). А второе либо больше, либо меньше на единицу в зависимости от направления вращения и, соответственно, знаков  $Vel2$  и  $N$ . Если двигатель вращался при включении в зоне дребезга в положительном направлении (определяется по грубому каналу), а также скорость точного канала была  $Vel > 0$  в зоне дребезга, то фактически либо переход еще не произошел, либо имеется дребезг, но при включении расчет по алгоритму совпал по времени со скачком в положительную область. Тем не менее такая ситуация должна рассцениваться как отсутствие переполнения. В этом случае принимается значение  $N$ , вычисленное по формуле (3). Если  $Vel < 0$  в зоне дребезга, то либо произошел переход (устойчивый, уже без дребезга), либо аналогично с предыдущим случаем вычисление совпало с точкой дребезга в отрицательную сторону, и необходимо принять за начальное значение кода счетчика число  $N+1$ ,

так как значение  $N$ , вычисляемое по формуле (3), увеличится на единицу только при выходе из интервала  $(res - \Delta) \leq Vel2 \leq (res + \Delta)$  справа, в то время как значение кода счетчика интервалов, соответствующее действительной частоте вращения, вычисляемой по формуле (2), должно быть на единицу больше. Больше оно на единицу или меньше, определяется по точному каналу, а вернее, по его знаку (или старшему биту его цифрового кода). При реализации на ПЛИС можно прибавлять старший бит кода скорости точного канала к вычисленному по формуле (3) результату  $N$ .

При отрицательном направлении вращения ситуация аналогична. Разница состоит в том, что если  $Vel > 0$ , то переход уже произошел, и наоборот, при  $Vel < 0$  перехода нет. Можно также прибавлять старший бит  $Vel$ , так как для формулы (3) знак результирующего числа  $N$  берется равным знаком кода  $Vel2$ , в то время как в самой формуле промежуточные вычисления делаются по  $|Vel2|$ . Это помогает сократить прошивку ПЛИС. Пояснения для положительного направления вращения даны на рис. 7.



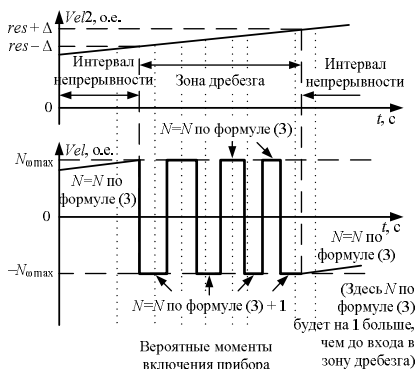


Рис. 7. Временные диаграммы работы алгоритма поиска начальной скорости

РЕЗУЛЬТАТЫ

Представленная система автоматического управления прошла лабораторные испытания. Работа регулятора скорости и тока показана на рис. 8. На рисунке приведены осциллограммы тока в фазе УДМ и выходного сигнала регулятора скорости (задание тока) при мгновенном изменении задания ускорения на максимальное значение. Максимальное пререгулирование составляет 32 %, время регулирования 350 мс. Качество переходных процессов является удовлетворительным.

Результаты работы алгоритма суммирования получены с использованием программы-терминала персонального компьютера (рис. 9).

Проверка работоспособности алгоритма поиска начальной скорости выполнялась следующим образом. Производилось включение прибора, осуществлялась подача тока управления, одновременно с этим отключалось и вновь подключалось питание прибора. В программе-терминале в моменты времени, соответствующие

ще отключению прибора, значение кода скорости отображалось как нулевое (рис. 10). Из рисунков видно, что предлагаемая система формирователя кода частоты вращения верно определяет начальную частоту ДПР при включении прибора, а также выполняет суммирование участков кода скорости, полученных от микросхемы 1310NM025.

При максимальной частоте вращения ДПР  $\pm 300$  Гц код скорости, полученный в результате работы алгоритма,  $N_{\omega}$  ос составляет 80576 о.е. и является 18-разрядным.

Применение микросхемы 1310NM025 позволяет существенно сократить количество используемых ЭРИ за счет встроенного в нее цифрового генератора синусоидального сигнала для питания обмотки возбуждения ДПР, а также отсутствия необходимости использования демодуляторов выходных сигналов ДПР. Микросхема имеет два измерительных канала, что делает ее уникальной в своем роде по сравнению с аналогами K5331HX055 и AD2S1210. Кроме того, это единственная отечественная микросхема преобразования сигналов датчиков перемещения, являющаяся радиационно-стойкой.

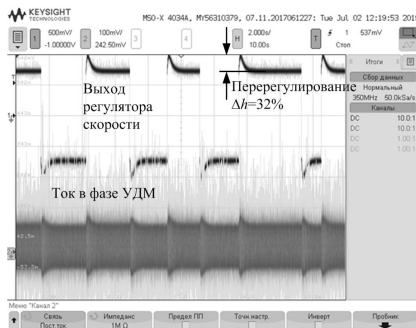


Рис. 8. Осциллограммы выходного сигнала регулятора скорости и тока в фазе УДМ

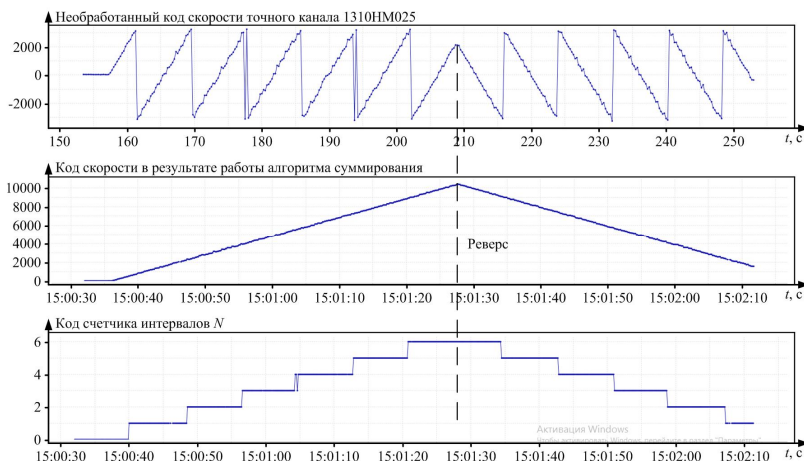


Рис. 9. Результат работы алгоритма суммирования кода скорости

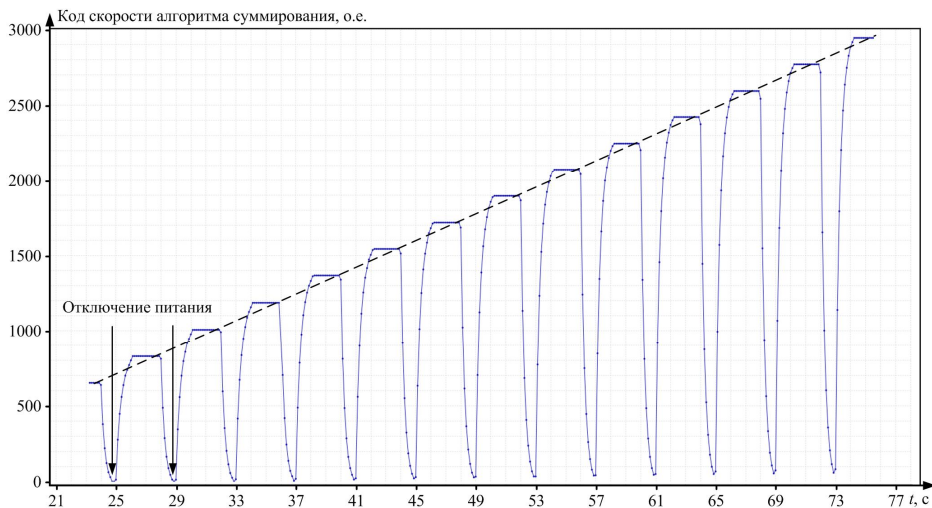


Рис. 10. Фрагмент проверки алгоритма поиска начальной скорости

Микросхему можно использовать в системе с обратной связью по углу вместо применения алгоритма CORDIC, который требует существенных вычислительных ресурсов ПЛИС – 515 логических ячеек (при реализации последовательного алгоритма с 8-ю итерациями и 14-битными переменными), что составляет 18% от их общего количества для микросхемы 5576XC6T. Кроме того, преобразователь 1310NM025 предоставляет более высокую точность измерения угла (16 бит) благодаря наличию следящего контура в своей структуре.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемые алгоритмы решают поставленную задачу определения частоты вращения с повышенной разрешающей способностью. Удалось получить минимальный вес младшего разряда кода скорости (0,0037 Гц), используемого в качестве сигнала обратной связи, сохранив при этом работоспособность прибора в необходимом диапазоне частот вращения ДПР  $\pm 300$  Гц (что соответствует частоте маховика  $\pm 75$  Гц). Предложенный метод обработки данных с микросхемы 1310NM025 позволяет обойти аппаратные ограничения без потери точности ее работы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иосифьян А.Г. Электромеханика в космосе. М.: Знание, 1997. 64 с.
2. Ишлинский А.Ю. Ориентация, гироскопы и инерциальная навигация. М.: Наука, 1976. 670 с.
3. Игнатов А.И., Давыдов А.А., Сазонов В.В. Анализ динамических возможностей систем управления малым космическим аппаратом, построенных на базе двигателей-маховиков. М., 2005. (Препринт / ИПМ им. М. В. Кел-

дыша РАН; № 47).

4. Бронов С.А., Марарескул А.В. Автоматизированное проектирование электромеханических систем : учеб. пособие по теоретической подготовке. Красноярск : СФУ, 2009. 122 с.
5. Шрейнер Р.Т. Системы подчиненного регулирования электроприводов : учеб. пособие для вузов. Екатеринбург : Изд-во ГОУ ВПО «Рос. гос. проф.-пед. ун-т», 2008. 279 с.
6. Моделирование моментов нагрузки электродвигателей в MATLAB Шрейнер Р.Т. [и др.] // Молодой ученый. 2010. Т. 1. № 8(19). С. 6–12.
7. Якимовский Д.О. Повышение точности управления моментом двигателя-маховика // Гироскопия и навигация. 2008. № 3(62). С. 46–52.
8. Цифровой астатический электропривод систем ориентации и стабилизации космических аппаратов / Н.Н. Балковой [и др.] // Доклады ТУСУР. 2014. № 3(33). С. 168–175.
9. Балковой Н.Н., Михальченко Г.Я. Эталонная цифровая модель управляющего двигателя-маховика системы ориентации и стабилизации космического аппарата // Доклады ТУСУР. 2014. № 3(33). С. 161–167.
10. Балковой Н.Н. Анализ особенностей применения двигателей-маховиков с компенсацией собственных помеховых моментов // Вестник Московского авиационного института. 2018. Т. 25. № 3. С. 203–210.
11. Микросхема преобразователя сигналов датчиков перемещения 1310NM025, K1310NM025, K1310NM025K. Спецификация. Версия 2.1.0 от 14.03.2019 [Электронный ресурс]. URL: [https://ic.milandr.ru/products/atsp\\_i\\_tsp/1310nm025/#docs\\_tab](https://ic.milandr.ru/products/atsp_i_tsp/1310nm025/#docs_tab), свободный.
12. Ошибки в микросхемах 1310NM025, 1310NM025 Errata Notice. Версия от 07.06.2019 [Электронный ресурс]. URL: [https://ic.milandr.ru/products/atsp\\_i\\_tsp/1310nm025/#docs\\_tab](https://ic.milandr.ru/products/atsp_i_tsp/1310nm025/#docs_tab), свободный.

Поступила в редакцию 15 сентября 2019 г.

DOMESTIC RESOLVER-TO-DIGITAL CONVERTER 1310NM025 APPLICATION POSSIBILITIES IN REACTION WHEEL ASSEMBLY CONTROL SYSTEM

Viktor A. Russkin

Design engineer, Research Division of the Automation Department, JSC "Scientific & Industrial Centre "Polyus", Tomsk, Russia. E-mail: vrsskn@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9251-1761>.

Nikolay N. Balkovoy

Ph.D. (Engineering), Principal engineer, Research Division of the Automation Department, JSC "Scientific & Industrial Centre "Polyus", Tomsk, Russia. E-mail: balkovoy.nn@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3214-2567>.

Alexander N. Butakov

Head of the laboratory, Research Division of the Automation Department, JSC "Scientific & Industrial Centre "Polyus", Tomsk, Russia.

The work is dedicated to reaction wheel assembly automatic control system design as a part of spacecraft orientation system. The data processing algorithms for resolver-to-digital converter 1310NM025 output signals are given in this paper. This chip is used as a feedback signal source in dynamic rotary torque control system. Two measuring channels of the chip are involved. They are configured to receive the same input resolver signals with different resolutions (fine and coarse ones). Thus, the algorithms are used for the maximum output signal resolution expanding by mixing fine and coarse channel measurement results. The first algorithm adds up the fine channel rotation speed value depending on its overflows number. The second algorithm is necessary for setting initial rotation speed measurement of the first one when the system starts. It is also needed to make sure that rotation speed measurement is working correctly during reaction wheel assembly operation. Thus, the increased digital velocity signal resolution can be achieved without limiting rotation speed of resolver by using the above methods. The considered system is fully implemented by using domestic electronic components, which also includes the 1310NM025 chip developed by Milandr Inc. and field-programmable gate array 5576XC6T. Verilog HDL has been used for the above algorithms digital implementation. The designed rotation speed measurement prototype and the whole system positive experiment results were obtained.

**Keywords:** rotation speed measurement, a static control system, reaction wheel assembly, field-programmable gate array, resolver-to-digital converter, dynamic torque control, acceleration control, 1310NM025 chip, spacecraft orientation and stabilisation system, resolver, rotor position detector, digital control system, measuring channels mixing, resolution increasing method.

REFERENCES

1. Josifyan A.G. *Elektromekhanika v kosmose* [Electromechanics in space]. Moscow, Znanie Publ., 1997. 64 p. (In Russian)
2. Ishlinskii A.Yu. *Orientatsiya, gيروسkopi i inertial'naya navigatsiya* [Orientating, gyroscopes and inertial navigation]. Moscow, Nauka Publ., 1976. 670 p. (In Russian)
3. Ignatov A.I., Davydov A.A., Sazonov V.V. The analysis of

dynamic capabilities of the control systems by the spacecraft built on the basis of the reaction wheels. *Preprinty IMP imeni Keldysha* [Preprint, Inst. Appl. Math., the Russian Academy of Science, 2005, no. 47]. (In Russian)

4. Bronov S.A., Maraeskul A.V. *Avtomatizirovannoe proektirovanie elektromekhanicheskikh sistem* [Automated design of electromechanical systems]. Krasnoyarsk, SFU Publ., 2009. 122 p. (In Russian)
5. Shreiner R.T. *Sistemy podchinnennogo regulirovaniya elektropriwodov* [Systems of subordinate regulation of electric drives]. Yekaterinburg, Russian State Professional and Pedagogical University, 2008. 279 p. (In Russian)
6. Shreiner R.T., Emelyanov A.A., Klishin A.V., Medvedev A.V. Simulation of load torque of electric motors in MATLAB. *Molodoy uchenyi* [Young scientist], 2010, no. 8(19), vol. 1, pp. 6-12. (In Russian)
7. Yakimovskii D.O. Increasing accuracy of motor-handwheel moment control. *Gyroskopiya i Navigatsiya* [Gyroscopy and navigation], 2008, no. 3(62), pp. 46-52. (In Russian)
8. Balkovoy N.N., Muravyatkin Yu.E., Lyanzburg V.P., Mikhailchenko G.Ya. Digital astatic electric drive of the spacecraft orientation and stabilization system. *Doklady Tomskogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki* [Proceedings of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics], 2014, no. 3(33), pp. 168-175. (In Russian)
9. Balkovoy N.N., Mikhailchenko G.Ya. Digital reference model of the reaction wheel used in a spacecraft orientation and stabilization system. *Doklady Tomskogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki* [Proceedings of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics], 2014, no. 3(33), pp. 161-167. (In Russian)
10. Balkovoy N.N. Analysis of application specifics of a reaction wheel with intrinsic disturbing moments compensation. *Vestnik Moskovskogo Aviatсионного Instituta* [Aerospace MAI Journal, 2018, no. 3, vol. 25, pp. 203-211]. (In Russian)
11. 1310NM025 Technical reference 2.1.0. [https://ic.milandr.ru/products/atsp\\_i\\_tsap/1310nm025/#docs\\_tab](https://ic.milandr.ru/products/atsp_i_tsap/1310nm025/#docs_tab)
12. 1310NM025 Errata (07.06.2019) [https://ic.milandr.ru/products/atsp\\_i\\_tsap/1310nm025/#docs\\_tab](https://ic.milandr.ru/products/atsp_i_tsap/1310nm025/#docs_tab)

Русский В.А., Балковой Н.Н., Бутаков А.Н. Возможности применения отечественного преобразователя сигналов датчиков перемещения 1310NM025 в системе управления двигателя-маховика // *Электротехнические системы и комплексы*. 2019. № 4(45). С. 12-20. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-4\(45\)-12-20](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-4(45)-12-20)

Russkin V.A., Balkovoy N.N., Butakov A.N. Domestic Resolver-to-Digital Converter 1310NM025 Application Possibilities in Reaction Wheel Assembly Control System. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2019, no. 4(45), pp. 12-20. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-4\(45\)-12-20](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-4(45)-12-20)

## ПРИМЕНЕНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ В ЗАДАЧАХ ОПТИМИЗАЦИИ РАЗМЕЩЕНИЯ КОМПЕНСИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ

В статье рассмотрена задача повышения эффективности функционирования разомкнутых распределительных сетей посредством оптимального распределения между узлами сети реактивной мощности, подлежащей компенсации. Проведен сравнительный анализ методов оптимизации, на основании которого и в соответствии с целью исследования выбран генетический алгоритм. Адаптированы основные понятия и теоретические положения генетического алгоритма к решению оптимизационной задачи размещения компенсирующих устройств в узлах распределительной сети. В соответствии с предложенной математической моделью оптимизации размещения компенсирующих устройств разработана блок-схема генетического алгоритма, программно реализованная в Mathcad для различных схем электроснабжения. Отличительными особенностями разработанного модифицированного генетического алгоритма являются: процедура кодирования, обеспечивающая решение оптимизационной задачи в неотрицательных дискретных переменных; процедура проверки ограничения по значению избыточной реактивной мощности. Результаты сравнительного анализа программ, реализованных посредством генетического алгоритма и метода полного перебора, а также апробация программы для разомкнутой распределительной сети предприятия показали целесообразность применения генетического алгоритма в решении оптимизационных задач выбора мощности и размещения компенсирующих устройств.

**Ключевые слова:** компенсирующие устройства, реактивная мощность, распределительная сеть, генетический алгоритм, реализация в Mathcad.

### ВВЕДЕНИЕ

Согласно статистическим данным филиала ПАО «МРСК Волиги» – «Оренбургэнерго» за период 2014 – 2018 гг. потребление реактивной мощности (РМ) в Оренбургской области увеличилось на 8,1% [1]. В то же время передача РМ на значительные расстояния от мест генерации до мест потребления существенно ухудшает технико-экономические показатели распределительной сети: увеличиваются переотки реактивной мощности (в распределительных сетях 6–10 кВ они могут достигать до 40 % от суммарных потерь электроэнергии [2,3]); возрастают потери электроэнергии; изменяется значение напряжения в узлах; уменьшается эффективность функционирования сетевого оборудования и др.

В соответствии с программой национальной технологической инициативы задачи энергосбережения и энергоэффективности входят в перечень приоритетных направлений развития науки, технологий и техники Российской Федерации. В связи с этим компенсация избыточной реактивной мощности, передаваемой по сети, является одной из актуальных задач электроэнергетики.

Основные положения теории компенсации реактивной мощности изложены во многих работах [3–16], в них рассмотрены вопросы, касающиеся назначения компенсации РМ, средств компенсации реактивной мощности, к которым отнесены компенсирующие устройства (КУ), расчета мощности КУ. При этом вопрос об оптимизации размещения КУ с учетом дискретности значений реактивной мощности (устройства позволяют регулировать генерируемую ими мощность только ступенчато) остается недостаточно прорабо-

ванным. Под оптимизацией размещения КУ в исследовании в соответствии с работами [2, 17] понимаем оптимальное распределение избыточной реактивной мощности, подлежащей компенсации  $Q_K$ .

В связи с этим целью работы является оптимальное распределение между узлами разомкнутой распределительной сети избыточной реактивной мощности, подлежащей компенсации, по критерию минимальных потерь активной мощности  $\Delta P(Q_{КУ})$  с учетом дискретного изменения значений мощности КУ.

Анализ научно-технической литературы по применению математических методов в решении оптимизационных задач в области электроэнергетики и электротехники [18–23] позволил условно выделить пять групп методов.

К первой группе авторами отнесены аналитические методы, такие как метод неопределенных множителей Лагранжа, Каруша-Куна-Таккера, вариационные методы и др. Для данных методов характерно представление целевой функции в виде аналитического выражения и определение экстремума посредством приравнивания к нулю производной от целевой функции. К основным недостаткам аналитических методов в решении задач оптимизации размещения КУ следует отнести следующее: повышение сложности решения при большом количестве переменных и ограничений; сложность использования в задачах с дискретно изменяющимися переменными.

Вторая группа – это численные методы, к которым относятся методы покоординатного спуска, наискорейшего спуска, сопряженных градиентов, дихотомии, золотого сечения, Фибоначчи и др. Численные методы решения оптимизационных задач относятся к группе приближенных методов. Недостатками численных методов являются: малая скорость сходимости; вероят-

ность закливания алгоритма поиска решения; невысокая точность решения.

К третьей группе отнесены методы случайного поиска, в том числе метод Монте-Карло, методы статического градиента, методы статического наискорейшего спуска и др. Для этих методов характерно недетерминированное представление целевой функции и вероятностный поиск экстремума. К основным недостаткам методов этой группы следует отнести: необходимость проведения большого числа итераций для получения решения, близкого к оптимальному, т.е. низкая скорость сходимости алгоритма к точке экстремума, а также неопределенность в выборе условия остановки поиска.

К четвертой группе отнесены методы поиска решений исчерпыванием всевозможных вариантов: метод полного перебора, метод поиска в глубину, метод ветвей и границ и т.д. Основными достоинствами методов этой группы являются: высокая точность определения искомой переменной; возможность оперировать с дискретными переменными, а основным недостатком – уменьшение быстродействия поиска оптимального решения при увеличении количества возможных решений.

В пятую группу отнесены методы искусственного интеллекта, одним из которых является генетический алгоритм (ГА). Генетический алгоритм, называемый «интеллектуальной» формой метода проб и ошибок, представляет собой эвристический алгоритм поиска, основанный на трех компонентах:

- генетической памяти, сконцентрированной в «хромосомах»;
- воспроизведении, осуществляемом при помощи операторов скрещивания и мутации;
- селекции продуктивных решений методами оптимизации многоэкстремальных функций.

К достоинствам ГА в процессе решения задач оптимизации нами отнесены: возможность параллельной работы с несколькими альтернативными решениями; высокая скорость сходимости алгоритма к точке экстремума; работа как с непрерывными, так и с дискретными переменными.

На основании проведенного анализа методов, учитывая тот факт, что решение оптимизационной задачи должно проводиться в дискретно изменяющихся переменных, в работе выбран генетический алгоритм.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ  
ОПТИМИЗАЦИИ РАЗМЕЩЕНИЯ КУ

В процессе формализации оптимизационной задачи приняты допущения и сформулированы следующие условия функционирования разомкнутой распределительной сети:

- 1) передаваемая по *i*-й линии активная мощность неизменна в зимний, а также летний периоды;
- 2) удельные потери активной мощности КУ составляют не более 0,5% от компенсационной мощности [2, 3, 24];
- 3) значения реактивной мощности КУ (искомые переменные) изменяются дискретно;
- 4) передача электрической энергии в распределительной сети осуществляется в соответствии с регламентируемым коэффициентом реактивной мощности tgφ [4].

Потери активной мощности в распределительных сетях без установки КУ определяются как

$$\Delta P = \sum_{i=1}^n \frac{P_i^2 + Q_i^2}{U^2} R_i, \tag{1}$$

при установке КУ с учетом 2-го допущения эти потери уменьшатся до величины

$$\Delta P = \sum_{i=1}^n \frac{P_i^2 + (Q_i - Q_{KVi})^2}{U^2} R_i, \tag{2}$$

где  $\Delta P$  – потери активной мощности;  $U$  – напряжение сети;  $R_i$  – активное сопротивление *i*-й линии;  $P_i$ ,  $Q_i$  – активная и реактивная мощности *i*-й линии;  $Q_{KVi}$  – реактивная мощность КУ, размещенного в *i*-м узле;  $n$  – количество узлов сети.

Из выражения (2) очевидно, что потери мощности имеют две составляющие, обусловленные соответственно активной и реактивной мощностями. Поскольку компенсация РМ влияет на изменение второй составляющей (учитываем 1-е допущение), поэтому в дальнейшем будем рассматривать потери в зависимости только от реактивных мощностей.

В соответствии с 4-м условием функционирования разомкнутой распределительной сети, решение задачи о компенсации реактивной мощности предложено проводить в три этапа. На первом этапе определяется избыточная реактивная мощность сети, подлежащая компенсации  $Q_K$ , из уравнения баланса реактивной мощности, с учетом нормируемого значения tgφ, на втором – осуществляется оптимизация по выбору мощности и мест установки КУ с применением ГА, на третьем – проверка по потерям напряжения в узлах распределительной сети. Проведение вычислений первого этапа подробно изложено авторами в работе [25]. Третий этап является классическим этапом проектирования КУ, представлен во многих работах по выбору мощности компенсирующих устройств, в том числе в работах [5, 7, 8]. В данной статье представлено решение второго этапа с применением генетического алгоритма.

На основании работы [17] и принятых допущений в исследовании предложено математическую модель оптимизации размещения КУ представить в виде системы уравнений, состоящую из:

- целевой функции – минимум потерь активной мощности, уравнение (3);
- ограничений – значение избыточной реактивной мощности, подлежащей компенсации, определяемое из уравнения баланса реактивных мощностей [25], уравнение (4);
- граничных условий – положительные, дискретные значения искомых величин, уравнение (5);

$$\Delta P(Q_{KV}) = \sum_{i=1}^n \frac{(Q_i - Q_{KVi})^2}{U^2} R_i \rightarrow \min, \tag{3}$$

$$\sum_{i=1}^n Q_{KVi} \leq Q_K, \tag{4}$$

$$Q_{KVi} \geq 0, Q_{KVi} - \text{дискретные значения.} \tag{5}$$

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ПОЛОЖЕНИЯ ТЕОРИИ  
ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА, ИСПОЛЗУЕМЫЕ  
В РЕШЕНИИ ОПТИМИЗАЦИОННОЙ ЗАДАЧИ

В работе рассмотрена стратегия поиска оптимального решения с применением ГА к задаче распределения избыточной реактивной мощности  $Q_K$ , подлежащей компенсации, между  $n$  узлами разомкнутой распределительной сети по критерию минимальных потерь активной мощности  $\Delta P(q_{KY})$ . Оптимальным решением задачи является такое подмножество значений мощности КУ  $q_{KY}^* = \{q_{KY1}, q_{KY2}, \dots, q_{KYn}\}$  из множества допустимых решений  $Q_{KY}$  ( $q_{KY}^* \in Q_{KY}$ ), удовлетворяющих условию

$$\sum_{i=1}^n q_{KYi} \leq Q_K,$$

для которого

$$\Delta P(q_{KY}^*) = \min_{q_{KY} \in Q_{KY}} \Delta P(q_{KY}).$$

В терминологии ГА рассматриваемая целевая функция  $\Delta P(q_{KY}) = \Delta P(q_{KY1}, q_{KY2}, \dots, q_{KYn})$  эквивалентна понятию *приспособленности живого организма*. Подмножество  $q_{KY} \in Q_{KY}$ , представляющее собой вектор значений мощностей КУ  $q_{KY} = \{q_{KY1}, q_{KY2}, \dots, q_{KYn}\}$ , называется *фенотипом*, а отдельные его параметры  $q_{KYi}$  – признаками,  $i = \overline{1, n}$ . В ГА каждое значение  $q_{KYi}$  необходимо представить в некоторой форме  $s_i$ , называемой *геном*. Для этого вектор  $q_{KY} = \{q_{KY1}, q_{KY2}, \dots, q_{KYn}\} \in Q_{KY}$  преобразуется в некоторую структуру  $ch = \{s_1, s_2, \dots, s_n\} \in Ch$ , называемую *хромосомой*:  $Q_{KY} \xrightarrow{cod} Ch$ , где  $cod$  – функция кодирования,  $Ch$  – пространство представлений. Восстановление решения осуществляется обратным преобразованием:

$Ch \xrightarrow{cod^{-1}} Q_{KY}$ , где  $cod^{-1}$  – функция декодирования.

В пространстве  $Ch$  вводится *функция приспособленности*  $f(ch)$ , аналогичная целевой функции  $\Delta P(q_{KY})$  на множестве  $Q_{KY}$  и удовлетворяющая условию:  $\forall q_{KY1}^1, q_{KY2}^1 \in Q_{KY}: ch^1 = cod(q_{KY1}^1), ch^2 = cod(q_{KY2}^1), ch^1 \neq ch^2$ , если  $\Delta P(q_{KY1}^1) > \Delta P(q_{KY2}^1)$ , то  $f(ch^1) < f(ch^2)$ . Таким образом, решение поставленной задачи сводится к поиску экстремума:  $f(ch^*) = \max_{ch \in Ch} f(ch)$ . При решении задачи используются наборы возможных решений  $I = \{ch^k = (s_1^k, s_2^k, \dots, s_n^k), k = \overline{1, m}\} \subset Ch$ , называемые *популяциями*, где  $ch^k$  – хромосома с номером  $k$ ;  $m$  – размер популяции;  $s_i^k$  – ген с номером  $i$   $k$ -й хромосомы.

Применение ГА сводится к исследованию множества  $Ch$  (генотипов): чем выше значение функции приспособленности  $f(ch^k)$ , тем больше хромосома  $ch^k$  подходит в качестве решения. Затем осуществляется обратное преобразование:  $q_{KY}^* = cod^{-1}(ch^*)$ .

РЕАЛИЗАЦИЯ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА В РЕШЕНИИ  
ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ РАЗМЕЩЕНИЯ КУ

Разработанная обобщенная блок-схема генетического алгоритма поиска оптимального размещения КУ представлена на рис. 1.

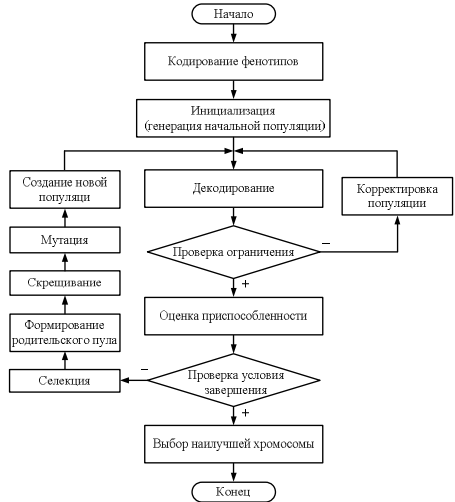


Рис. 1. Обобщенная блок-схема генетического алгоритма

Разработанный алгоритм программно реализован в среде Mathcad [26]. Фрагменты программ-функций, реализующих отдельные процедуры ГА, приведены на рис. 2-7. При разработке процедуры кодирования хромосом учтена дискретность изменения мощности КУ с шагом 50 квар.

```

Cod(N) :=
| n ← rows(N) - 1
| for i ∈ 0..n
|   t ← Nn-i
|   D ← D + t * eln(2) · (i-h)
| D
    
```

Рис. 2. Фрагмент процедуры кодирования

```

init_bin(m) :=
| for i ∈ 0..2·n-1
|   for j ∈ 0..n-1
|     ch ← random(uar)
|     popi,j ← ch_str(ch)
| pop
    
```

$$init\_bin(m) = \begin{pmatrix} "0101" & "1000" & "1010" \\ "1010" & "0011" & "1010" \\ "1100" & "1100" & "0111" \\ "1010" & "1010" & "1000" \\ "0110" & "0100" & "0000" \\ "0101" & "1101" & "1101" \end{pmatrix}$$

Рис. 3. Фрагмент процедуры инициализации начальной популяции

```

init_dec(pop) :=
| for i ∈ 0..rows(pop) - 1
|   for j ∈ 0..cols(pop) - 1
|     N ← popi,j
|     deci,j ← Bin2Dec(ch_v(N))
|     qk ← dec · 102
|     qk
    
```

$$init\_dec(pop) = \begin{pmatrix} 250 & 400 & 500 \\ 500 & 150 & 500 \\ 600 & 600 & 350 \\ 500 & 500 & 400 \\ 300 & 200 & 0 \\ 250 & 650 & 600 \end{pmatrix}$$

Рис. 4. Фрагмент процедуры декодирования

```

pr(dec) :=
| for i ∈ 0..rows(dec) - 1
|   Ri ← ∑ (decT)(i)
| R
    
```

$$pr(pop\_dec) = \begin{pmatrix} 1.15 \times 10^3 \\ 1.15 \times 10^3 \\ 1.55 \times 10^3 \\ 1.4 \times 10^3 \\ 500 \\ 1.5 \times 10^3 \end{pmatrix}$$

Рис. 5. Фрагмент процедуры проверки условия



```
sector_roulette(v) :=
  d ← 0
  for i ∈ 0..rows(v) - 1
    d ← d + vi
    si ← d
  sort(s)
  (
    44.341
    61.612
    69.106
    75.658
    98.338
    100
  )
```

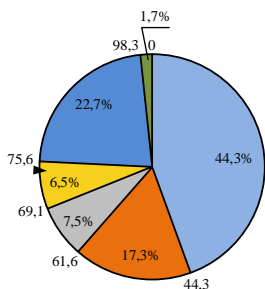


Рис. 6. Фрагмент процедуры селекции

```
New_pop(pop) :=
  for i ∈ 0..rows(pop) - 2
    locus ← round( rnd( cols( Dec2Bin( (QK / 10^7) ) - 2 ) ) )
    for j ∈ 0..cols(pop) - 1
      ch1 ← ch_v(popi,j), ch2 ← ch_v(popi+1,j)
      r ← crossing(ch1, ch2, locus)
      new_popi,j ← ch_str(mutation(r, <math>\phi</math>))
      new_popi+1,j ← ch_str(mutation(r, <math>\psi</math>))
    new_pop
  (
    "1000" "0010" "1011"
    "0100" "0111" "0010"
    "1000" "0100" "1011"
    "1110" "1010" "1011"
    "1000" "0110" "1011"
    "0111" "0100" "0001"
  )
New_pop(pop) =
```

Рис. 7. Фрагмент процедуры формирования новой популяции

В исследовании выполнен сравнительный анализ работы алгоритмов выбора оптимального размещения КУ, реализованных посредством ГА и методом полного перебора (МПП) [27]. Метод полного перебора выбран для сравнения в виду того, что он является наиболее точным методом решения оптимизационных задач [28].

Сравнение проводилось для 3-узловых схем соединений: радиальной, магистральной, смешанной и 5-узловой схемы смешанного типа (рис. 8) по следующим параметрам: значения реактивной мощности КУ в узлах; потери активной мощности и быстродействие программы (время, необходимое программе для вывода результата).

На рис. 9 представлен фрагмент разработанной в Mathcad программы-функции, реализующей метод полного перебора для радиальной 3-узловой схемы электроснабжения. Для остальных рассмотренных схем программы-функции аналогичны, отличие составляют лишь выражения целевой функции  $\Delta P$ .

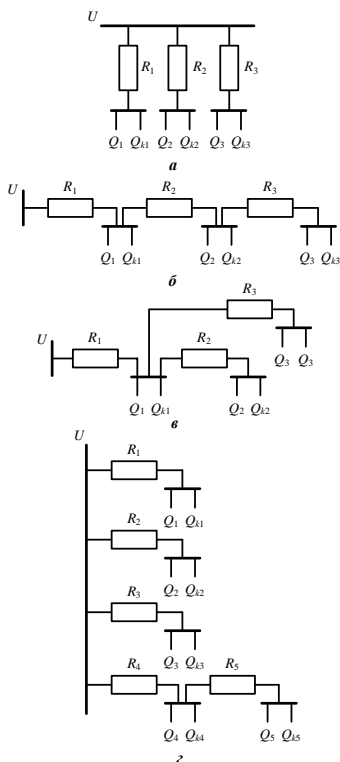


Рис. 8. Рассмотренные варианты схем электроснабжения:

- а – 3-узловая радиальная;
- б – 3-узловая магистральная;
- в – 3-узловая смешанная;
- г – 5-узловая смешанная

$$\Delta P(W) := \begin{cases} \text{for } m \in 1..cols(W) \\ Q_{ky} \leftarrow W^{(m)} \\ \Delta \leftarrow \Delta P \\ \Delta P \leftarrow \sum_{i=1}^3 \left[ \frac{R_i}{U^2} (Q_i - Q_{ky_i})^2 \right] \\ P \leftarrow \Delta P, Q_k \leftarrow Q_{ky} \text{ if } \Delta P < \Delta \\ (Q_k) \\ P \end{cases}$$

Рис. 9. Фрагмент программы-функции метода полного перебора для 3-узловой радиальной схемы электроснабжения

РЕЗУЛЬТАТЫ РЕШЕНИЯ ОПТИМИЗАЦИОННОЙ ЗАДАЧИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА И МЕТОДА ПОЛНОГО ПЕРЕБОРА

Результаты работы алгоритмов представлены в виде тензора 2-го ранга в таблице. Первый элемент тензора – вектор-столбец – содержит значения реактивной мощности КУ в узлах, единица измерения квар, второй элемент – значение целевой функции (потери активной мощности, единица измерения кВт). Отдельной строкой для каждого варианта схемы представлено время работы программы в секундах.

Результаты работы генетического алгоритма и алгоритма, реализованного методом полного перебора

Вариант схемы	ГА	МПП	Относительная погрешность целевой функции, %
3-х узловая радиальная	$\text{result} = \begin{bmatrix} 900 \\ 1 \times 10^3 \\ 750 \end{bmatrix} 149.48$	$\text{result} = \begin{bmatrix} 800 \\ 1.05 \times 10^3 \\ 800 \end{bmatrix} 146.47$	2,01
	$T := t1 - t0 = 21.848$	$T := t1 - t0 = 25.4$	
3-х узловая магистральная	$\text{result} = \begin{bmatrix} 1 \times 10^3 \\ 1 \times 10^3 \\ 550 \end{bmatrix} 168.28$	$\text{result} = \begin{bmatrix} 1 \times 10^3 \\ 1 \times 10^3 \\ 550 \end{bmatrix} 168.28$	0
	$T := t1 - t0 = 24.3$	$T := t1 - t0 = 31.541$	
3-х узловая смешанная	$\text{result} = \begin{bmatrix} 1.05 \times 10^3 \\ 700 \\ 900 \end{bmatrix} 198.64$	$\text{result} = \begin{bmatrix} 1.1 \times 10^3 \\ 750 \\ 800 \end{bmatrix} 194.14$	2,26
	$T := t1 - t0 = 25.999$	$T := t1 - t0 = 34.412$	
5-и узловая смешанная	$\text{result} = \begin{bmatrix} 950 \\ 600 \\ 850 \\ 750 \\ 850 \end{bmatrix} 493.33$	$\text{result} = \begin{bmatrix} 850 \\ 550 \\ 900 \\ 800 \\ 900 \end{bmatrix} 486.64$	1,36
	$T := t1 - t0 = 34.28$	$T := t1 - t0 = 7.93582 \times 10^3$	

Анализ полученных результатов, представленных в таблице, позволил заключить следующее:

- алгоритм разработанной программы на основе ГА достоверен и адекватен в виду того, что: погрешность значения целевой функции, определенной ГА, не превышает значения 2,26% по отношению к значению целевой функции, определенной МПП; значения реактивных мощностей в узлах, определенных посредством ГА, отличаются не более чем на 11,1 %, по сравнению со значениями, определенными МПП;

- быстродействие программы, разработанной на основе ГА, по сравнению с программой, реализующей МПП для 3-узловых схем соединения в среднем в 1,5 раза выше, а для 5-узловой смешанной схемы соединения – в 231,5 раза.

Разработанная программа была применена для решения задачи выбора оптимальной мощности и мест установки компенсирующих устройств в разомкнутой распределительной сети предприятия 10/0,4 кВ со смешанной схемой электроснабжения (рис. 10). Схема содержит 7 узлов, реактивные нагрузки  $Q_i$  которых находятся в диапазоне от 550 до 1750 квар. Избыточная реактивная мощность, подлежащая компенсации  $Q_k$ , составляет 3850 квар. По итогам решения поставленной задачи с учетом дискретности изменения мощности КУ с шагом 350 квар получены следующие значения:  $Q_{k2} = Q_{k6} = 1400$  квар;  $Q_{k3} = 700$  квар;  $Q_{k5} = 350$  квар. В первом, четвертом и седьмом узлах

компенсации не требуется ( $Q_{k1} = Q_{k4} = Q_{k7} = 0$ ). Потери мощности составили 2066 кВт.

До установки компенсирующих устройств коэффициент реактивной мощности в сети tgφ составлял 0,567. После определения оптимального размещения КУ коэффициент реактивной мощности tgφ уменьшился до 0,392. Полученное значение коэффициента реактивной мощности не превышает нормируемого значения  $tg\phi_{норм} = 0,4$ , установленного Порядком [4] для сетей напряжением 6-20 кВ.

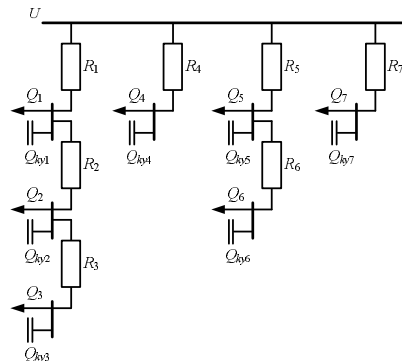


Рис. 10. Схема распределительной сети предприятия

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложено решение задачи о компенсации реактивной мощности проводить в три этапа. На первом этапе определять избыточную реактивную мощность сети, подлежащую компенсации, из уравнения баланса РМ, с учетом нормируемого значения коэффициента реактивной мощности. На втором этапе осуществлять оптимизацию по выбору мощности и мест установки КУ, на третьем – проверку по потерям напряжения в узлах распределительной сети. Предложена математическая модель оптимизации размещения КУ, состоящая из: целевой функции – минимума потерь активной мощности; ограничения – значения реактивной мощности, подлежащей компенсации; граничных условий – положительных, дискретных значений искомым переменных.

2. Адаптированы основные понятия и положения теории ГА к решению оптимизационной задачи по размещению КУ: в качестве хромосомы предложено рассматривать мощность КУ в  $i$ -м узле распределительной сети; фенотипа – вектор значений мощностей КУ; гена – каждое значение реактивной мощности; популяции – различные варианты допустимых значений мощностей КУ, устанавливаемых во всех  $n$  узлах распределительной сети; функции приспособленности – целевую функцию. Разработан модифицированный генетический алгоритм для решения задачи выбора мощности КУ, новизной которого являются процедура кодирования, обеспечивающая решение поставленной задачи в неориентированных дискретных переменных, и процедура проверки ограничения по значению избыточной реактивной мощности.

3. Сравнение алгоритмов по выбору оптимального размещения КУ показало следующее: быстродействие программы, реализованной посредством ГА для 3-узловых схем выше в 1,5 раза, а для 5-узловой в 231,5 раз выше, чем программы, разработанной на основе метода полного перебора; расхождение значений целевой функции, определенной с помощью генетического алгоритма и метода полного перебора, для различных схем соединений составляет не более 2,26 %. Результаты сравнительного анализа показывают целесообразность применения генетического алгоритма в качестве оптимизационного метода решения задачи по размещению компенсирующих устройств в разомкнутой распределительной сети.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Схема и программа перспективного развития электроэнергетики Оренбургской области на период 2019–2023 гг. Оренбург, 2018. 207 с.
2. Беляевский Р.В., Ефременко В.М. Расчет оптимального размещения компенсирующих устройств методом множителей Лагранжа // Вестник КузГТУ. 2012. №6. С. 138–141.
3. Энергосбережение в системах промышленного электроснабжения: Справочно-методическое издание / под ред. Э.А. Киреевой. М.: Интехэнерго-Издат: Теплоэнергетика, 2014. 304 с.
4. О порядке расчета значений соотношения потребления активной и реактивной мощности для отдельных энергопринимающих устройств (групп энергопринимающих устройств) потребителей электрической энергии : Приказ Минэнерго России от 23.06.2015 № 380.
5. Железко Ю.С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии : Руководство для прак-

- тических расчетов. М. : ЭНАС, 2009. 456 с.
6. Principles for Efficient and Reliable Reactive Power Supply and Consumption : Staff Report of Federal Energy Regulatory Commission. Washington, D. C., USA, 2005. 177 p.
7. Нелюбов В.М., Пилипенко О.И. Электрические сети и системы: учеб. пособие. // Оренбургский гос. ун-т. Оренбург: ОГУ, 2018. 188 с.
8. Кабышев А.В. Компенсация реактивной мощности в электроустановках промышленных предприятий: учеб. пособие / Томский политехнический университет. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. 234 с.
9. Baran B., Vallejos J., Ramos R., Fernandez U. Reactive Power Compensation using a Multi-objective Evolutionary Algorithm. IEEE Porto Power Tech Conference, 2001, Sept.
10. Ефременко В.М., Беляевский Р.В., Пономарев Н.В. Выбор оптимальных способов компенсации реактивной мощности в электрических сетях промышленных предприятий // Вестник Кузбасского технического университета. Энергетика. 2011. №5. С. 81–84.
11. Маркман Г.З. Энергоэффективность преобразования и транспортировки электрической энергии. Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2008. 184 с.
12. Лоскутов А.Б., Еремин О.И. Многоцелевая оптимизация компенсации реактивной мощности в электрических сетях // Промышленная энергетика. 2006. №6. С. 39–41.
13. Power Factor Correction. Power Quality Solutions. Published by Epos AG. Edition 04/2006. Ordering No. EPC: 26017-7600. Printed in Germany. 79 p.
14. Hofmann W., Schlabbach J., Just W. Reactive Power Compensation: A Practical Guide. 2 edition. New York: Wiley, 2012, April, 304 p.
15. Principles for Efficient and Reliable Reactive Power Supply and Consumption: Tech. rep. Washington: Federal Energy Regulatory Commission, 2005. February. 275 p.
16. Bohème P.A. Simulation of Power System Response To Reactive Power Compensation. – Master’s thesis, The University of Tennessee, 2006. November. 263 p.
17. Костин В.Н. Оптимизационные задачи в электроэнергетике : учеб. пособие. СПб. : СЗТУ, 2003. 120 с.
18. Карагодин В.В., Рыбаков Д.В. Оптимизация размещения устройств компенсации реактивной мощности в распределительных электрических сетях специальных объектов // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2015. №10. С. 823–828.
19. Рейзлин В.И. Численные методы оптимизации : учеб. пособие. Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2011. 105 с.
20. Кычкин А.В., Чудинов А.В. Применение генетического алгоритма для оптимизации размещения альтернативных источников энергии в локальном сегменте активно-адаптивной сети // Системы. Методы. Технологии . 2016. №1(29). С. 76–82.
21. Семенова Л.А., Инжеватова А.О., Салимов Р.М. Анализ методов оптимизации в решении задач выбора мест установки и мощности компенсирующих устройств [Электронный ресурс] // Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры: материалы Всероссийской научно-методической конференции; Оренбург. гос. ун-т. Оренбург: ОГУ, 2017. С. 513–516.
22. Delfanti M., Granelli G., Maranini P., Montagna M. Optimal Capacitor Placement Using Deterministic and Genetic Algorithms // IEEE Trans. Power Systems. 2000, Aug., vol. 15, no 3.
23. Кример О.В., Подвальный С.Л. Программная реализация решения оптимизационных задач методом генетического алгоритма // Вестник ВГТУ. 2017. С. 23–24.
24. Семенова Л.А., Инжеватова А.О. Оптимизация размещения компенсирующих устройств в узлах электриче-

ской сети с применением генетического алгоритма // *Достижения вузовской науки: от теории к практике* : сборник материалов Всероссийской конференции с международным участием, посвященной 15-летию Курортного филиала ОГУ. Оренбург: Издательско-полиграфический комплекс ОГУ, 2018. С. 141-145.

25. Семенова Л.А., Инжеватова А.О., Салимов Р.М. К вопросу выбора оптимальной мощности и мест размещения устройств компенсации реактивной мощности // *Энергетика: состояние, проблемы, перспективы* : труды VIII Всероссийской научно-технической конференции. Оренбург: ООО Агентство «Пресса», 2016. С. 15-19.

26. Свидетельство о регистрации прикладной программы «Генетический алгоритм с фиксированным шагом поис-

ка мощности компенсирующих устройств» / Влацкая Л.А.: УФОР. №1998; опубл. 25.10.19.

27. Влацкая Л.А., Семенова Н.Г. Разработка алгоритма оптимального размещения компенсирующих устройств в узлах электрической сети с применением генетического алгоритма // *Материалы Международной (XX Всероссийской) научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии»* (Бенардосовские чтения). Иваново: ИГЭУ, 2019. Т. 1. С. 303-307.

28. Коновалов И.С., Остапенко С.С., Кобак В.Г. Сравнение эффективности работы точных и приближенных алгоритмов для решения задачи о покрытии множества // *Вестник Донского государственного технического университета*. 2017. № 3(90) Т. 17. С.137-144.

Поступила в редакцию 7 сентября 2019 г.

INFORMATION IN ENGLISH

APPLICATION OF GENETIC ALGORITHMS IN PROBLEMS OF PLACEMENT OPTIMIZATION OF COMPENSATING DEVICES

Ludmila A. Vlatskaya

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, the Department of Electric and Heat-power engineering, Orenburg State University, Orenburg, Russia. E-mail: L\_sem@mail.ru

Natalya G. Semenova

D.Sc. (Pedagogics), Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Professor, the Department of Automated Electric Drive, Electromechanics and Electrical Engineering, Orenburg State University, Orenburg, Russia. E-mail: ng\_sem@mail.ru.

The article deals with the problem of improving the efficiency of open distribution networks through the optimal distribution of reactive power between the nodes of the network subject to compensation. A comparative analysis of optimization methods is carried out on the basis of which and in accordance with the purpose of the study, a genetic algorithm is chosen. The basic concepts and theoretical provisions of the genetic algorithm are adapted to solve the optimization problem of placing compensating devices in the nodes of the distribution network. In accordance with the proposed mathematical model for optimizing the placement of compensating devices, a block diagram of the genetic algorithm was programmatically implemented in Mathcad for various schemes of connection of power supply systems. The distinctive features of the developed modified genetic algorithm include the coding procedure that provides the solution of the optimization problem in non-negative discrete variables; the procedure for checking the limit on the value of excess reactive power. The results of the comparative analysis of the programs implemented by genetic algorithm and exhaustive search and testing program for the open distribution network businesses have shown expediency of application of the genetic algorithm in solving optimization problems in the field of site selection and placement of compensating devices.

**Keywords:** compensating devices, reactive power, compensating devices, reactive power, genetic algorithms, genetic algorithms, Mathcad.

REFERENCES

1. *Skhema i programma perspektivnogo razvitiya elektroenergetiki Orenburgskoi oblasti na period 2019-2023 gody* [Scheme and program of perspective development of electric power industry of the Orenburg region for the period 2019-2023]. Orenburg, 2018. 207 p. (In Russian)

2. Efremento V.M., Beliaevsci R.V. Calculation of optimal placement of compensating devices by Lagrange multipliers. *Vestnik KuzGTU* [Bulletin of KuzGTU], 2012, no 6, pp. 138-141. (in Russian)

3. *Energosberezhenie v sistemakh promyshlennogo elektros-*

*nabzheniya* [Energy saving in industrial power supply systems]; Reference book / Under the editorship E.A.Kireeva. Mocsow: Intexenergo-Izdatt, Heat power engineering, 2014. 304 p. (In Russian)

4. *O poriadke rascheta znacheniy sootnosheniya potrebleniya aktivnoi i reaktivnoi moshchnosti dlya otdelnykh energoprimayushchikh ustroystv potrebiteliei elektricheskoi energii* [Calculation of values of the ratio of consumption of active and reactive power for separate power accepting devices (groups of energy receiving devices) consumers of electric energy]: Order of the RF Ministry of Energy from 23.06.2015 no. 380. (In Russian)

5. Gelezko J.C. *Poteri elektroenergii. Reaktivnaya moshchnost. Kachestvo elektroenergii.* [Power loss. Reactive power. Power quality]. Mocsow : ENAS, 2009. 456 p. (In Russian)

6. Principles for Efficient and Reliable Reactive Power Supply and Consumption : Staff Report of Federal Energy Regulatory Commission. Washington, D. C., USA, 2005. 177 p.

7. Nelyubov V.M., Pilipenko O.I. *Elektricheskie seti i sistemy* [Electric networks and systems]: training manual; Orenburg state University. Orenburg: OSU, 2018. 188 p. (In Russian)

8. Kabishev A.V. *Kompensatsiya reaktivnoi moshchnosti v elektroustanovkakh promyshlennykh predpriyatiy* [Reactive power compensation in electrical installations of industrial enterprises]. Tomsk : Publishing center of Tomsk Polytechnic University, 2012. 234 p. (In Russian)

9. Baran B., Vallejos J., Ramos R., Fernandez U. Reactive Power Compensation using a Multi-objective Evolutionary Algorithm. *IEEE Porto Power Tech Conference*, 2001, Sept.

10. Efremento V.M., Beliaevsci R.V., Ponomarev N.V. Selection of optimal ways of reactive power compensation in electric networks of industrial enterprises. *Vestnik KuzGTU* [Bulletin of KuzGTU], 2011, no 5, pp.18-84 (in Russian).

11. Markman G.Z. *Energoeffektivnost preobrazovaniya i transportirovki elektricheskoi energii* [Energy efficiency of conversion and transportation of electric energy]. Tomsk : Publishing center of Tomsk Polytechnic University, 2008. 184 p. (In Russian)

12. Loskutov A.B., Eremin O.I. Multipurpose optimization of reactive power compensation in electrical networks. *Promischlennaiia energetika* [Industrial power engineering]. 2006, no 6, pp. 39-41 (in Russian).
13. Power Factor Correction. Power Quality Solutions. Published by Epcos AG. Edition 04/2006. Ordering No. EPC: 26017-7600. Printed in Germany. 79 p.
14. Hofmann W., J. Schlabach, W. Just. Reactive Power Compensation: A Practical Guide. 2 edition. New York: Wiley, 2012. April, 304 p.
15. Principles for Efficient and Reliable Reactive Power Supply and Consumption: Tech. rep. Washington: Federal Energy Regulatory Commission, 2005. February, 275 p.
16. Bohème, P.A. Simulation of Power System Response To Reactive Power Compensation. – Master's thesis, The University of Tennessee, 2006. November. 263 p.
17. Kostin B.N. *Optimizatsionnye zadachi v elektroenergetike* [Optimization problems in the power industry]. SPb. : SZTU, 2003, 120 p. (In Russian)
18. Karagodin V.V., Ribakov D.V. Optimization of placement of reactive power compensation devices in distribution electrical networks of special facilities. *Izvestija vssichih uczeblich zavedeni. Priborostroenie* [Proceedings of Universities. Instrument engineering], 2015, no. 10, pp. 823-828 (in Russian).
19. Reizlin V.I. *Chislennye metody optimizatsii* [Numerical optimization methods]. Textbook. Tomsk : Publishing center of Tomsk Polytechnic University, 2011, 105 p. (In Russian)
20. Kiczkin A.V. Application of a genetic algorithm to optimize the placement of alternative energy sources in the local segment of the active-adaptive network. *Sistemi. Metodi. Tekhnologii.* [Systems. Methods. Technology.]. 2016, no. 1(29), pp. 76-82. (in Russian)
21. Semenova L.A., Ingevatova A.O., Salimov P.M. Analysis of optimization methods in solving problems of selecting installation locations and power of compensating devices. *Universitetski kompleks kak regionalni centr obrazovaniia, nauki i kulturi: materialy Vserossiskoi nauczno-metopdiczeskoi konferenzii.* [University complex as a regional center of education, science and culture: materials of All-Russian scientific conference]. Orenburg : OGU, 2017, pp. 513-516. (in Russian)
22. Delfanti M., Granelli G., Marannino P., Montagna M. Optimal Capacitor. Placement Using Deterministic and Genetic Algorithms // *IEEE Trans. Power Systems*, 2000, Aug. vol. 15, no. 3.
23. Kremer O.B., Podvalnii S.L. Software implementation of optimization problems solution by genetic algorithm method. *Vestnik VGTU* [Bulletin of VGTU], 2017, pp. 23-24. (in Russian)
24. Semenova L.A., Ingevatova A.O. Optimization of compensating devices placement in electrical network nodes using genetic algorithm. *Dostizhenija vuzovskoi nauki ot teorii k praktike : sbornik materialov Vserossiskoi konferenzii s mezhdunarodnim ucastiem, posviashchenoi 15-letiju Kuznetskogo filiala OGU* [Scientific achievements of Universities: from theory to practice: collection of scientific papers of All-Russian conference with foreign participants devoted to 15<sup>th</sup> anniversary of Kumertau branch of OGU]. Orenburg : Publishing center of OGU, 2018, pp. 141-145. (In Russian)
25. Semenova L.A., Ingevatova A.O., Salimov P.M. On the choice of optimal power and locations of reactive power compensation devices. *Energetika: sostojanie, problemi, perspektivi : trudi VIII Vserossiskoi nauczno-techniczeskoi konferenzii* [Power engineering: state, problems, prospects: scientific papers of VIII All-Russian scientific and technical conference]. Orenburg : OOO Agency «Press», 2016, pp. 15-19. (In Russian)
26. Certificate of registration of the application program «Genetic algorithm with a fixed search step for the power of compensating devices» / L. Vlatskaya; UFER. No. 1998; publ. 10.25.19.
27. Vlazkaja L.A., Semenova N.G. Development of an algorithm for optimal placement of compensating devices in electrical network nodes using a genetic algorithm. *Materiali Mezhdunarodnoi nauczno-techniczeskoi konferenzii «Sostojanie i perspektivi razvitiia elektro- i teplekhnologii»* [Materials of the International scientific conference "State and Prospects of Development of Electrical and Heat power technology"]. Ivanovo : IGEU, 2019, vol. 1, pp. 303-307. (In Russian)
28. Konovalov I.S., Ostapenko S.S., Kobak V.G. Comparison of the efficiency of exact and approximate algorithms for solving the problem of set cover. *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo techniczeskogo universiteta* [Bulletin of Don State Technical University]. 2017, no. 3 (90), vol. 17, pp.137-144. (In Russian)

Влацкая Л.А., Семенова Н.Г. Применение генетических алгоритмов в задачах оптимизации размещения компенсирующих устройств // *Электротехнические системы и комплексы*. 2019. № 4(45). С. 21-28. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-4\(45\)-21-28](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-4(45)-21-28)

Vlatskaya L.A., Semenova N.G. Application of Genetic Algorithms in ProblemS of Placement Optimization of Compensating Devices. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2019, no. 4(45), pp. 21-28. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-4\(45\)-21-28](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-4(45)-21-28)

Усков А.Ю., Цимбол А.И., Монастыренко В.И.

Группа приборостроительных компаний ООО «Энергия-Источник»  
и ООО «Инженерно-Техническая Компания ББМВ»

## СПОСОБ КОММУТАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК ЖИЛЫХ ПОМЕЩЕНИЙ

Современные автоматизированные системы управления энергетическими ресурсами жилых помещений (в частности, системы «Умный дом») содержат в своем составе устройства коммутации электрических нагрузок, преимущественно осуществляющие коммутацию переменного тока сети электроснабжения (~220 В, 50 Гц, 16 А). Данный класс устройств предназначен для реализации возможности удаленного управления электрическими нагрузками (включение / выключение), а также осуществления автономной работы системы по заданному сценарию. В статье рассмотрены различные способы коммутации электрических нагрузок жилых помещений электромеханическими и полупроводниковыми устройствами, которые наиболее широко применяются в настоящее время. Проведен сравнительный анализ и выявлены недостатки каждого вида коммутирующих устройств. Рассмотрен процесс образования электрической дуги в моменты коммутации электромеханических устройств. Представлены современные варианты защиты либо снижения влияния от возникновения электрической дуги в электромеханических устройствах коммутации, приводящей к эрозии контактов. Рассмотрено влияние конкретного типа электрической нагрузки на ресурс электромеханического реле. Представлены современные полупроводниковые элементы для коммутации нагрузок в сетях переменного тока, а также способы снижения электромагнитных помех в сети при их использовании. Рассмотрены перспективные решения симисторов линейки «Snubberless», снижающие общую стоимость конечного изделия и уменьшающие его массо-габаритные показатели. Предложен способ коммутации электрических нагрузок жилых помещений, который основан на объединении преимуществ электромеханических реле и полупроводниковых приборов. Данное решение позволяет при сохранении малого габарита конечного устройства продлить электрический ресурс коммутирующего устройства до временного интервала, соответствующего сроку проведения капитального ремонта, либо всему сроку эксплуатации жилого помещения.

**Ключевые слова:** коммутация, электрическая нагрузка, резистивная нагрузка, емкостная нагрузка, индуктивная нагрузка, электромеханическое реле, симистор, переходный процесс, умный дом, управление, автоматизация.

### ВВЕДЕНИЕ

Задача повышения энергетической эффективности жилых помещений является одним из приоритетных направлений при проектировании жилых зданий. Развитие средств автоматизации привело к тому, что технические решения, которые ранее использовались преимущественно только в промышленности, стали доступны сферам строительства и обслуживания жилых зданий и помещений.

Доступность средств автоматизации позволяет уже на этапе строительства внедрять системы управления зданиями, которые способны поддерживать оптимальный климат внутри помещений, осуществлять в автоматическом режиме контроль над основными параметрами инженерных сетей помещений, а также собирать и передавать актуальные данные мониторинга параметров как обслуживающим (управляющим) компаниям, так и непосредственно владельцам помещений в режиме реального времени.

На сегодняшний день появилась возможность удаленного управления практически всеми инженерными системами здания в целом и отдельно взятого помещения в частности. Например, тепловые режимы работы системы отопления [1], сценарии освещения, телекоммуникационные сети и системы, водоснабжение и водоотведение, вентиляция и др.

Использование подобных систем автоматизации в жилых помещениях ставит перед инженером проектировщиком один из важнейших вопросов – необходимость надежной коммутации электрических нагрузок, а также силовых цепей переменного тока.

### СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СПОСОБОВ КОММУТАЦИИ

В настоящее время приоритет в выборе исполнительного механизма системы коммутации отдается нескольким решениям [2-4]. Основными коммутирующими устройствами в цепях переменного тока являются: электромеханические или твердотельные реле, симисторы, тиристоры, схемы на биполярных, полевых или IGBT-транзисторах.

При коммутации нагрузки с током до 0,1 А и напряжением до 10 В проблем с выбором исполнительного механизма не возникает ввиду отсутствия искрения контактов реле либо сравнительно невысокой рассеиваемой мощности на полупроводниковом ключевом элементе.

Основными потребителями электроэнергии в жилых помещениях являются бытовые электроприборы, питающиеся от сети переменного тока напряжением ~220 В и током потребления до 16 А. Ограничение потребляемой мощности в жилых помещениях в настоящее время осуществляется при помощи автоматических выключателей. Типичное значение уставки срабатывания автоматического выключателя для основных электрических потребителей составляет 16 А.

Таким образом, инженеру проектировщику необходимо обеспечить такой ресурс работы коммутирующего устройства, который был бы сравним со сроком эксплуатации здания (в лучшем случае) либо сроком эксплуатации до капитального ремонта. Выбор того или иного решения будет зависеть от преимуществ и недостатков исполнительного механизма при текущих условиях эксплуатации и видах нагрузки. Наиболее

неблагоприятным режимом работы является коммутация емкостной и индуктивной нагрузок.

Использование симистора в качестве коммутатора нагрузки влечет за собой проблему отвода тепла, при протекании через него токов более 0,5 А (симистор в данном случае будет рассеивать на своем корпусе мощность около 0,8 Вт, при среднем падении напряжения на симисторе 1,6 В), что в последствии приведет к его разрушению. Именно поэтому разработчики вынуждены дополнительно размещать на печатной плате устройства коммутации радиатор, что в конечном итоге ведет к увеличению габаритов изделия и его стоимости, что, в свою очередь, не всегда допустимо.

При управлении индуктивной нагрузкой, такой как электродвигатель, или при наличии помех в сети напряжение может достигнуть величины, при которой симистор может самопроизвольно открыться.

Одним из способов защиты симистора от выброса напряжения при работе с индуктивной нагрузкой является дополнительное включение варистора параллельно основным выводам симистора.

Для защиты симистора от превышения скорости изменения напряжения применяют снабберную цепочку (RC-цепь), подключаемую аналогично варистору. Но в настоящее время на рынке уже появились симисторы, которые не требуют установки внешней снабберной цепочки, например ВТА 16-600BW [5].

Также при разработке необходимо учитывать параметр  $dl/dt$  – максимальная скорость изменения тока при открытии симистора. При превышении этого значения симистор не успеет полностью открыться, что может привести к разрушению его кристалла. Так, например, для вышеприведенного симистора ВТА 16-600BW значение  $dl/dt$  составляет 50 А/мкс.

Для увеличения ресурса работы симистора, а также снижения рассеиваемой на нем мощности в моменты коммутации и уменьшения уровня помех в сети, для управления симистором рекомендуется использовать специализированные драйверы с детектором нуля на основе оптопар, например МОС3063 [6]. В данном случае обеспечивается также гальваническая развязка между управляющими и высоковольтными цепями, что является просто необходимым.

Основным преимуществом симистора является его возможность коммутации нагрузок без искрообразования и отсутствие механически подвижных частей, что гарантирует при необходимом теплоотводе и соблюдении рекомендаций по его защите практически неограниченный ресурс работы элемента.

Отказ от применения схем на биполярных и полевых транзисторах в цепях переменного тока с напряжением ~220 В обусловлен проблемами с отводом тепла и большими габаритными размерами, а также сложностью реализации, что приводит к удорожанию конечного устройства. IGBT-транзисторы, в свою очередь, нашли свое применение в цепях напряжением более 1000 В, так как потери в открытом состоянии IGBT-транзистора обратно пропорциональны протекающему току и приложенному напряжению.

Важным преимуществом применения схем на IGBT-транзисторах является большая частота коммутации по сравнению с реле и симистором [7]. В качестве примера на рис. 1 приведена зависимость тока коллектора IGBT

транзистора К50Н603 от частоты коммутации при напряжении коллектор-эмиттер 400 В [8].

В условиях ограниченного пространства, а также большой коммутируемой мощности находят широкое применение электромеханические реле, которые имеют меньшие габариты, чем симистор в сочетании с радиатором. Но в то же время применение электромеханического реле связано с проблемой механического износа в процессе эксплуатации, который возникает в моменты замыкания и размыкания реле.

При размыкании реле между контактами образуется электрическая дуга [9], а при замыкании наблюдается возникновение искрового эффекта, что ведет к эрозии контактов реле и к дальнейшему их «залипанию», а это уже, в свою очередь, к неправильной работе устройства коммутации в целом и, как следствие, возможности возникновения аварийной ситуации.

Вторым не менее важным вопросом, возникающим при использовании электромеханических реле, является обеспечение необходимого ресурса работы (срока службы изделия в целом). Электрический ресурс реле выражается в количестве срабатываний реле под нагрузкой и зависит главным образом от величины тока нагрузки. Например, зависимость электрического ресурса от вида нагрузки реле RT314005 производства компании SCHRACK приведена в табл. 1 [10].

Согласно данным производителя электрический ресурс реле RT314005 при работе на резистивную нагрузку с коммутируемым током до 16 А составляет  $50 \times 10^3$  циклов срабатывания. В то же время для аналогичной нагрузки с коммутируемым током до 20 А ресурс составляет  $6 \times 10^3$  срабатываний [10]. Это говорит о том, что при частоте срабатываний 1 раз в 10 минут, в случае работы на номинальную нагрузку, срок службы указанного реле будет менее десяти лет. Но при увеличении тока до 20 А срок службы уменьшается до одного года.

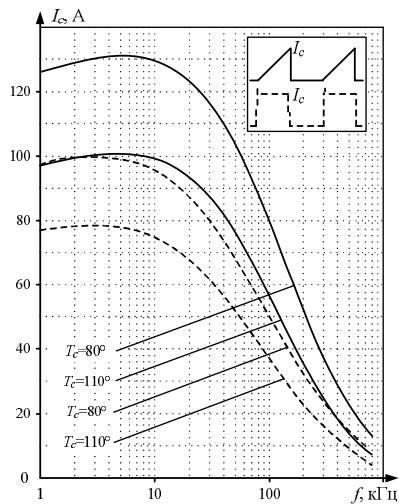


Рис. 1. Зависимость тока коллектора IGBT транзистора К50Н603 от частоты коммутации

Таблица 1

Зависимость электрического ресурса реле RT314005 производства компании SCHRACK от вида нагрузки

Load	Cycles
16A, 250VAC, NO contact, 85°C, DF 10%, UL508	$50 \times 10^3$
16A, 250VAC, NO contact, 70°C, 30min <sup>-1</sup>	$53 \times 10^3$
20A, 250VAC, NO contact, 85°C, UL508	$6 \times 10^3$
1000W incandescent lamp, 250VAC	$1,2 \times 10^3$
10A, 250VAC, cosφ=0,6, CO contact, 70°C	$200 \times 10^3$
5A, 250VAC, cosφ=1, motor, NO contact, 10min <sup>-1</sup>	$1,1 \times 10^6$
0,26A, 230VAC, cosφ=0,38, valve, NO, 25min <sup>-1</sup>	$7,6 \times 10^6$

В табл. 2 приведены усредненные значения срока службы современных малогабаритных реле в процентах в зависимости от типа нагрузки [11].

Рассмотрим процесс возникновения электрической дуги при коммутации реле индуктивной нагрузки более подробно.

Электрическая дуга при размыкании контактов появляется из-за непрерывности тока. Это объясняется законом Ленца – в электрической цепи возникает ЭДС

$$E_L = -L \frac{di}{dt},$$

которая препятствует изменению тока. Поэтому ток протекает через воздушный промежуток (зазор) между удаляющимися контактами реле (появляется электрическая дуга) [12].

На рис. 2 показаны зависимости напряжения от тока и времени.

Таблица 2

Зависимость электрического ресурса реле от вида нагрузки в процентном отношении от номинального ресурса

Тип нагрузки	Процент от номинального электрического ресурса реле, %
Резистивная	75
Индуктивная	40
Емкостная	75
Электродвигатель	20
Лампа	10

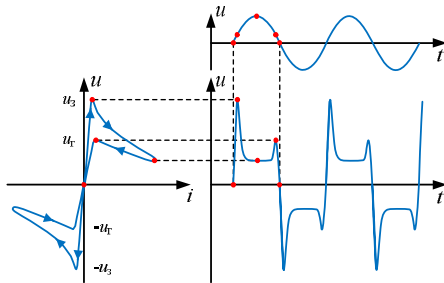


Рис. 2. Напряжение и ток на дуге при переменном токе

Дуга возникает при напряжении, равном  $U_s$ , и угасает при напряжении, равном  $U_r$ .

На графиках рис. 2 видно, что выключение реле в моменты, когда напряжение фазы равно нулю и ниже напряжения, равного  $U_s$ , образования электрической дуги на контактах реле не происходит.

Искрение контактов реле при замыкании происходит при нагрузке, имеющей емкостной характер, так как разряженная емкость в начальный момент времени является короткозамкнутым участком цепи. При этом значение тока уменьшается по мере заряда емкости.

На рис. 3 показана упрощенная схема коммутации нагрузки, имеющей емкостной характер [13].

Переходный процесс можно описать при помощи формулы

$$i(t) = \frac{U_m}{R} \times \left[ \cos\varphi \sin(\omega t + \psi - \varphi) + \sin\varphi \cos(\psi - \varphi) e^{-\frac{t}{\tau}} \right], \quad (1)$$

где  $U_m$  – максимальное напряжение в сети переменного тока;  $R$  – активное сопротивление нагрузки;  $\varphi$  – угол между током и напряжением в сети;  $\omega$  – угловая частота синусоидального тока;  $\psi$  – начальная фаза синусоидального тока;  $\tau$  – постоянная времени.

В момент включения формула (1) преобразуется в формулу (2):

$$i(0) = \frac{U_m}{R} \sin(\psi), \quad (2)$$

Из формулы видно, что максимальный ток будет протекать в момент включения, когда начальная фаза будет равна  $\pi/2$ , в этот момент времени ток может оказаться большим, чем ток в сети. График переходного процесса показан на рис. 4.

График на рис. 4 наглядно демонстрирует момент возникновения всплеска тока и, как следствие, искры на контактах реле. При этом с течением времени значение тока угасает.

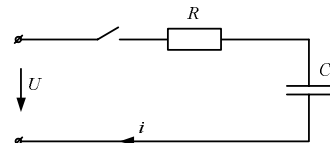


Рис. 3. Упрощенная схема коммутации

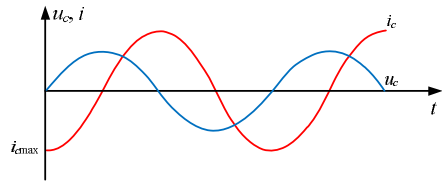


Рис. 4. График переходного процесса



Увеличивать ресурс работы реле можно путем использования различных способов искрогашения [14]. Одним из решений проблемы могло бы стать добавление в схему устройства коммутации элемента, осуществляющего контроль и переключение контактов реле именно в моменты перехода фазы через ноль.

Однако данное решение физически невозможно реализовать из-за разброса характеристик электромагнитного реле и инерционности самого механизма.

При отсутствии ограничений по габаритам устройства увеличение ресурса работы возможно при применении реле с увеличенным расстоянием между контактными группами и имеющими в своем составе постоянные магниты, которые, в свою очередь, вытесняют электрическую дугу из зазора между контактами (магнитный обдув) [15].

ПРЕДЛАГАЕМЫЙ СПОСОБ КОММУТАЦИИ

Более эффективным методом является уменьшение тока по сравнению с номинальным значением в момент коммутации. В данном методе возможны два варианта реализации.

Первый вариант – применение реле с многократным запасом по коммутируемому току (актуально при управлении объектами, имеющими сравнительно небольшое энергопотребление).

Второй вариант – объединение преимуществ полупроводниковых элементов и электромеханических реле в одном схемотехническом решении, а именно реализация безопасного переключения контактов путем параллельного включения к контактам электромеханического реле полупроводникового коммутационного элемента, в частности симистора.

При этом симистор необходимо использовать совместно с драйвером управления, обладающим встроенным детектором нулевой фазы, на основе оптопары, что позволит также обеспечить гальваническую развязку цепей управления от силовых цепей. Сама же катушка реле конструктивно имеет гальваническую

развязку от переключающих контактов.

Упрощенная схемная реализация совместного использования малогабаритного реле и симистора представлена на рис. 5. Детектор перехода фазы через ноль позволит снизить помехи в сети в моменты коммутации, а также продлит ресурс работы симистора.

Системы автоматизации жилых зданий в подавляющем большинстве предусматривают наличие управляющего микроконтроллера (МК), поэтому применение драйвера с входом, совместимым с выходами МК, значительно облегчает задачу управления симистором.

Управление малогабаритным электромеханическим реле наиболее легко осуществлять при помощи цифрового MOSFET транзистора.

На схеме, приведенной на рис. 5, слева расположены входы управления реле и симистора. Подача логической единицы на оптрон запускает встроенный детектор нуля, в момент перехода фазы через ноль открывается симистор.

Нагрузка (см. рис. 5) подключена к силовой цепи. Микроконтроллер программно реализует временную задержку в 100 мс для того, чтобы симистор гарантированно открылся. Затем МК подачей логической единицы на второй вход управления включает реле.

Контакты реле шунтируют симистор до самого выключения нагрузки, поэтому ток через него не протекает и падения напряжения на нем не происходит, что, в свою очередь, не ведет к его саморазогреву и необходимость в отведении от него тепловой энергии полностью отсутствует, то есть установка радиатора не требуется.

Выключение нагрузки происходит в обратном порядке. Сперва МК отключит катушку реле и программно реализует временную задержку в 100 мс (эта задержка нужна, чтобы дождаться следующего спада тока нагрузки в полупериоде ниже тока удержания симистора). Затем МК будет подан сигнал на запирающие симистора.

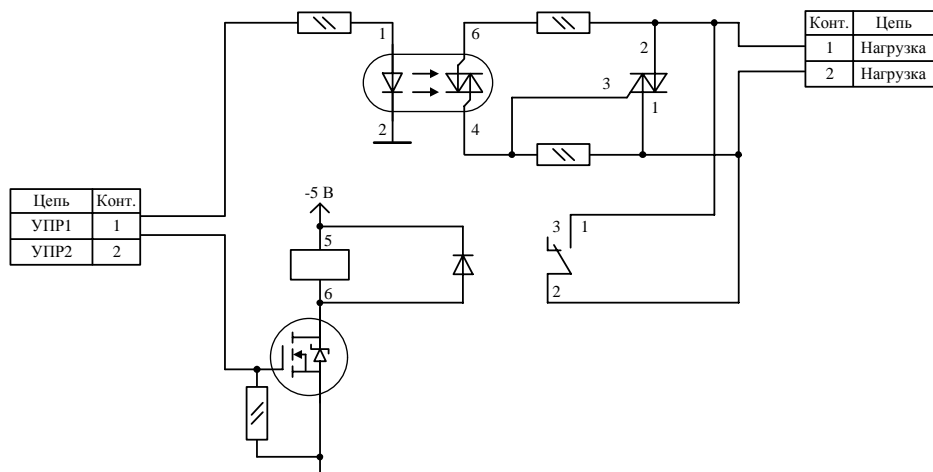


Рис. 5. Упрощенная схема совместного использования малогабаритного реле и симистор

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных экспериментальных сравнительных испытаний предложенного способа коммутации электрических нагрузок жилых помещений и существующих способов было подтверждено повышение надежности работы системы коммутации, а также увеличение ресурса работы контактной группы электромеханического реле при сохранении небольших габаритов конечного устройства коммутации.

Особо необходимо отметить, что в предложенном схемотехническом решении полностью исключается необходимость в использовании теплоотвода в виде радиатора для полупроводникового элемента.

Отказ от использования дополнительного теплоотвода также позволит инженеру-проектировщику осуществлять скрытый монтаж коммутирующего устройства в жилом помещении.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Uskov A.Yu., Lohov S.P., Faida, E.L., Varganov V.V. An Adaptive Control System of Electric Heating for Residential Premises // Russian Electrical Engineering. Vol. 85. No 4. 2014 // Allerton Press, Inc. New York, USA, 2014. P. 198-201.
2. <https://zen.yandex.ru/media/elektrik/verdotelnoe-rele-protiv-elektromehaniki-cto-vybrat-5b9a801f02e24b00aa69df79>.
3. Мощные электромагнитные реле. Справочник инженера.

СПб., 2001. 152 с.

4. Курилин С.И. Электротехнические материалы и технология электромонтажных работ: учеб.-метод. пособие. Гомель: БелГУТ, 2009. 92 с.
5. <https://www.st.com/resource/en/datasheet/bta16.pdf>.
6. <https://www.farnell.com/datasheets/1688212.pdf>
7. IR Application Notes: Use Gate Charge to Design the Gate Drive Circuit for Power MOSFETs and IGBTs. AN-944
8. [https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-IKW50N60H3-DataSheet-v02\\_02-EN.pdf?fileId=db3a30432a40a650012a47934b1e2bea](https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-IKW50N60H3-DataSheet-v02_02-EN.pdf?fileId=db3a30432a40a650012a47934b1e2bea)
9. <https://www.compel.ru/lib/54169>
10. [https://www.te.com/commerce/DocumentDelivery/DDEContoller?Action=showdoc&DocId=Data+Sheet%7FR1%7F0219%7Fpdf%7FEnglish%7FENG\\_DS\\_RTI\\_0219.pdf%7F9-1393239-8](https://www.te.com/commerce/DocumentDelivery/DDEContoller?Action=showdoc&DocId=Data+Sheet%7FR1%7F0219%7Fpdf%7FEnglish%7FENG_DS_RTI_0219.pdf%7F9-1393239-8)
11. <http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5988-6917EN.pdf>.
12. [http://www.gigavat.com/viklyuchateli\\_elektricheskaya\\_duga.php](http://www.gigavat.com/viklyuchateli_elektricheskaya_duga.php)
13. Чумаков А.В., Илюшин В.С. Теоретические основы электротехники. Базовый конспект лекций. Тула: Тульский государственный университет, 2000. 160 с.
14. Сапожников В.В., Кравцов Ю.А., Сапожников Вл.В. Теоретические основы железнодорожной автоматики и телемеханики: учебник для вузов ж.-д. транспорта. М.: ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2008. 394 с.
15. Кривандин С. Мощные контакторы Omron для энергетики, промышленности и транспорта // Электронные компоненты. 2007. № 11. С. 36-40.

Поступила в редакцию 24 августа 2019 г.

## INFORMATION IN ENGLISH

## METHOD OF SWITCHING ELECTRICAL LOADS OF RESIDENTIAL PREMISES

Aleksey Yu. Uskov

Head of Development Department, Development Department, Group of instrument-making companies LLC "Energiya-Istochnik" and LLC "ITeK BBMV", Chelyabinsk, Russia. E-mail: UskovAlexey@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7368-208X>.

Andrey I. Tsimbol

Head of Design Department, Development Department, Group of instrument-making companies LLC "Energiya-Istochnik" and LLC "ITeK BBMV", Chelyabinsk, Russia.

Valeriy I. Monastyrenko

Design Engineer, Development Department, Group of instrument-making companies LLC "Energiya-Istochnik" and LLC "ITeK BBMV", Chelyabinsk, Russia.

Modern automated systems of management of energy resources of premises (in particular, "Smart house" systems) contain in the structure of the device of switching of electric loadings which are mainly carrying out switching of the alternating current of network of power supply (~220 V, 50 Hz, 16 A). This class of devices is designed to implement the possibility of remote control of electrical loads (on / off), as well as the implementation of automatic operation of the system according to a given script. The article deals with various methods of switching electrical loads of residential premises and electromechanical and semiconductor devices, which are most widely used at the present time. The comparative analysis is carried out and shortcomings of each type of switching devices are revealed. The process of formation of an electric arc in the moments of switching of electromechanical devices is considered. Modern variants of protection or reduction of influence from arc formation in electromechanical devices of commutation leading to erosion of contacts are presented. The

influence of a particular type of electrical load on the life of an electromechanical relay is considered. Modern semiconductor elements for switching loads in AC networks as well as ways of reducing electromagnetic interference in the networks using them are presented. Promising solutions such as "Snubberless" series triac reducing the total cost of the final product and reducing its weight and dimensions are considered. A method for switching electrical loads of residential premises is proposed, which is based on combining the advantages of electromechanical relays and semiconductor devices. This solution makes it possible both to maintain the small size of the final device and to extend the electrical life of the switching device to a time interval corresponding to the period of major repairs or the entire life of the premises.

**Keywords:** switching, electrical load, resistive load, inductive load, electromechanical relay, triac, transient, smart home, control, automation.

## REFERENCES

1. Uskov A.Yu., Lokhov S.P., Faida, E.L., Varganov V.V. An Adaptive Control System of Electric Heating for Residential Premises // Russian Electrical Engineering. Vol. 85. No 4. 2014 / Allerton Press, Inc. New York, USA, 2014. P. 198-201.
2. <https://zen.yandex.ru/media/elektrik/verdotelnoe-rele-protiv-elektromehani-cto-vybrat-5b9a801f02e24b00aa69df79>.
3. Moshchnye elektromagnitnye rele. Spravochnik inzhenera [Powerful electromagnetic relays. Engineer Reference]. St. Petersburg, 2001. 152 p. (In Russian)
4. Kurilin S.L. Elektrotekhnicheskie materialy i tekhnologiya elektromontaznykh rabot. Uchebno-metodicheskoe posobie [Electrical materials and electrical installation technology. Educational-methodical manual]. Gomel, Belarusian State University of Transport, 2009. 92 p. (In Russian)
5. <https://www.st.com/resource/en/datasheet/bta16.pdf>.
6. <https://www.farnell.com/datasheets/1688212.pdf>
7. IR Application Notes: Use Gate Charge to Design the Gate Drive Circuit for Power MOSFETs and IGBTs. AN-944
8. [https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-IKW50N60H3-DataSheet-v02\\_02-EN.pdf?fileId=db3a30432a40a650012a47934b1e2bea](https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-IKW50N60H3-DataSheet-v02_02-EN.pdf?fileId=db3a30432a40a650012a47934b1e2bea)
9. <https://www.compel.ru/lib/54169>
10. [https://www.te.com/commerce/DocumentDelivery/DDEController?Action=showdoc&DocId=Data+Sheet%7FRT1%7F0219%7Fpdf%7FEnglish%7FENG\\_DS\\_RT1\\_0219.pdf%7F9-1393239-8](https://www.te.com/commerce/DocumentDelivery/DDEController?Action=showdoc&DocId=Data+Sheet%7FRT1%7F0219%7Fpdf%7FEnglish%7FENG_DS_RT1_0219.pdf%7F9-1393239-8)
11. <http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5988-6917EN.pdf>.
12. [http://www.gigavat.com/viklyuchateli\\_elektricheskaya\\_duga.php](http://www.gigavat.com/viklyuchateli_elektricheskaya_duga.php)
13. Chumakov A.V., Ilyushin V.S. Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki. Bazovyy konspekt lektsiy [Theoretical foundations of electrical engineering. Basic lecture notes]. Tula, Tula State University, 2000. 160 p. (In Russian)
14. Sapozhnikov V.V., Kravtsov Yu.A., Sapozhnikov V.I. Teoreticheskie osnovy zhelezodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki: uchebnik dlya vuzov zhelezno-dorozhnogo transporta [Theoretical foundations of railway automation and telemechanics: textbook for universities of railway transport]. Moscow: GOU «Training center for railway transport industry» Publ., 2008. 394 p. (In Russian)
15. Krivandin S. Powerful Omron Contactors for Power, Industry, and Transport// Elektronnyye komponenty [Electronic components]. 2007. No 11. P. 36-40. (In Russian)

Усков А.Ю., Цимбол А.И., Монастыренко В.И. Способ коммутации электрических нагрузок жилых помещений // Электротехнические системы и комплексы. 2019. № 4(45). С. 29-34. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-4\(45\)-29-34](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-4(45)-29-34)

Uskov A.Yu., Tsimbol A.I., Monastyrenko V.I. Method of Switching Electrical Loads of Residential Premises. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2019, no. 4(45), pp. 29-34. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-4\(45\)-29-34](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-4(45)-29-34)

## УЛУЧШЕНИЕ КАЧЕСТВА НАПЯЖЕНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ С АКТИВНЫМИ ВЫПРЯМИТЕЛЯМИ ЗА СЧЕТ ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНЫХ ТАБЛИЦ УГЛОВ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ ШИМ

В работе предложена усовершенствованная система управления активным выпрямителем мощного трехуровневого преобразователя частоты, реализованная на базе широтно-импульсной модуляции с удалением выделенных гармоник. Сущность усовершенствования заключается в использовании различных таблиц углов переключения, выбор которых осуществляется в зависимости от заданного коэффициента модуляции. Использование дополнительных таблиц углов переключения обеспечивает улучшение показателей качества электроэнергии на вводных шинах электропривода за счет устранения 35-й гармоники. При имитационном моделировании использовались параметры главных электроприводов стана холодной прокатки 2000 ЛПЦ-11 ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат». На основании разработанной имитационной модели преобразователя частоты с активным выпрямителем была произведена сравнительная оценка исходной и усовершенствованной системы управления активным выпрямителем с позиции их влияния на гармонический состав напряжения на шинах 10 кВ в системе внутризаводского электроснабжения, которая показала снижение среднего значения суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения более чем на 5%.

**Ключевые слова:** активный выпрямитель, преобразователь частоты, широтно-импульсная модуляция, показатели качества электроэнергии, система управления активного выпрямителя.

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время широкое распространение получили преобразователи частоты с активными выпрямителями (ПЧ с АВ). Одной из областей промышленности, где применяются ПЧ с АВ, является металлургия [1-3]. Главные электроприводы валков клетей современных прокатных станов строятся, как правило, на основе синхронных или асинхронных двигателей, питаемых преобразователями частоты. Для обеспечения высокой производительности таких станов используются электродвигатели большой мощности. Учитывая, что технология работы прокатных станов предусматривает частые динамические режимы, в целях экономии необходимо обеспечить рекуперацию электроэнергии в питающую сеть. Благодаря использованию АВ можно не только выполнить данное требование, но и работать с регулируемым коэффициентом мощности, что повышает энергетическую эффективность электропривода.

Активный выпрямитель строится на базе полнотью управляемых силовых ключей (IGBT-транзисторов или IGBT-тириستоров) и по своей структуре аналогичен автономному инвертору напряжения [2]. Силовые ключи в АВ работают в режиме широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Частота коммутации силовых ключей в АВ относительно небольшая и составляет порядка 150-700 Гц. Обусловлено это параметрами IGBT-тиристоров и стремлением снизить потери при коммутации силовых ключей. Низкая частота коммутации силовых ключей приводит к значительным искажениям потребляемого АВ тока, что может сказаться на работе других потребителей. Для снижения влияния АВ на качество

напряжения в точке подключения ПЧ используют специальные алгоритмы ШИМ. Одним из таких алгоритмов является ШИМ с удалением выделенных гармоник [4, 5]. Производители ПЧ при реализации данного алгоритма производят расчет углов переключения с удалением, как правило, гармоник в области низких частот и не адаптируют алгоритм ШИМ под электрический комплекс, в который входит электропривод. Недостатками существующих алгоритмов ШИМ с удалением выделенных гармоник, используемых в ПЧ с АВ таких фирм производителей, как ABB, Danieli, Converterteam и др., являются: 1) ограниченное число гармоник, подлежащих исключению из-за низкой частоты коммутации силовых ключей; 2) отсутствие возможности изменения номеров исключаемых гармоник; 3) применение ШИМ с удалением небольшого числа гармоник для обеспечения хороших динамических показателей ПЧ с АВ (таблицы углов переключения рассчитаны для широкого диапазона изменения коэффициента модуляции).

Одним из путей совершенствования систем управления АВ может являться использование ШИМ с удалением выделенных гармоник с несколькими таблицами углов переключения, обеспечивающих наилучшие показатели качества электроэнергии в токе, потребляемом ПЧ с АВ, в зависимости от режима работы электропривода. В данной работе разработана и исследована усовершенствованная система управления АВ, реализующая данный принцип.

### АЛГОРИТМ ШИМ С УДАЛЕНИЕМ ВЫДЕЛЕННЫХ ГАРМОНИК

Рассмотрим принцип работы алгоритма ШИМ с удалением выделенных гармоник. На **рис. 1** представлена осциллограмма фазного напряжения на входе трехуровневого АВ относительно нейтральной точки.

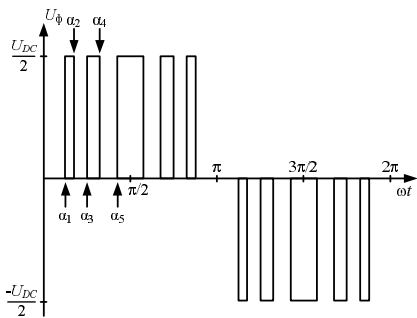


рис. 1. Оциллограмма фазного напряжения на входе АВ

Так как напряжения, представленное на рис. 1, симметрично относительно начала координат, то оно содержит нечетный спектр гармоник, амплитуды которых зависят от углов переключения  $\alpha$  и от количества импульсов за четверть периода. В алгоритме ШИМ с удалением выделенных гармоник углы переключения рассчитываются таким образом, чтобы в кривой напряжения не было гармоник, подлежащих исключению. Номера таких гармоник определяются силовой схемой электропривода. Количество гармоник, подлежащих исключению, ограничивается на уровне  $n-1$ , где  $n$  – число переключений силовых ключей за четверть периода [6]. Таблицы с углами переключения в зависимости от коэффициента модуляции, от которого зависит величина первой гармоники тока, рассчитываются заранее и сохраняются в памяти контроллера ШИМ.

Расчет углов переключения в общем случае производится согласно системе уравнений (1) [7-10]:

$$\begin{cases} \cos(\alpha_1) - \cos(\alpha_2) + \cos(\alpha_3) + \dots + \cos(\alpha_n) = \mu \\ \cos(m_1\alpha_1) - \cos(m_1\alpha_2) + \cos(m_1\alpha_3) + \dots \\ \dots + \cos(m_1\alpha_n) = 0 \\ \dots \\ \dots \\ \cos(m_{n-1}\alpha_1) - \cos(m_{n-1}\alpha_2) + \cos(m_{n-1}\alpha_3) + \dots \\ \dots + \cos(m_{n-1}\alpha_n) = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где  $\alpha_i$  – величина угла переключения силового ключа;  $m_j$  – номер гармоники, подлежащей исключению;  $n$  – число углов переключения за четверть периода.

Количество гармоник, подлежащих исключению, ограничивают на уровне  $n-1$  по причине невозможности нахождения математического решения уравнения (1) в широком диапазоне коэффициента модуляции  $\mu$ , что необходимо для отработки динамических режимов работы АВ. Поиск решений нелинейной системы уравнений (1), как правило, производят методом перебора начальных значений [11]. В некоторых случаях для расчета углов переключений применяют методы численной оптимизации [10].

Производители мощных ПЧ с АВ, такие как АВВ, Danieli, Convertam и др., используют в своих преобразователях алгоритм ШИМ с удалением выделенных гармоник, однако следует отметить, что углы переключения рассчитываются таким образом, чтобы исключить наиболее значимые гармоники в области низких частот. При этом, как показывают результаты исследований

[2, 5], ПЧ с АВ с использованием данного алгоритма не всегда способны обеспечить выполнение существующего стандарта, нормирующего показатели качества электроэнергии [12]. Поэтому существует необходимость совершенствования алгоритмов ШИМ силовых ключей АВ или разработка принципиально новых решений.

РАЗРАБОТКА УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО НАБОРА ТАБЛИЦ УГЛОВ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ

В данной работе предложен алгоритм с выбираемыми таблицами углов переключения. На рис. 2 показана упрощенная схема усовершенствованной системы управления АВ с использованием дополнительных наборов таблиц углов переключений. Система управления получает из силовой части ЭП сигналы величин напряжения в звене постоянного тока  $U_{DC\text{факт}}$ , напряжений на входе АВ  $U_{abc}$  и величины фазных токов  $i_{abc}$ .

Датчики напряжения ДН преобразуют величины напряжений  $U_{DC}$  и  $U_{abc}$  в требуемый вид  $U_c$  и  $U_{DC\text{факт}}$ . Фильтр низких частот (ФНЧ) обеспечивает устойчивую работу системы регулирования с учетом присутствия в гармоническом ряду потребляемого тока значительных величин низких гармоник. Для преобразования координат служат блоки  $abc/dq0$  и  $dq0/m0$ .

Система регулирования является типовой и состоит из двух контуров: внутренних контур регулирования токов во вращающейся системе координат  $dq$ , внешний контур регулирования напряжения. Из величины задания напряжения в звене постоянного тока  $U_{DCз}$  вычитается величина фактического напряжения  $U_{DC\text{факт}}$ , полученная разность  $\Delta U_{DC}$  поступает на вход регулятора напряжения (РН). Регулятор напряжения обеспечивает величину задания тока по оси  $d$   $i_{dз}$ , из которой вычитается величина фактического тока  $i_d$ , разность поступает на вход регулятора тока по оси  $d$  (РТ)  $i_d$ . Величину задания тока по оси  $q$   $i_{qз}$ , определяющую величину реактивного тока, в общем случае задают равной 0. Выходы регуляторов тока формируют напряжение на входе АВ во вращающейся системе координат  $dq$ .

После преобразования в блок ШИМ поступают сигналы коэффициента модуляции  $\mu$  и угла управления  $\theta$ , а также сигнал синхронизации с питающей сетью  $\omega t$  с блока фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ). В общем случае система управления работает по исходной таблице углов переключения, однако при появлении сигнала с блока выбора таблиц и синхронизации селектор производит переключение на другую таблицу, и значения углов переключения поступают в блок формирования импульсов управления силовыми ключами АВ. При этом следует отметить, что производить переключения таблиц можно лишь в начальный момент времени периода напряжения для обеспечения симметричности напряжения на входе АВ и его устойчивой работы.

Для проведения исследований была разработана имитационная модель ПЧ с АВ в программном пакете Matlab/Simulink на основе параметров главного электропривода рабочих валков клетки стана холодной прокатки 2000 ЛППЦ-11 ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (рис. 3). Питание данного электропривода осуществляется с секции внутривзаводской системы электроснабжения 10 кВ через вакуумный выключатель Q1 (рис. 2). Первичные обмотки трансформаторов T1 и T2 соединены последовательно.

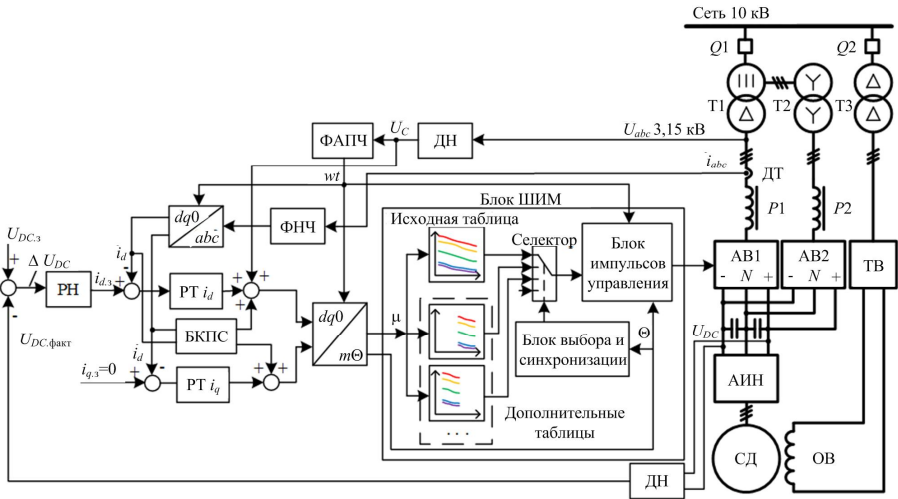


Рис. 2. Упрощенная структурная схема усовершенствованной системы управления АВ и силовой части ЭП

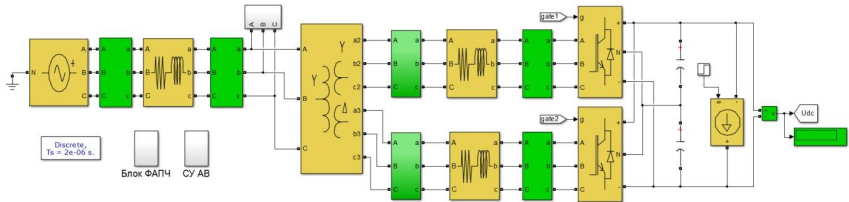


Рис. 3. Имитационная модель ПЧ с АВ, реализованная в среде Matlab/Simulink

Использование двух понизительных трансформаторов с разными группами соединения вторичных обмоток, углы напряжения в которых сдвинуты на  $30^\circ$ , позволяет реализовать 12-пульсную схему выпрямления.

Вторичные обмотки трансформаторов питают два активных выпрямителя напряжением 3,15 кВ через реакторы P1 и P2. Данное схемотехническое решение позволяет получить в гармоническом спектре напряжения только гармоники, кратные  $12n \pm 1$ , где  $n=1, 2, 3, \dots$ . Активные выпрямители подключены к общему звену постоянного тока, от которого получает питание автономный инвертер напряжения (АИН). В качестве силовых ключей в АВ и АИН используются IGBT-тиристоры. Для обеспечения трехуровневой топологии АВ и АИН в звене постоянного тока реализована нейтральная точка. АИН питает синхронный двигатель СД мощностью 8 МВт и напряжением 3 кВ. На АВ данного ПЧ применен ШИМ с удалением выделенных гармоник. Ток обмотки возбуждения регулируется тиристорным возбудителем ТВ, получающим питание через трансформатор Т3 и вакуумный выключатель Q3 с секции 10 кВ.

В имитационной модели питающая сеть 10 кВ представлена идеальным источником напряжения и последовательно подключенным активно-индуктивным сопротивлением. 12-пульсная схема реализована с помощью трансформатора с двумя вторичными обмотками,

обеспечивающими сдвиг напряжения на  $30^\circ$  относительно друг друга.

Реакторы на входах АВ реализованы с помощью активно-индуктивных сопротивлений. Для обеспечения реализации трехуровневой структуры АВ в звене постоянного тока используются два конденсатора с напряжениями 4840/2 В в номинальном режиме работы. Моделирование АВ и инвертера производилось с помощью блоков «Three-level Bridge». АИН и синхронный двигатель представлены упрощенно с помощью эквивалентного источника тока [3]. Система управления АВ реализована двухконтурной: внутренний контур регулирования токов во вращающейся системе координат dq, внешний контур регулирования напряжения. Синхронизация с питающим напряжением обеспечивается с помощью блока фазовой автоподстройки частоты.

Исходная таблица углов переключения алгоритма ШИМ с удалением выделенных гармоник рассчитана на исключение из гармонического состава напряжения низкочастотных гармоник, присутствующих в гармоническом спектре потребляемого тока, с номерами 11, 13, 23, 25.

Как было уже сказано ранее, количество гармоник, подлежащих исключению, ограничивают на уровне  $n-1$  по причине невозможности нахождения математического решения уравнения (1) в широком диапазоне коэффици-

ента модуляции  $\mu$ , что необходимо для отработки динамических режимов работы АВ. Однако, как показали исследования, коэффициент модуляции в статическом режиме работы изменяется в относительно небольших пределах (рис. 4). Поэтому при проведении исследований была рассчитана дополнительная таблица углов переключения с удалением также и 35-й гармоники. В общем случае усовершенствованная система управления позволяет производить переключения на дополнительные таблицы исходя из различных критериев.

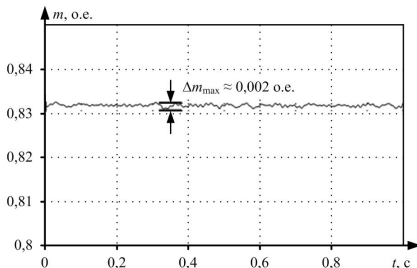


Рис. 4. График изменения коэффициента модуляции  $m$  при статическом режиме работы

Отработку динамических режимов работы система управления производит по исходной таблице углов переключения силовых ключей, рассчитанной на удаление 4 гармоник. При работе АВ в статическом режиме работы блок выбора таблицы и синхронизации формирует в начальный момент периода питающего АВ напряжения сигнал выбора таблицы углов переключения, рассчитанной на удаление 5 гармоник. В случае изменения коэффициента модуляции в значительных пределах происходит возврат на работу по исходной таблице.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ГАРМОНИЧЕСКОГО СОСТАВА ТОКА АВ И НАПРЯЖЕНИЯ ПИТАЮЩЕЙ СЕТИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ БАЗОВОГО И УСОВЕРШЕНСТВОВАННОГО АЛГОРИТМОВ ШИМ

На имитационной модели ПЧ с АВ были получены диаграммы гармонического состава потребляемого АВ тока и сетевого напряжения в точке подключения электропривода. При моделировании учитывалось эквивалентное влияние на сеть электроприводов 5 клетей стана. Сравнение величин коэффициентов гармонических составляющих  $n$ -х гармоник  $K_{I(n)}$  и  $K_{U(n)}$ , а также величины суммарного коэффициента гармонических составляющих  $K_I$  и  $K_U$  производилось для исходной и улучшенной системы управления АВ.

В Российской Федерации нормы качества электрической энергии в сетях общего назначения регламентируются стандартом [12]. В соответствии с ним величину суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения определяется по формуле

$$K_U = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^m U_n^2 + U_0^2}}{U_1} \cdot 100, \quad (2)$$

где  $U_1$  — величина первой гармоники напряжения;  $U_n$  — величина  $n$ -й гармоники напряжения;  $m$  — максималь-

ный номер гармоники, для которой производится расчет ( $m = 40$ ).

Величина суммарного коэффициента гармонических составляющих тока определяется по формуле

$$K_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^m I_n^2 + I_0^2}}{I_1} \cdot 100, \quad (3)$$

где  $I_1$  — величина первой гармоники напряжения;  $I_n$  — величина  $n$ -й гармоники напряжения;  $m$  — максимальный номер гармоники.

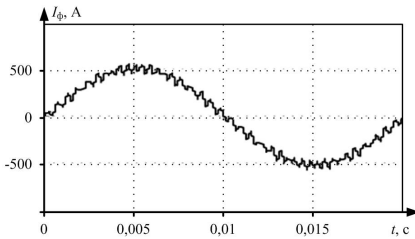
Существующий стандарт определяет показатели качества электрической энергии, рассматривая гармоники по 40. Однако, как показывают исследования [2, 5, 12], этого недостаточно, т.к. потребляемый ПЧ ток содержит значимые высокочастотные гармоники с  $n > 40$ , которые при наличии резонансных явлений могут привести к сильным искажениям питающего напряжения [14-16]. Поэтому в данной работе анализировались гармоники до  $n = 100$ .

На рис. 5 и 6 представлены осциллограммы (а) и гистограммы гармонического состава (б) сетевого тока и напряжения на шине 10 кВ, полученные при использовании исходной системы управления АВ, а на рис. 7, 8 — осциллограммы (а) и гистограммы гармонического состава (б) сетевого тока и напряжения, полученные при использовании улучшенной системы управления.

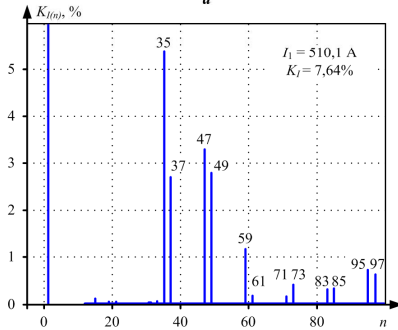
В табл. 1 представлены значения коэффициентов гармонических составляющих сетевого тока, потребляемого ПЧ, для значимых гармоник и величина  $K_I$ , а также величина первой гармоники тока  $I_1$  для имитационной модели АВ при работе по исходной и усовершенствованной системы управления АВ и относительное изменение показателей  $\delta$  в процентах. В табл. 2 представлены значения коэффициентов гармонических составляющих сетевого напряжения на шине 10 кВ для значимых гармоник, величина  $K_U$  и первой гармоники напряжения  $U_1$  для исходной и усовершенствованной системы управления, а также относительное изменение показателей  $\delta$  в процентах.

Таблица 1 Показатели качества сетевого тока

Номер гармоники	$K_I(n)$ , %		$\delta K_{I(n)}$ , %
	Исходная система	Улучшенная система	
35	5,38	0,01	99,8
37	2,69	5,37	-99,6
47	3,3	2,98	9,70
49	2,79	2,65	5,02
59	1,15	0,06	94,9
61	0,17	0,74	-335
71	0,15	0,29	-93,3
73	0,41	0,17	58,5
83	0,3	1,02	-240
85	0,34	0,34	0
95	0,74	0,32	56,8
97	0,64	0,68	-6,25
$K_I$ , %	7,64	6,88	9,95
$I_1$ , А	510,1	511,7	-0,31

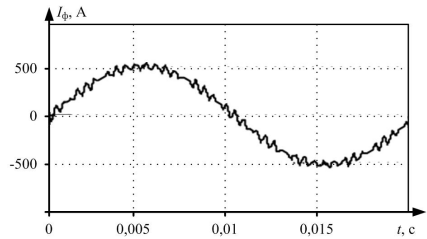


а

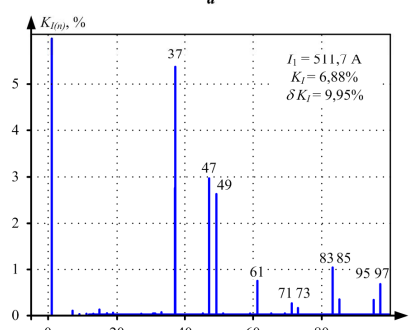


б

Рис. 5. Осциллограмма и гармонический состав сетевого тока ПЧ при использовании исходной системы управления АВ

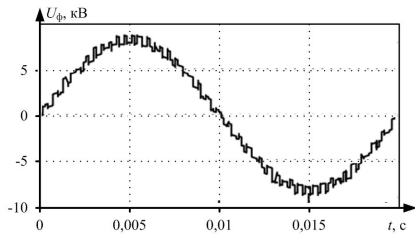


а

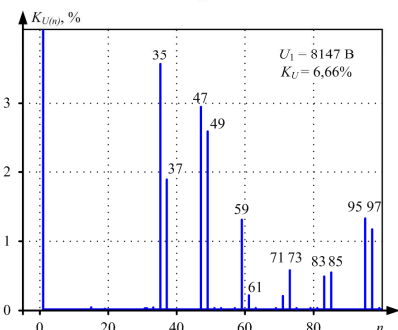


б

Рис. 7. Осциллограмма и гармонический состав сетевого тока ПЧ при использовании усовершенствованной системы управления АВ

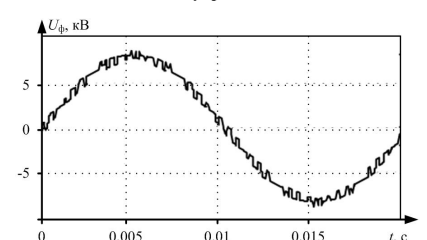


а

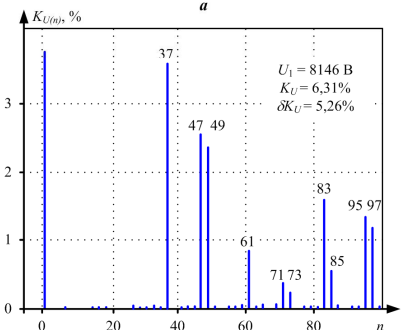


б

Рис. 6. Осциллограмма и гармонический состав сетевого напряжения ПЧ при использовании исходной системы управления АВ



а



б

Рис. 8. Осциллограмма и гармонический состав сетевого напряжения ПЧ при использовании усовершенствованной системы управления АВ



Таблица 2  
Показатели качества сетевого напряжения

Номер гармоники	$K_T(n)$ , %		$\delta K_{U(n)}$ , %
	Исходная система	Улучшенная система	
35	3,57	0,01	99,7
37	1,89	3,78	-100
47	2,94	2,66	9,52
49	2,59	2,47	4,63
59	1,29	0,07	94,6
61	0,20	0,86	-330
71	0,20	0,39	-95
73	0,57	0,23	59,7
83	0,48	1,61	-235,4
85	0,54	0,54	0
95	1,33	0,58	56,4
97	1,18	1,26	-6,78
$K_U$ , %	6,66	6,31	5,26
$U_1$ , А	8147	8146	0,01

Из представленных гистограмм гармонического состава токов и напряжений видно, что в обоих случаях на значимом уровне присутствуют гармоники, имеющие одинаковые порядковые номера, кроме гармоники 35, которая полностью исключается при использовании дополнительной таблицы углов переключения усовершенствованной системы управления. Величина гармоники 37 увеличилась в два раза, также увеличились величины гармоник 61, 71, 83. Величины гармоник 47, 49, 73, 95 уменьшились. Гармоники 59 практически полностью была исключена из спектра. Величина суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения снизилась на 5,26 %.

Данные, предоставленные в табл. 1 и 2, позволяют более детально оценить полученные результаты. Видно, что величины первых гармоник тока и напряжения в обоих случаях сохранились на том же уровне.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана усовершенствованная система управления АВ, включающая в себя блок ШИМ с несколькими таблицами углов переключения, выбор которых осуществляется в зависимости от заданного коэффициента модуляции. Введение дополнительных таблиц углов переключения обеспечивает устранение новых значимых высших гармоник тока, например в рассматриваемом случае 35-й гармоники.

2. На основании разработанной имитационной модели ПЧ с АВ, реализованной в среде Matlab/Simulink, проведен сравнительный анализ гармонического состава потребляемого АВ тока и питающего напряжения при работе исходной и усовершенствованной систем управления АВ. Результаты анализа показали, что при статических режимах работы электропривода с постоянной нагрузкой, когда коэффициент модуляции находится в диапазоне  $0,8 < \mu < 0,86$ , за счет перехода на дополнительную таблицу углов переключения обеспечивается уменьшение суммарного коэффициента гармонических составляющих на  $\delta K_U = 5,26$  % по напряжению и на  $\delta K_I = 9,95$  % по току, что является значительным результатом.

3. Выбор дополнительной гармоники для исключения должен зависеть от текущих параметров питающей сети, в частности от частотной характеристики, в которой могут присутствовать резонансы тока в определенной области частот. В данном случае необходимо устранять гармоники в области резонанса токов. Если резонанс токов не наблюдается, целесообразным является исключение гармоники с максимальной амплитудой.

4. Дополнительной задачей является обеспечение устойчивой работы системы управления АВ в динамических режимах, т.е. обработка алгоритма переключения таблиц в динамических режимах работы ЭП, что является темой отдельных исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Использование статического тиристорного компенсатора сверхмощной дуговой сталеплавильной печи для обеспечения устойчивости электроэнергетической системы и повышения надежности внутривзводового электроснабжения / А.А. Николаев, Г.П. Корнилов, В.С. Ивекеев, И.А. Ложкин, В.Е. Котышев // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2014. №1. С. 1-11.
2. Исследование воздействия активных выпрямителей большой мощности на питающую сеть / Т.Р. Храмшин, Г.П. Корнилов, А.А. Николаев, Р.Р. Храмшин, Д.С. Крубцов // Вестник Ивановского государственного технического университета. 2013. №1. С.80-83.
3. Маклаков А.С. Имитационное моделирование главного электропривода прокатной клетки толстолистового стана 5000 // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2014. №3. С. 16-25.
4. Храмшин Т.Р., Крубцов Д.С., Корнилов Г.П. Математическая модель активного выпрямителя в несимметричных режимах работы // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. 2014. №2. С.3-9.
5. Храмшин 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.
6. Крубцов Д.С., Храмшин Т.Р., Корнилов Г.П. Способы управления активными выпрямителями главных электроприводов прокатных станов // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. 2013. № 71. С. 3-6.
7. 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.
8. Z. Du, L. M. Tolbert and J. N. Chiasson. Harmonic elimination for multilevel inverter with programmed PWM method. in 39th IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Seattle, WA, vol. 4, pp. 2210-2215, (2004).
9. Chunhui Wu, Qirong Jiang and Chungpeng Zhang. An optimization method for three-level selective harmonic eliminated pulse width modulation (SHEPWM). in International Conference on Electrical Machines and Systems, Nanjing, vol. 2, pp. 1346-1350, (2005).
10. Радионов А.А., Маклаков А.С., Цзин Тао. Применение метода роя частиц для определения углов переключения в алгоритме широтно-импульсной модуляции с удалением выделенных гармоник // Электротехнические системы и комплексы. 2019. №1(42). С. 38-44.
11. Гасиринов В.Р., Радионов А.А., Маклаков А.С. Моделирование трехуровневого преобразователя частоты с фиксированной нейтралью при алгоритме ШИМ с удалением выделенных гармоник // Электротехнические систе-

мы и комплексы. 2017. № 1 (34). С. 4-9.

12. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Стандартинформ, 2014. 20 с.
13. Экспериментальные исследования электромагнитной совместимости современных электроприводов в системе электроснабжения металлургического предприятия / Николаев А.А., Корнилов Г.П., Храмшин Т.Р., Никифоров Г.В., Муталлапова Ф.Ф. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2016. Т. 14. №4. С. 96-105.

14. F. Endrejat and P. Pillay, "Resonance Overvoltages in Medium Voltage Multilevel Drive System," 2007 IEEE International Electric Machines & Drives Conference, Antalya, 2007, pp. 736-741.
15. K.M. Alawasa, Y. A. R. I. Mohamed and W. Xu, "Active Mitigation of Subsynchronous Interactions Between PWM Voltage-Source Converters and Power Networks" in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 29, no. 1, pp. 121-134, Jan. 2014.
16. J. Dong, L. Rixin, W. Fei, L. Fang, W. Shuo, and D. Boroyevich, "Study of conducted EMI reduction for three-phase active front-end rectifier", IEEE Trans. Power Electron., vol. 26, no. 12, pp. 3823-3831, Dec. 2011

Поступила в редакцию 24 сентября 2019 г.

INFORMATION IN ENGLISH

IMPROVEMENT OF POWER QUALITY IN SUPPLY NETWORK WITH ACTIVE RECTIFIERS BY SELECTING OPTIMAL SWITCHING ANGLE TABLES OF PWM

Alexander A. Nikolaev

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Automated Electric Drive and Mechatronics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: aa.nikolaev@magtu.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5014-4852>.

Ildar G. Gilemov

Postgraduate student, the Department of Automated Electric Drive and Mechatronics, Nosov Magnitogorsk State University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: gilemov.ig@outlook.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2481-3378>.

In this paper, an improved control system of the active rectifier of powerful three-level frequency converters implemented on the basis of selective harmonics elimination method with pulse-width modulation (PWM) was proposed. The new control system selects one of the switching angle tables depending on the modulation coefficient. Making use of additional tables of switching angles can improve power quality on the input bus-bars of the electric drive by eliminating the 35<sup>th</sup> harmonic. The parameters of the main electric drive of the cold rolling mill 2000 "Sheet Rolling Shop no. 11" of the "Magnitogorsk Iron & Steel Works" were used for the simulation model. On the basis of the developed simulation model of a frequency converter with an active rectifier, a comparative analysis of the conventional and the advanced control system is carried out taking into account their influence on the harmonic distortion (THD) of the voltage on 10 kV bus-bars in the internal power supply system, which showed a decrease in the average value of the voltage THD by more than 5 %.

**Keywords:** active rectifier, frequency converter, pulse-width modulation, power quality, active rectifiers control system.

REFERENCES

1. Nikolaev A.A., Kornilov G.P., Ivekhev V.S., Lozhkin I.A., Kotyshchev V.E. Using of the Static Var Compensator of the Ultra-High Power Electric Arc Furnace for Supporting of Electrical Power System Stability and Increasing Reliability of Factory Power Supply. *Mashinostroenie: setevoy ehlektromnyy nauchnyy zhurnal* [Russian Internet Journal of Industrial Engineering], 2014, no.1, pp. 1-11. (In Russian)
2. Khramshin T.R., Kornilov G.P., Nikolaev A.A., Khramshin R.R., Krutsov D.S. Research of Influence of High Power Active Rectifiers on Mains Supply. *Vestnik IGIEU* [Journal ISPU], 2013, no.1, pp. 80-83. (In Russian)
3. Maklakov A.S. Simulation of the Main Electric Drive of the Mill Rolling Stand. *Mashinostroenie: setevoy ehlektromnyy nauchnyy zhurnal* [Russian Internet Journal of Industrial Engineering], 2014, vol.2, no.3, pp. 16-25. (In Russian)
4. Khramshin T.R., Krutsov D.S., Kornilov G.P. Mathemati-

cal model of the active rectifier under unbalanced voltage operation conditions. *Elektrotehnika: setevoy ehlektromnyy nauchnyy zhurnal* [Russian Internet Journal of Electrical Engineering], 2014, vol. 1, no. 2, pp. 3-9. (In Russian)

5. Khramshin T.R., Krutsov D.S., Kornilov G.P. Evaluation of methods of PWM voltage active rectifiers at rolling mills. *Mashinostroenie: setevoy ehlektromnyy nauchnyy zhurnal* [Russian Internet Journal of Industrial Engineering], 2013, no. 2, pp. 48-52. (In Russian)
6. Krutsov D.S., Khramshin T.R., Kornilov G.P. Active rectifiers control methods of main drive of rolling mills. *Aktualnye problemy sovremennoy nauki, tekhniki i obrazovaniya* [Current problems of modern science, technology and education], 2013, no. 71, pp. 3-6. (In Russian)
7. Maklakov A.S., Maklakov E.A. EMC Analysis of 18- pulse connection circuit based on 3L-AFE with SHEPWM. *Elektrotehnika: setevoy ehlektromnyy nauchnyy zhurnal* [Russian Internet Journal of Industrial Engineering], 2016, vol.4, no.1, pp. 66-73. (In Russian)
8. Z. Du, L. M. Tolbert and J. N. Chiasson. Harmonic elimination for multilevel inverter with programmed PWM method. in 39th IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Seattle, WA, vol. 4, pp. 2210-2215, (2004).
9. Chunhui Wu, Qirong Jiang and Chungpeng Zhang. An optimization method for three-level selective harmonic eliminated pulse width modulation (SHEPWM). International Conference on Electrical Machines and Systems, Nanjing, vol. 2, pp. 1346-1350, (2005).
10. Radionov A.A., Maklakov A.S., Jing Tao. Using of Particle Swarm Optimization for Selective Harmonic Elimination Technique. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2019, no. 1(42), pp. 38-44. (In Russian).
11. Gasiyarov V.R., Radionov A.A., Maklakov A.S. Simulation of 3L NPC Converter with selective harmonic elimination PWM. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2017, no. 1 (34), pp. 4-9. (In Russian)

12. GOST 32144-2013. Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality limits in the public power supply systems. Moscow, Standartinform Publ., 2014, 20 p. (In Russian)
  13. Nikolaev A.A., Kornilov G.P., Khramshin T.R., Nikiforov G.V., Mutallapova F.F. Experimental study of electromagnetic compatibility of modern electric drives used in the power supply system of a metallurgical enterprise. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Bulletin of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2016, vol. 14, no. 4, pp. 96–105.
  14. F. Endrejat and P. Pillay, “Resonance Overvoltages in Medium Voltage Multilevel Drive System”, 2007 IEEE International Electric Machines & Drives Conference, Antalya, 2007, pp. 736–741.
  15. K.M. Alawasa, Y. A. R. I. Mohamed and W. Xu, “Active Mitigation of Subsynchronous Interactions Between PWM Voltage-Source Converters and Power Networks”, in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 29, no. 1, pp. 121–134, Jan. 2014.
  16. J. Dong, L. Rixin, W. Fei, L. Fang, W. Shuo and D. Boroyevich, “Study of conducted EMI reduction for three-phase active front-end rectifier”, IEEE Trans. Power Electron., vol. 26, no. 12, pp. 3823–3831, Dec. 2011.
- 

Николаев А.А., Гилемов И.Г. Улучшение качества напряжения в электрических сетях с активными выпрямителями за счет выбора оптимальных таблиц углов переключения ШИМ // Электротехнические системы и комплексы. 2019. № 4(45). С. 35-42. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-4\(45\)-35-42](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-4(45)-35-42)

Nikolaev A.A., Gilemov I.G. Improvement of Power Quality in Supply Network with Active Rectifiers by Selecting Optimal Switching Angle Tables of PWM. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2019, no. 4(45), pp. 35-42. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-4\(45\)-35-42](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-4(45)-35-42)

---

Воршевский А.А., Гришаков Е.С.

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

## ИМПУЛЬСНЫЕ ПОМЕХИ В СУДОВОМ КАБЕЛЕ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО РАЗРЯДА

Обеспечение электромагнитной совместимости (ЭМС) осложняется ростом энергетической насыщенности судов, широким применением цифровой техники в системах управления и обработки информации. Одним из видов испытаний на ЭМС всего изготовленного для установки на морские и речные суда судового электрооборудования (ЭО) является электростатический разряд (ЭСР). Амплитуда напряжения при контактном режиме ввода помехи 6 кВ и воздушном режиме 8 кВ. Эти требования нормируют Российский Морской Регистр Судоходства (РС) и Российский Речной Регистр (РРР). ЭСР может приводить к некорректной работе судового оборудования (системы навигации, видеонаблюдения, пожаротушения и т.д.), которое отвечает за безопасность движения судна и экипажа. Приведены результаты воздействия ЭСР на судовой кабель амплитудой 25 кВ. Ввод помехи осуществляется разработанным имитатором ЭСР-25000 на оплетку кабеля и металлическую трубку, которая имитирует металлические конструкции на судне. ЭСР в экран судовой кабеля приводит к распространению импульсного напряжения по экрану и появлению напряжения на внутренних жилах. Затухание помехи на дальнем конце кабеля через 50 м не более 10% от первоначального импульса напряжения. Результаты испытаний на воздействие ЭСР судовых систем после их установки на судно позволяют сделать вывод, что для обеспечения ЭМС недостаточно выполнять только существующие требования Российского морского регистра судоходства по устойчивости ЭО к ЭСР, которые в настоящее время подтверждаются испытаниями образцов ЭО в лаборатории. Актуальным является проведение исследований в области обеспечения ЭМС судового оборудования при ЭСР.

**Ключевые слова:** электростатический разряд, электромагнитная совместимость, судовой кабель, импульсное напряжение, датчик напряжения, пробой изоляции, помеха.

### ВВЕДЕНИЕ

Современное судно представляет собой сложную систему, включающую в себя многие технические средства с различными функциями и принципами действия. В электроэнергетических системах возникают электромагнитные помехи, в том числе и ЭСР, которые могут вызывать сбои в ЭО. Для судов характерно близкое расположение высококачественного ЭО, силового оборудования и кабельных трасс, по которым распространяются помехи. Требования и методы испытаний для промышленного и бытового оборудования устанавливаются межгосударственным стандартом ГОСТ 30804.4.2-2013 [1] (ИЕС 61000-4-2:2008).

Разряды статического электричества с тела человека на металлические объекты вызывают сбои в работе судового ЭО и могут привести к выходу его из строя. Кроме непосредственного воздействия на оборудование, возможны случаи ЭСР на информационные и силовые кабели. Амплитуда разряда может достигать 25 кВ в зависимости от условий накопления заряда. Российский Морской Регистр Судоходства и Российский Речной Регистр требуют проводить испытания оборудования, изготовленного для установки на морские и речные суда, на воздействие контактного разряда амплитудой 6 кВ и воздушного разряда 8 кВ [2]. По многим зарубежным источникам [3] уровень напряжения может значительно превышать установленные параметры в РС и РРР.

Учитывая специфику судового оборудования по укладке кабелей, а также ограниченное пространство, наибольший интерес представляет разряд в силовой кабель большой амплитуды. Наведенное напряжение от ЭСР может влиять через кабели на сигнальные цепи, цепи управления и питания ЭО [3]. Для изучения

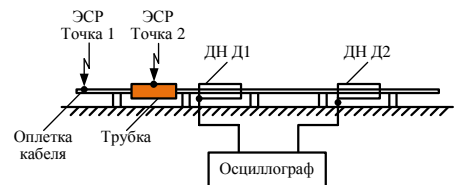
воздействия разряда амплитудой 25 кВ на судовой силовой кабель разработан и аттестован генератор электростатических разрядов ЭСР-25000, который может производить ЭСР до 30 кВ.

Для исследования эффектов при разряде на судовой кабель собрана установка, представленная на **рис. 1**.

Разряд производится в двух различных по характеру местах (точка 1 и точка 2) кабеля марки КМПВЭВ 7×2,5 мм<sup>2</sup> [ТУ16-705.169-80 «Кабели марки КМПВ»], изготовленного по ТУ16-705.169-80. Данный кабель имеет следующие параметры:

- диаметр жилы 2 мм;
- толщина ПЭ-изоляции 1 мм;
- толщина экрана 1,65 мм;
- относительная диэлектрическая проницаемость  $\epsilon_r=2,72$ ;
- относительная магнитная проницаемость  $\mu_r=1$ .

Точка 1 представляет собой часть кабеля со снятой изоляцией, и воздействие ЭСР производится непосредственно на оплетку кабеля. Точка 2 – это металлическая трубка длиной 300 мм, которая выступает в качестве имитации крепежной скобы или металлического хомута, который охватывает кабель. На кабеле установлены заранее откалиброванные датчики напряжения ДН Д1 и ДН Д2 [4].



**Рис. 1.** Схема установки для исследования воздействия ЭСР амплитудой 25 кВ на судовой кабель

Разряд амплитудой 25 кВ (рис. 2) в точке 1 имитирует распространение ЭСР по кабелю, например при пробое изоляции или кабеле без изоляции. Также этот случай соответствует разряду в жилы кабеля. Сигнал снимается с ДН Д1 и ДН Д2. Датчик Д1 устанавливается ближе к точке разряда, а датчик Д2 на другой конец кабеля. Расстояние от точки 1 до Д1 составляет 2380 мм, а до Д2 – 3650 мм.

На рис. 3 представлена осциллограмма, где производится ввод ЭСР амплитудой 25 кВ через металлическую трубку в точке 2. Расстояние от трубки до Д1 составляет 500 мм, до Д2 – 550 мм.

При таких напряжениях возможно образование предимпульсов около 10 кВ, с последующим импульсом до 30 кВ. Такие разряды чаще всего формируются при положительной полярности импульса [5, 6].

По представленной осциллограмме на рис. 3 видно, что фронт импульса находится в наносекундном диапазоне длительностей. Напряжение на дальнем датчике (Д2) на несколько киловольт выше, чем на Д1. Это явление возникает из-за отражения части волны при достижении точки, в которой волновое сопротивление отличается от сопротивления линии. В дальнейшем трубка устанавливается в центр кабеля, а датчики напряжения установлены на равном расстоянии от него (рис. 4). Полученные значения напряжения представлены на рис. 5.

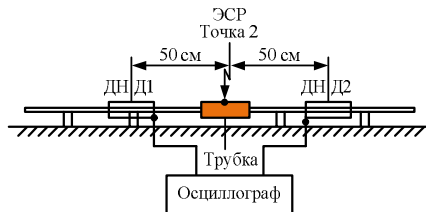
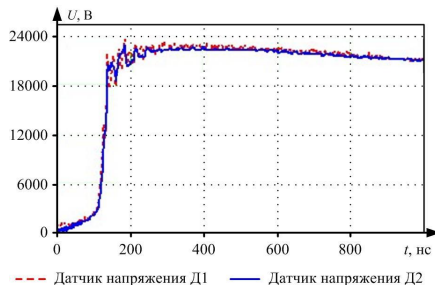


Рис. 4. Схема установки для исследования распространения ЭСР по судовому кабелю



--- Датчик напряжения Д1 — Датчик напряжения Д2

Рис. 5. Изменение напряжения во времени при воздействии ЭСР на судовую кабель через металлическую трубку (датчики расположены на равном расстоянии от металлической трубки)

Судовые кабели могут транзитом проходить через несколько палуб на большие расстояния. Для оценки уровня распространяющихся помех от ЭСР амплитудой 25 кВ использована схема, представленная на рис. 6.

Кабели 1, 2, 3 уложены в трассу длиной 50 м. Разряд подается в начало трассы на разные кабели на экран кабеля (точка 1) и через металлическую трубку (точка 2) шириной 50 см. Показания снимаются на другом конце с помощью двух откалиброванных датчиков и осциллографа. Прохождение помехи имитируется в различных начальных условиях.

Подача помехи осуществляется в кабель №1 через металлическую трубку и на экран. Показания снимаются на кабеле №1 (на который воздействует ЭСР). Кабели 2 и 3 соединены между собой на двух концах и заземлены на общую шину, имитируя тем самым корпус судна. Полученные результаты представлены на рис. 7 и 8.

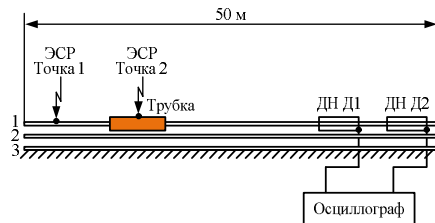
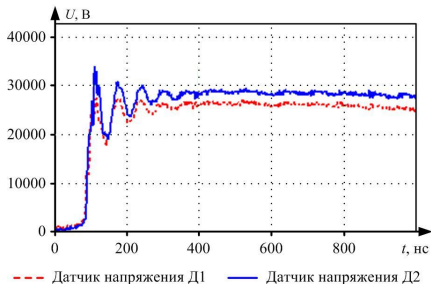
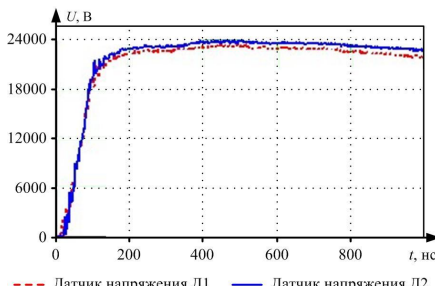


Рис. 6. Схема установки для исследования распространения ЭСР по судовому кабелю



--- Датчик напряжения Д1 — Датчик напряжения Д2

Рис. 2. Изменение напряжения во времени при воздействии ЭСР амплитудой 25 кВ на судовую кабель через оплетку



--- Датчик напряжения Д1 — Датчик напряжения Д2

Рис. 3. Изменение напряжения во времени при воздействии ЭСР на судовую кабель через металлическую трубку амплитудой 25 кВ

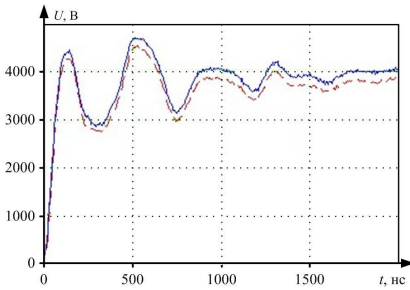


Рис. 7. Изменение напряжения во времени при воздействии ЭСР на экран судового кабеля №1 (кабели №2 и 3 заземлены на двух концах)

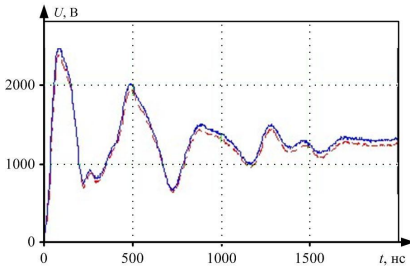


Рис. 8. Изменение напряжения во времени при воздействии ЭСР на судовой кабель №1 через металлическую трубку (кабели №2 и 3 заземлены на двух концах)

Прямой разряд в экран судового кабеля приводит к распространению импульсного напряжения по экрану и появлению напряжения на внутренних жилах. При подаче ЭСР на экран кабеля в среднем напряжение больше на 2000 В, чем при воздействии через металлическую трубку. Время нарастания импульса менее 100 нс, амплитуда импульса через 50 м при подаче на экран кабеля 4,5 кВ, при подаче через металлическую трубку 3 кВ. При воздействии ЭСР на кабель возникают наведенные напряжения в соседних кабелях, что может привести к сбоям и в работе оборудования, под-

ключенного к ним. Амплитуда помехи при подаче на экран кабеля составляет 2,5 кВ, при подаче через металлическую трубку 1,5 кВ. Помеха на конце кабеля через 50 м затухает не более чем на 10 % от начального импульса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Электростатический разряд может воздействовать не только непосредственно на электронное оборудование, но и через подключенные к нему внешние кабели. Разряд в экран кабеля приводит к возникновению импульсной помехи на экране и внутренних жилах кабеля амплитудой в тысячи вольт. При распространении вызванных ЭСР импульсов напряжения по кабелю длиной 50 м амплитуда напряжения меняется незначительно. В соседних кабелях также наблюдаются наведенные напряжения амплитудой в тысячи вольт. ЭСР в кабели является крайне опасным путем воздействия этого вида помех на электронное оборудование.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- ГОСТ 30804.4.2-2013 (ИЕС 61000-4-2:2008). Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к электростатическим разрядам. Требования и методы испытаний.
- Правила технического наблюдения за постройкой судов и изготовлением материалов и изделий для судов (Часть IV «Техническое наблюдение за изготовлением изделий» ИД № 2-020101-118) Российского морского регистра судоходства, 2019 г. СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2019 .
- Кечиев Л.Н., Баллок Н.В. Зарубежные военные стандарты в области ЭМС// под ред. Л.Н. Кечиева. М.: Грифон, 2014. 448 с.
- Воршевский А.А., Гальперин В.Е. Электромагнитная совместимость судовых технических средств / СПбГМТУ. СПб., 2006. 317 с.
- Воршевский А.А., Агафонов А.М., Гришаков Е.С. Измерения наносекундных импульсов, вызванных электростатическим разрядом // Энергетические и электротехнические системы: междунар. сб. науч. тр. Вып. 5 / под ред. С.И. Лукьянова, Е.Г. Нешпоренко. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2018. С. 121-129.
- Базелян Э.М., Ражанский И.М. Искровой разряд в воздухе. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1988. 165 с.

Поступила в редакцию 01 сентября 2019 г.

INFORMATION IN ENGLISH

IMPULSE NOISE IN THE SHIP CABLE CAUSED BY UNDER ELECTROSTATIC DISCHARGE

Alexander A. Worshevsky

D.Sc. (Engineering), Associate Professor, Professor, Head of Electrical Engineering and Ship Electrical Equipment Department, St. Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia. E-mail: grishakove@mail.ru, elemcom@smtu.ru.

Evgenii S. Grishakov

Post-graduate student, 2<sup>nd</sup> category Engineer, Electrical Engineering and Ship Electrical Equipment Department, St. Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia. E-mail: grishakove@mail.ru. ORCID: 0000-0002-2002-6377.

A modern vessel is a complex system that includes many technical means with different functions and operating principles. Electromagnetic interference occurs in electrical power systems, which can cause electrical equipment failures. Ships are

characterized by close proximity of highly sensitive equipment, power equipment and cable routes, which are subject to interference. Ensuring electromagnetic compatibility is complicated by the growth of energy saturation of ships, the

widespread use of digital technology in control systems and information processing. The paper demonstrates the results of electrostatic discharge for ship cable with the amplitude of 25 kV. The interference is simulated by the simulator ESR-25000 for a braided cable and a metal tube that simulates metal structures on the ship. ESR in the screen of the ship cable leads to the propagation of pulse voltage across the screen and the appearance of voltage on the internal veins. Attenuation of interference at the far end of the cable after 50 meters is not more than 10 % of the original voltage pulse.

**Keywords:** electrostatic discharge, electromagnetic compatibility, testing, marine cable, pulse voltage, sensor of voltage, breakdown of the insulation, noise.

REFERENCES

1. GOST 30804.4.2-2013 (IEC 61000-4-2:2008). Electromagnetic compatibility of technical equipment. Resistance to electrostatic discharge. Requirements and testing methods.
2. Pravila tehničkog nabljudenija za postrojkoj sudov i izgotovljeniem materialov i izdelij dlja sudov (Chast IV «Tehničkoe nabljudenie za izgotovljeniem izdelij» ND №2-020101-118) Rossijskogo morskogo registra sudohodstva, 2019 g. [Rules of technological control of vessel

building and production of materials and parts for ships (Part IV "Rules of technological control of part production" ND no. 2-020101-118) of the Russian register of shipping, 2019]. St. Petersburg, Russian register of shipping, 2019.

3. Kechiev L.N. Baljuk N.V. Zarubezhnye voennye standarty v oblasti JeMS [Foreign military standards in the field of electromagnetic compatibility] // Under the editorship of L.N. Kechiev. Moscow: Grifon, 2014. 448 p. (In Russian)
4. Worshevskii A.A., Galperin V.E. Jelektromagnitnaja sovmestimost sudovyh tehničkih sredstv [Electromagnetic compatibility of ship technical equipment]; SPbGMTU. St. Petersburg, 2006, 317 p. (In Russian)
5. Worshevskii A.A., Agafonov A.M., Grishakov E.S. Measuring of nanosecond pulses caused by an electrostatic discharge // Jenergeticheskie i jelektrotehničke sistemy [Power supply and electrical systems]: international collection of scientific papers. – Issue 5 / under the editorship of S.I. Lukyanov, E.G. Neshporenko. Magnitogorsk: Publishing center of Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2018, pp. 121-129. (In Russian)
6. Bazeljan Je.M., Razhanskij I.M. Iskrovoj razrjad v vozduhe [Spark discharge in the air]. Novosibirsk: Science. Siberian branch, 1988, 165 p. (In Russian)

---

Воршевский А.А., Гришаков Е.С. Импульсные помехи в судовом кабеле при воздействии электростатического разряда // Электротехнические системы и комплексы. 2019. № 4(45). С. 43-46. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-4\(45\)-43-46](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-4(45)-43-46)

Worshevsky A.A., Grishakov E.S. Impulse Noise in the Ship Cable Caused by Under Electrostatic Discharge. *Elektrotehničke sistemy i komplekxy* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2019, no. 4(45), pp. 43-46. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-4\(45\)-43-46](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-4(45)-43-46)

---

<sup>1</sup> Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН<sup>2</sup> Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

## ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН ФЕРРОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНО-АКУСТИЧЕСКИМ СПОСОБОМ

Предложены методики точного определения скорости поверхностных волн конструкционных материалов электромагнитно-акустическим способом. Методики подходят для образцов прямоугольной формы из ферромагнитных материалов, в частности для конструкционных сталей и сплавов. Показано, как скорости ультразвуковых волн в материале связаны с модулями упругости материала. Определение модулей упругости материала является важной задачей материаловедения. Наилучшим методом определения скорости поверхностных волн является метод электромагнитно-акустического преобразования, сочетающий в себе бесконтактность и быстродействие. В качестве датчиков использованы проволочные меандровые преобразователи, которые могут работать в двух режимах: совмещенный режим (один датчик генерирует волну и принимает ее отражение) и раздельный режим (один датчик генерирует волну, другой ее принимает). Проанализированы основные погрешности метода. Показано, что основная погрешность связана с определением временного интервала распространения волны. Это связано с трудностью получения точки отсчета, так как зондирующий импульс имеет затухающую форму. Предложена отстройка от зондирующего импульса при определении временного интервала времени распространения волны. Другая погрешность измерений связана с точностью определения базы меандровых преобразователей (расстояние между центрами), работающих в раздельном режиме. Получены простые формулы для расчета скорости поверхностной волны, а также базы меандровых преобразователей. Проверка методик проводилась на образце Армо-железа. Точность определения поверхностной волны Рэлея составила  $\pm 0,5\%$ . Показано, что применение современных цифровых измерителей временных интервалов позволит получать точность  $\pm 0,05\%$ . Полученные с указанной точностью значения скорости можно использовать для определения модулей упругости, а также в качестве самостоятельного информационного параметра оценки упругих свойств материала, например анизотропии листового проката.

**Ключевые слова:** поверхностные акустические волны, волны Рэлея, ультразвук, скорость ультразвука, модули упругости, анизотропия, электромагнитно-акустический способ, ферромагнитные материалы, точность измерений.

### ВВЕДЕНИЕ

Важной задачей металловедения является задача определения модулей упругости материала и их анизотропия. Прямое измерение этих параметров при механических испытаниях является достаточно трудоемкой задачей.

В последнее время все чаще для этих целей используют косвенные физические методы. Так хорошо себя зарекомендовали ультразвуковые (УЗ) методы оценки упругих свойств разных материалов [1-3]. Они основаны на простой корреляции упругих свойств и информационных параметров УЗ-методов и подходят как для металлов, так и для неметаллов [4]. Так, например, скорость продольной волны  $C_l$  связана с модулем Юнга  $E$  простым соотношением:

$$C_l = \sqrt{\frac{E}{\rho}},$$

где  $\rho$  – плотность материала, а скорость сдвиговой волны  $C_t$  связана с модулем сдвига  $G$ :

$$C_t = \sqrt{\frac{G}{\rho}}.$$

Более сложная зависимость для коэффициента Пуассона  $\nu$  [5]:

$$\nu = \frac{C_R - 0,87C_t}{1,12C_t - C_R},$$

где  $C_R$  – скорость волны Рэлея.

Среди ультразвуковых методов электромагнитно-акустический (ЭМА) способ генерации и приема ультразвука имеет определенные преимущества перед методами, использующими пьезоэлементы, благодаря бесконтактности и быстродействию [6]. Основными информационными параметрами ЭМА-способа являются амплитуда принятого сигнала и скорость распространения акустических волн. Нестабильность амплитуды принятого сигнала, несмотря на условную «бесконтактность», по сравнению со способом пьезоэлементов, не позволяет проводить точные измерения параметров материалов. На амплитуду влияют технологические факторы измерений, такие как температура образца, зазор между образцом и датчиком, а также параметры структуры, внешние и внутренние напряжения, полученные в процессе производства и эксплуатации [7, 8]. При измерении скорости ультразвуковых волн уровень амплитуды принятого сигнала не сказывается настолько сильно на результаты измерений, и точность измерения при современной цифровой обработке может быть достаточно высокой. Измерение



скорости продольных и поперечных волн и ЭМА-методом и методом пьезоэлементов, основанное на прозвучивании пластины известной толщины, описано достаточно подробно в справочнике [9]. Рассмотрим возможность измерения ЭМА-способом скорости поверхностных акустических волн (ПАВ) Рэлея.

ОПИСАНИЕ МЕТОДИКИ

Для генерации и приема поверхностных волн удобно использовать меандровые преобразователи [10-12]. Они могут быть выполнены как в проволочном, так и в пленочном исполнении. При наличии подмагничивающего поля такой преобразователь может генерировать поверхностную волну влево и вправо от себя. В зависимости от ориентации подмагничивающего поля и толщины образца можно генерировать волны разных типов: волны Рэлея, Лэмба, SH-волны и др. Импульсная методика ЭМА преобразования предполагает генерацию и прием волновых импульсов с высокочастотным заполнением, причем прием может вестись этим же самым меандровым преобразователем при отражении от края образца или вторым приемным меандром.

Простым вариантом образца из заданного материала для определения скорости УЗ-волн является прямоугольный параллелепипед. При генерации поверхностной волны Рэлея его толщина должна быть больше трех длин волн. Так, при генерации волны Рэлея частотой 3 МГц длина волны в сталях составляет около 1 мм, и толщина образца должна быть больше 3 мм, что вполне реально.

При определении скорости ПАВ одним меандровым преобразователем (рис. 1) имеем осциллограмму, представленную на рис. 2. Такой преобразователь работает в совмещенном режиме, то есть выполняет функции и генератора, и приемника.

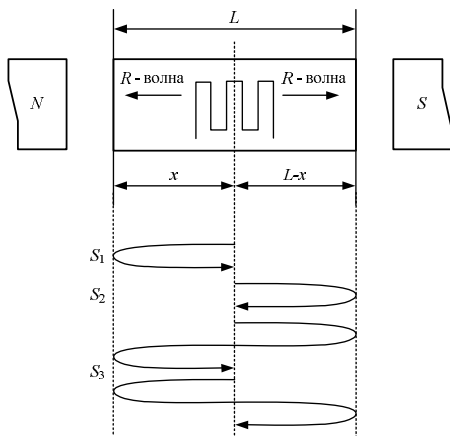


Рис. 1. ЭМА-преобразователь ПАВ в совмещенном режиме

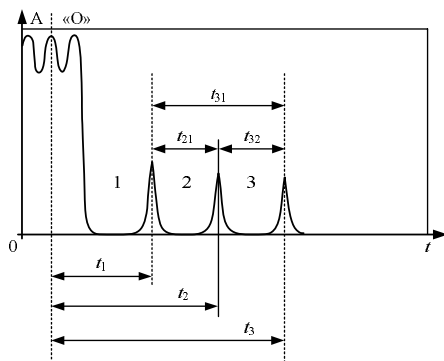


Рис. 2. Осциллограммы совмещенного датчика

На рисунке: 0 – означает зондирующий импульс; 1 – импульс, отраженный от левой грани, его путь  $S_1$ ; 2 – импульс, отраженный от правой грани, его путь  $S_2$ ; 3 – импульс, отраженный от двух граней, его путь  $S_3$ .

АНАЛИЗ ОСЦИЛЛОГРАММ

Понятно, что пути  $S_3$  влево и вправо одинаковые. Каждый из этих импульсов имеет четко выраженную вершину, по которой можно определить момент прихода импульса. Проблема заключается в том, какую точку осциллограммы взять за начало отсчета: начало зондирующего импульса (точка «О»), его конец или середину. Эта проблема актуальна и при измерении скорости продольных и поперечных волн. Эксперименты показали, что эта точка лежит где-то между началом зондирующего импульса и его серединой. Это происходит потому, что токовый зондирующий импульс имеет неправильную затухающую форму вследствие особенности используемого генератора ударного возбуждения. При этом она еще зависит от индуктивности системы «датчик-образец». Как избавиться от этого недостатка?

Если при полной длине образца  $L$  обозначить за  $x$  расстояние от левой грани до центра датчика (см. рис. 1), то

$$S_1 = 2x = C_R t_1;$$

$$S_2 = 2(L - x) = C_R t_2;$$

$$S_3 = 2L = C_R t_3.$$

Из этих уравнений получаем:

$$\Delta S_{21} = S_2 - S_1 = 2L - 4x = C_R t_{21}; \tag{1}$$

$$\Delta S_{31} = S_3 - S_1 = 2L - 2x = C_R t_{31}; \tag{2}$$

$$\Delta S_{32} = S_3 - S_2 = 2x = C_R t_{32}. \tag{3}$$

Таким образом, имеем простые соотношения:

$$t_1 = t_{32}, \quad t_2 = t_{31}. \tag{4}$$

Сложив (2) и (3), с учетом (4) получаем простые формулы для скорости рэлеевской волны:

$$C_R = \frac{2L}{t_{31} + t_{32}} = \frac{2L}{t_{21} + t_{22}}. \quad (5)$$

Как видно, эта формула не зависит от зондирующего импульса, и точность измерений зависит от точности измерения длины образца и временных расстояний между принятыми импульсами.

При использовании двух меандровых преобразователей, работающих в раздельном режиме (рис. 3), где один преобразователь генерирует УЗ-волны, а второй принимает, осциллограмма работы представлена на рис. 4.

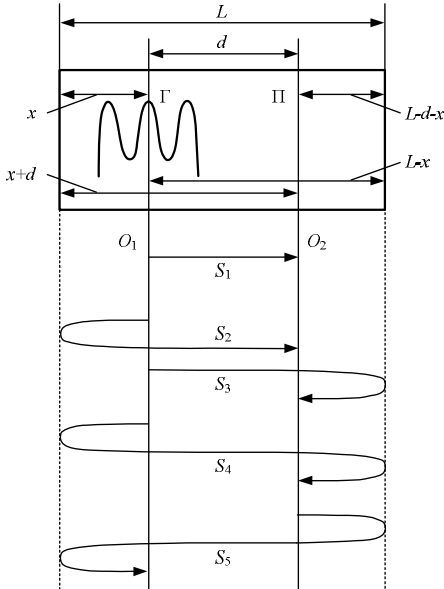


Рис. 3. ЭМА-преобразователь ПАВ в раздельном режиме

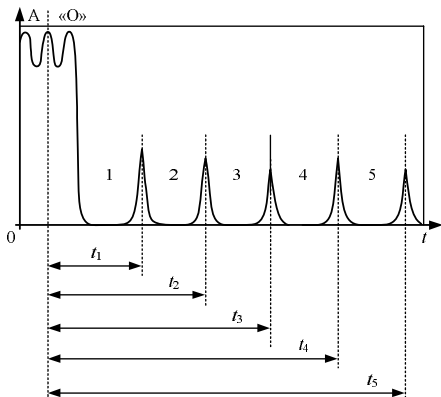


Рис. 4. Осциллограммы раздельного датчика

Пусть расстояние генераторного (левого) датчика до левой грани –  $x$  (см. рис. 3), а расстояние между центрами датчиков –  $d$ , тогда остальные расстояния понятны из рисунка. Также из рис. 3, 4 понятны пути прохождения первых пяти характерных принятых импульсов:

$$\begin{aligned} S_1 &= d = C_R t_1; \\ S_2 &= d + 2x = C_R t_2; \\ S_3 &= 2L - 2x = C_R t_3; \\ S_4 &= 2L - d = C_R t_4; \\ S_5 &= 2L + d = C_R t_5. \end{aligned}$$

Произведем математические преобразования, аналогичные (1-3), и получим простую формулу для определения скорости:

$$C_R = \frac{2L}{t_{31}}. \quad (6)$$

Заметим, что при известной скорости  $C_R$  можно получить формулу для точного определения базы такого преобразователя, расстояния между центрами меандровых преобразователей:

$$d = \frac{C_R t_{54}}{2}. \quad (7)$$

Часто эти датчики жестко фиксируются в единый преобразователь в электромагните, и измерить точно их базу бывает нелегко.

Нужно отметить также, что отстроиться от зондирующего импульса можно на цилиндрическом образце. В этом случае все времена между принятыми импульсами будут одинаковыми, и формула для определения скорости Рэлеяской волны достаточно простая:

$$C_R = \frac{2\pi R}{t}, \quad (8)$$

где  $R$  – радиус цилиндра;  $t$  – время между импульсами.

Но здесь надо заметить, что точные значения скорости ПАВ для плоскости и цилиндра совпадают только при большом диаметре цилиндра, то есть при большом соотношении диаметра цилиндра к длине поверхностной волны.

Оценим точность измерений по полученным формулам (5) и (6). Она будет определяться точностью измерения длины образца  $L$  и точностью измерения временных интервалов между принятыми импульсами.

Для оценки был взят образец Армко-железа в виде прямоугольного параллелепипеда длиной 80 мм и поперечными размерами 40 × 40 мм. Точность измерения длины микрометром составляет примерно 0,006 %. Таким образом, все определяет точность определения временных интервалов. При использовании цифрового измерителя DSO 2100 погрешность измерения в данном диапазоне составляет ±0,25 %. Полученная по методике одного преобразователя скорость волны Рэлея получилась:

$$C_R = (3038 \pm 15) \text{ м/с} (\pm 0,5 \%).$$

Современные цифровые приборы измеряют временные интервалы как минимум на порядок точнее (до  $\pm 0,02\%$ ), что позволит измерять скорость поверхностной волны с точностью  $\pm 0,05\%$ . Это дает возможность повысить достоверность контроля процессов с небольшим изменением скорости поверхностных волн, как, например, анизотропия упругих свойств листового проката [13] или остаточные напряжения в рельсах [14].

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Предложенные методики позволяют повысить точность измерения скорости поверхностных волн. Отработанные на рзеевских волнах, они подойдут и для других типов поверхностных волн, например волн Лэмба или SH-волн в ферромагнитных материалах. В первую очередь это нужно для дефектоскопии и структуроскопии изделий из сталей и сплавов, а также листового проката.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Золоторевский В.С. Механические свойства металлов. М.: Металлургия, 1983. 352 с.
2. Муравьев В.В. Скорость звука и структура сталей и сплавов. Новосибирск: Наука, 1996. 184 с.
3. Dixon S., Edwards C. and Palmer S.B. Texture measurements of metal sheets using wideband electromagnetic acoustic transducers. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2002, vol. 35, no. 8, pp. 816-824.
4. Потапов А.И., Махов В.Е. Физические основы контроля упругих характеристик анизотропных композиционных материалов ультразвуковым методом // *Дефектоскопия*. 2017. № 11. С. 33-49.
5. Викторов И. А. Звуковые поверхностные волны в твер-

- дых телах. М.: Наука, 1981. 288 с.
6. Комаров В.А. Квазистационарное электромагнитно-акустическое преобразование в металлах. Свердловск: УИЦ АН СССР, 1986. 235 с.
7. Учет температуры и приложенных напряжений при неразрушающем контроле методом ЭМАП поверхностных волн / С.Э. Бабкин, В.В. Величко, М.А. Боровкова, Р.С. Ильясов, О.Н. Вострокнутова // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2006. №3(15). С. 46-49.
8. Ильясов Р.С., Бабкин С.Э., Вострокнутова О.Н. Влияние одноосных и внутренних напряжений на электромагнитно-акустическое преобразование в ферромагнетиках // *Вестник МГТУ им. Г.И. Носова*. 2012. № 3 (39). С. 33-37.
9. Неразрушающий контроль и диагностика: справочник / под ред. В.В. Клюева. М.: Машиностроение, 2003. 656 с.
10. Thompson R.B. Model for the Electromagnetic Generation and Detection of Rayleigh and Lamb Waves. *IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics*, 1973, vol. 20, no. 4, pp. 340-346.
11. Бабкин С.Э. Определение коэффициента Пуассона ферромагнитных материалов ЭМА-способом // *Дефектоскопия*. 2015. № 5. С. 51-55.
12. Murayama R. and Mizutani K. Conventional electromagnetic acoustic transducer development for optimum Lamb wave modes. *Ultrasonics*, 2002, vol. 40, no. 1-8, pp. 491-495.
13. Муравьев В.В., Муравьева О.В., Волкова Л.В. Влияние анизотропии механических свойств тонколистового стального проката на информативные параметры волн Лэмба // *Сталь*. 2016. № 10. С. 75-79.
14. Муравьев В.В., Тапков К.А., Леньков С.В. К вопросу контроля остаточных напряжений в дифференцированно-термоупрочненных рельсах // *Дефектоскопия*. 2018. № 10. С. 3-9.

Поступила в редакцию 15 января 2019 г.

**INFORMATION IN ENGLISH**

**MEASUREMENT OF SURFACE WAVES VELOCITY OF FERROMAGNETIC MATERIALS BY THE ELECTROMAGNETIC-ACOUSTIC METHOD**

Sergey E. Babkin

Ph.D. (Physics and Mathematics), Research worker, the Laboratory of electromagnetic phenomena, Udmurt Federal Research Center of Ural Branch of RAS, Izhevsk, Russia.

Marina Yu. Lebedeva

Ph.D. (Physics and Mathematics), Research worker, the Laboratory of electromagnetic phenomena, Udmurt Federal Research Center of Ural Branch of RAS, Izhevsk, Russia.

Yuriy I. Savchenko

Ph.D. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Head of the Department of Physics, Institute of Natural Science and Standardization, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: sav@magtu.ru.

Olga N. Vostroknutova

Assistant Professor, the Department of physics, Institute of Natural Science and Standardization Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Methods for the exact determination of the surface waves velocity by the electromagnetic-acoustic method are proposed. The method is suitable for rectangular samples of ferromagnetic materials, in particular for structural steels. The velocities of ultrasonic waves in the material are shown to be related to the elastic moduli of the material. The determination of the elastic modulus values of the material is an important materials science problem. The best method for the determination of the speed of surface waves is that of electromagnetic-acoustic conversion,

which combines both non-contact measurement and quick operation. Wire meander transducers are used as sensors, which can operate in two modes: a combined mode (one sensor generates a wave and receives its reflection) and a separate mode (one sensor generates a wave while the other one receives it). The main inaccuracies of the method have been analyzed. The main inaccuracy has been shown to be associated with the determination of the time interval of the wave propagation. This is due to the difficulty of obtaining the reference point since the

probe pulse has a damped shape. A detuning from the probe pulse in determining the time interval of the wave propagation has been proposed. Another measurement inaccuracy is related to the accuracy of determining the base of the meander transducers (the distance between the centers) operating in separate mode. Simple formulas for calculating the surface wave velocity and the base of the meander transducers have been obtained. Technique testing was carried out using the sample of Armo iron. The accuracy of determining the surface Rayleigh wave was + 0.5 %. It has been shown that the use of modern digital detectors of time interval will allow one to obtain the accuracy of + 0.05 %. The velocity values obtained with the specified accuracy can be used to determine the elastic moduli as well as to assess the elastic properties of the material, for example, sheet metal anisotropy as an independent information parameter.

**Keywords:** surface acoustic waves, Rayleigh waves, ultrasound, ultrasonic velocity, elastic moduli, anisotropy, electromagnetic-acoustic method, ferromagnetic materials, accuracy of measurements.

REFERENCES

1. Zolotarevskij V.S. *Mekhanicheskie svojstva metallov* [Mechanical properties of metals]. Moscow, Metallurgy Publ., 1983. 352 p. (In Russian)
2. Muraviev V.V. *Skorost zvuka i struktura stalej i splavov* [The speed of sound and the structure of steel and alloys]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1996. 184 p. (In Russian)
3. Dixon S., Edwards C. and Palmer S.B. Texture measurements of metal sheets using wideband electromagnetic acoustic transducers. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2002, vol. 35, no. 8, pp. 816-824.
4. Potapov A.I., Makhov V.E. Physical basics of evaluating elastic characteristics of anisotropic composites by the ultrasonic method. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2017, vol. 53, no. 11, pp. 785-799.
5. Viktorov I.A. *Zvukovye poverkhnostnye volny v tverdyh telakh* [Sound surface waves in solids]. Moscow, Nauka Publ., 1981. 288 p. (In Russian)
6. Komarov V.A. *Kvazistatsionarnoe elektromagnitno-*

- akusticheskoe preobrazovanie v metallah* [Quasistationary electromagnetic acoustic conversion in metals]. Sverdlovsk, USC of the USSR Academy of Sciences Publ., 1986. 235 p. (In Russian)
7. Babkin S.E., Velichko V.V., Borovkova M.A., Ilyasov R.S., Vostroknutova O.N. Consideration of temperature and applied stresses with non-destructive testing by surface wave EMAT method. *Vestnik Magnitorskogo gosudarstvennogo universiteta im. G.I. Nosova* [Bulletin of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2006, no. 3 (15), pp. 46-49. (In Russian)
8. Ilyasov R.S., Babkin S.E., Vostroknutova O.N. Influence of uniaxial and internal stresses on the electromagnetic-acoustic conversion in ferromagnets. *Vestnik Magnitorskogo gosudarstvennogo universiteta im. G.I. Nosova* [Bulletin of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2012, no. 3(39), pp. 33-37. (In Russian)
9. *Nerazrushayushchij kontrol i diagnostika: spravochnik pod red. V.V. Klyueva* [Non-destructive testing and diagnostics: reference book, under the editorship of V.V. Klyuev]. Moscow, Machine building Publ., 2003. 656 p. (In Russian)
10. Thompson R.B. Model for the Electromagnetic Generation and Detection of Rayleigh and Lamb Waves. *IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics*, 1973, vol. 20, no. 4, pp. 340-346.
11. Babkin S.E. The determination of the Poisson ratio for ferromagnetic materials using the EMA method. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2015, vol. 51, no. 5, pp. 303-307.
12. Murayama R. and Mizutani K. Conventional electromagnetic acoustic transducer development for optimum Lamb wave modes. *Ultrasonics*, 2002, vol. 40, no. 1-8, pp. 491-495.
13. Muraviev V.V., Muravieva O.V., Volkova L.V. Influence of the mechanical anisotropy of thin steel sheets on the parameters of Lamb waves. *Steel in Translation*, 2016, vol. 46, no. 10, pp. 752-756.
14. Muraviev V.V., Tapkov K.A., Lenkov S.V. On the Question of Monitoring Residual Stresses in Selectively Heat-Strengthened Rails. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2018, vol. 54, no. 10, pp. 675-681.

Измерение скорости поверхностных волн ферромагнитных материалов электромагнитно-акустическим способом / С.Э. Бабкин, М.Ю. Лебедева, Ю.И. Савченко, О.Н. Вострокнутава // *Электротехнические системы и комплексы*. 2019. № 4(45). С. 47-51. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-4\(45\)-47-51](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-4(45)-47-51)

Babkin S.E., Lebedeva M.Yu., Savchenko Yu.I., Vostroknutova O.N. Measurement of Surface Waves Velocity of Ferromagnetic Materials by the Electromagnetic-Acoustic Method. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2019, no. 4(45), pp. 47-51. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-4\(45\)-47-51](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-4(45)-47-51)

## ИНФОРМАЦИОННОЕ, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 004.45

[https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-4\(45\)-52-57](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-4(45)-52-57)Сидоренко Н.С.<sup>1,2</sup>, Логунова О.С.<sup>2</sup>, Тяжельникова Л.Ю.<sup>1</sup>, Аркулис Н.В.<sup>2,3</sup><sup>1</sup> ИТЦ «Аусферр», г. Магнитогорск<sup>2</sup> Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова<sup>3</sup> АО «Магнитогорский ГИПРОМЕЗ»ИНФОРМАЦИОННЫЕ ХРАНИЛИЩА ПРЕДПРИЯТИЙ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ:  
ТРАНСФОРМАЦИЯ СТРУКТУРЫ

Целью исследования является повышение эффективности функционирования Хранилища технологических данных в системе управления многостадийным металлургическим производством с последовательной выязкой по иерархическим уровням и интеграцией в единую систему сбора и обработки информации. В ходе исследования выполнен анализ количества записей в Хранилище технологических данных, анализ предпосылок трансформации структуры Хранилища технологических данных для крупного металлургического предприятия с полным циклом и разработана концепция трансформации структуры хранилища технологических данных, включающая определение основной сущности: основная единица продукции, переходящая по заданным траекториями обработки; принцип расщепления основной единицы продукции на элементы при прохождении траектории обработки по металлургическим переделам; определение основных траекторий продвижения единицы продукции и ее элементов по подразделениям предприятия (цехам); наращивание информационного потока в реальном времени при продвижении единицы продукции и ее элементов по выбранной траектории. Исследование проведено в 2017-2019 гг. для условий ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» при участии Исследовательско-технологического центра «Аусферр». При проведении исследования применялся метод концептуального моделирования для анализа материальных и информационных потоков. Разработанная концепция построения Хранилища технологических данных на основе платформы Oracle DataBase 12c обеспечивает введение основной единицы продукции и ее элементов, переходящих по заданным траекториями обработки с наращиванием информационного потока в реальном времени. Новая концепция построения Хранилища технологических данных позволила повысить эффективность доступа и извлечения накопленной информации для проведения аналитической работы с выборками из массивов большой размерности.

**Ключевые слова:** хранилище технологических данных, металлургическое предприятие, базы данных, системы управления базами данных, информационные системы, базовая единица продукции, элементы единицы продукции.

## ВВЕДЕНИЕ

Одним из приоритетных направлений научно-технологического развития Российской Федерации в 2019 г. определен переход к передовым цифровым, интеллектуальным производственным технологиям, роботизированным системам, новым материалам и способам конструирования, создание систем обработки больших объемов данных, машинного обучения и искусственного интеллекта. Развитие новых информационных технологий сбора, хранения, передачи и обработки информации позволяют в полной мере реализовать указанное приоритетное направление. Первые зачатки информационных хранилищ крупных производственных предприятий закладывались более 20 лет назад и в их основу заложены аппаратные и программные платформы, соответствующие своему времени [1, 2]. Бурное развитие новых технологических процессов в настоящее время привело к противоречию между вызовами многостадийности производства и разрозненными информационными системами, затрудняющими процесс построения информационной структуры для всего комплекса переделов при получении готовой продукции.

Анализ теоретических и практических разработок в области построения и извлечения данных из хранилищ показал, что наибольшее количество исследований посвящено решению проблем, связанных с:

– построением интеграционного слоя для обработки информации и принятия решений о синтезе новых производственных и технологических процессов с использованием распределенных баз данных [3-6];

– организацией эффективного доступа к данным на основе аналитических запросов к хранилищу для получения и совместного использования релевантной информации внутренними и внешними партнерами [7-10];

– разработкой методов и методик, ориентированных на принятие решений с интегрированными данными с учетом истории технологических процессов и производств, для большого количества записей [11-15].

Указанные проблемы остаются актуальными и для современных крупных металлургических предприятий.

Крупные металлургические предприятия Российской Федерации, такие как ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат», ПАО «Северсталь» и др., имеют полный цикл производства готовой продукции. Этот цикл охватывает основные производственные процессы: доменное производство, выплавка стали в кислородных конвертерах и электродуговых сталеплавильных печах, внепечную обработку стали, непрерывную разливку стали, нагрев заготовок и обработку металлов давлением. Оценка количества информации за 18 месяцев, сопровождающих производство по основным переделам металлургического производства, показала результаты, приведенные на **рис. 1**. Общее количество записей по всем переделам составляет 116 млн строк объемом 1,09 эксабайт.

На рис. 1 и 2 введены обозначения: ВС – выплавка стали; ВПО – внепечная обработка стали; НРС – непрерывная разливка стали.

Оценка размерности информации в хранилище данных показала, что массив может быть отнесен к категории Big Data.

В настоящее время технологиям Big Data посвящено множество исследований как российских, так и зарубежных авторов. Среди них можно отметить:

- анализ тенденции развития рынка программного обеспечения для Big Data [16-18];
- расширение областей использования технологий Big Data от общественных до индустриальных [19-22].

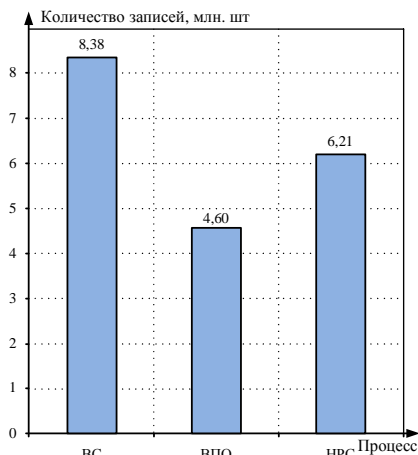


Рис. 1. Результаты количественного анализа информации, сопровождающей продукцию по конвертерному производству

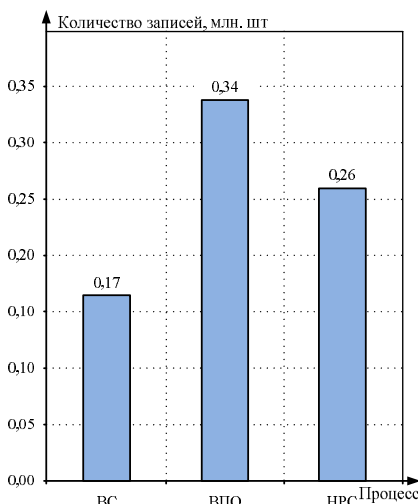


Рис. 2. Результаты количественного анализа информации, сопровождающей продукцию по электросталеплавильному производству

В настоящее время ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (ПАО «ММК») – это предприятие с развитой инфраструктурой систем автоматизации, включающей все уровни: автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУ ТП) агрегатов, полнофункциональный уровень управления производственными процессами (manufacturing execution system – MES) в подразделениях, система управления ресурсами компании (Enterprise Resource Planning – ERP) на корпоративном уровне. Каждый цех предприятия оснащен отдельной MES. Независимость MES по подразделениям привело к существованию разнородных и разноплановых MES. Не все существующие системы современны в плане интегрируемости с другими корпоративными системами или смежными MES. В корпоративных информационных системах металлургического предприятия развернуты независимые базы данных, и пользователи аналитических отделов тратят сотни часов рабочего времени на поиск, сбор и сопоставление релевантной информации.

Консолидирование разрозненных MES привело к интеграции данных в единую информационную систему с использованием Хранилищ технологических данных (ХТД) и анализа данных. Технология интеграции данных предназначена для эффективной консолидации сведений из нескольких разнотипных источников, при этом исходные данные остаются под контролем систем-источников и извлекаются по требованию потребителя для интегрированного доступа. В свою очередь, аналитики с применением методов, методик и алгоритмов оперируют с консолидированными данными, извлекая информацию, соответствующую запросам пользователя.

На основе результатов проведенного информационно-теоретического анализа выявлены:

- противоречие, возникающее между новыми структурами больших массивов данных и устаревшими программно-аппаратными комплексами, неспособными эффективно реализовывать информационные процессы для оперативного использования в автоматизированных системах управления технологическими процессами для крупных предприятий;
- основные проблемы построения интеграционного слоя MES для обработки больших массивов данных, объем которых для крупных предприятий достигает сотни эксабайт и для которых характерна генетическая (наследственная) траектория формирования значений;
- наличие современных теоретических и технических предпосылок, которые определяют необходимость трансформации структуры хранилищ данных для информационных систем крупных предприятий.

ПРЕДПОСЫЛКИ ТРАНСФОРМАЦИИ СТРУКТУРЫ ХРАНИЛИЩА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ДАННЫХ ДЛЯ КРУПНОГО МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

До настоящего времени, несмотря на развитие теории и практики построения информационных хранилищ данных, остается проблема извлечения полной и достоверной информации о состоянии полуфабриката по всей длине технологической цепочки многостадийного производства. Решение этой проблемы требует создания интегрированного информационного пространства предприятия.

Основа такой системы была реализована в 2001 г. при создании первого хранилища технологических данных под управлением СУБД Sybase ASA 16. В ходе эксплуатации построенного хранилища выявлены недостатки, снижающие эффективность работы системы:

- существенные временные затраты при формировании отчетных документов;
- отсутствие полного списка технологических параметров, которые могут быть зафиксированы в хранилище и необходимы для анализа текущего состояния оборудования и полуфабриката на технологической линии.

В 2018 г. принято решение о замене платформы Sybase ASA 16 и репликация хранилища данных на платформу Oracle 12c. Выбор новой платформы определен ее преимуществами:

- представлена поддержка механизмов хранения и обработки больших массивов структурированных данных объемом до 100 терабайт;
- допускается достаточно большое количество пользователей (около 250 пользователей системы) с параллельным выполнением различных функциональных задач, таких как: контроль выполнения технологии, контроль выполнения качественных показателей, анализ технологии производства статистическими методами SPC, анализ измерительных систем методом MSA, формирование сквозных отчетов с учетом многостадийного производства, контроль выполнения заказов;
- сохранение высокой производительности, выполнения транзакций независимо от количества пользователей и времени работы системы;
- высокая отказоустойчивость, не приводящая к остановке работы с данными хранилища.

Расширенные возможности выбранной технологической платформы Oracle 12c позволили выполнить усовершенствование структуры хранения данных. Фрагмент схемы хранилища технологических данных, построенного на СУБД Sybase ASA, приведен на рис. 3.

Основным недостатком ранее использованной структуры хранилища технологических данных является отсутствие горизонтальных информационных потоков при переходе продукции между переделами.

В связи с этим до настоящего времени не рассматривается возможность установления причин получения продукции пониженного качества с учетом технологических особенностей предыдущих переделов и качества загружаемого сырья.

Таким образом, изменение программной платформы для реализации хранилища технологических данных многостадийного металлургического производства позволяет перейти к новым эффективным способам хранения больших данных, реализации алгоритмов для быстрого извлечения данных и организации горизонтальных информационных взаимосвязей для последующей полноценной оценки причин получения продукции пониженного качества.

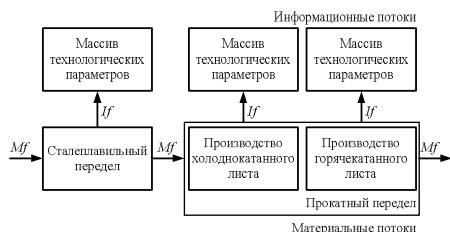


Рис. 3. Фрагмент схемы хранилища технологических данных, построенного на СУБД Sybase ASA:

$M_f$  – материальные потоки;  $I_f$  – информационные потоки

КОНЦЕПЦИЯ ТРАНСФОРМАЦИИ СТРУКТУРЫ ХРАНИЛИЩА ДАННЫХ

Трансформация структуры хранилища технологических данных на платформе Oracle 12c выполнена на следующих концепциях:

- 1) определение основной сущности: основная единица продукции, переходящая по заданным траекториям обработки;
- 2) разделение основной единицы продукции на элементы при прохождении траектории обработки по металлургическим переделам;
- 3) определение основных траекторий продвижения единицы продукции и ее элементов по подразделениям предприятия (цехам);
- 4) наращивание информационного потока в реальном времени при продвижении единицы продукции и ее элементов по выбранной траектории.

Фрагмент обобщенной схемы продвижения единицы продукции и ее элементов по подразделениям ПАО «ММК» приведен на рис. 4.

На рис. 4 введены обозначения: Агрегат – один из металлургических агрегатов, характерных для передела А; БЕП – базовая единица продукции; ЭБЕП – элемент базовой единицы продукции.

Если принято, что Агрегат  $A_{1i}$  – кислородный конвертер, Агрегат  $A_{2i}$  – агрегат выпечной обработки стали и Агрегат  $A_{3i}$  – машина непрерывного литья заготовок, то получим схему продвижения жидкой стали (БЕП( $A_{11}$ )), полученной в конвертере, до получения непрерывнолитых заготовок (БЕП( $A_{11}, A_{21}, A_{31}$ ) = {ЭБЕП( $A_{11}, A_{21}, A_{31}$ ),  $i$ }), порезанных на мерные длины и переходящих в следующие переделы обработки (Передел Б, Передел В).

В структуре одного из крупнейших металлургического предприятия ПАО «ММК» в основную производственную цепочку включены: два сталеплавильных цеха, четыре горячекатаных цеха и группа холоднокатанных цехов с десятками агрегатов в каждом из них.

Исходя из условий многостадийности и многовариантности траекторий производства готовой продукции, при создании полного информационного сопровождения потребовалось консолидировать все действующие MES и для полного анализа данных выполнить интеграцию с ERP-системой. Схема консолидированного хранилища технологических данных, построенного на СУБД Oracle 12c, приведена на рис. 5.

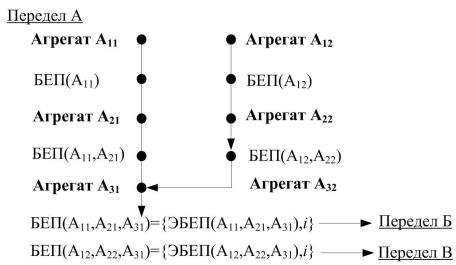


Рис. 4. Траектории продвижения единицы продукции по основным переделам производства

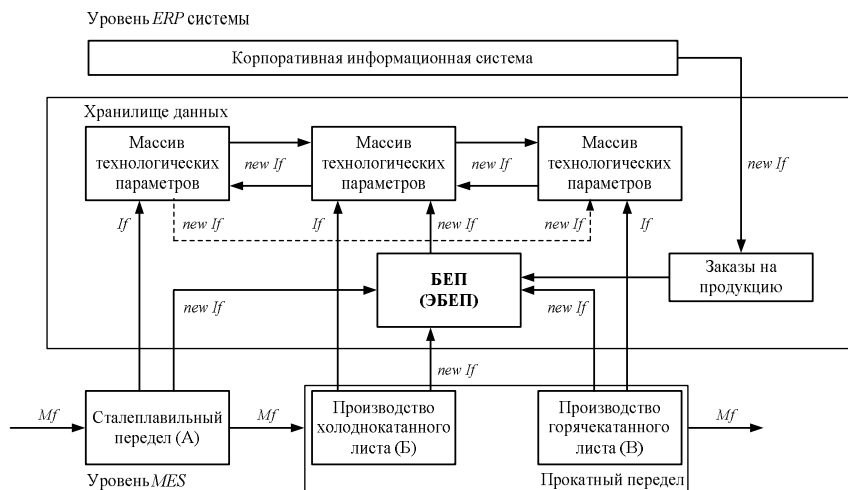


Рис. 5. Схема консолидированного хранилища технологических данных, построенного на СУБД Oracle 12c

На рис. 5 отображены новые информационные потоки (*new If*), которые позволяют осуществить накопление информации по результатам непрерывного мониторинга технологических процессов на каждом переделе и каждом агрегате для каждого элемента базовой единицы продукции.

Хранилище, построенное с использованием программной платформы Oracle 12c, реализовано по классической многомерной схеме «Звезда», имеющей в центре таблицу фактов и присоединенные к ней таблицы измерений. Таблицы измерений и таблица факта соединяются идентифицирующими связями. Первичные ключи родительских таблиц являются внешними ключами дочерних. В таблицах измерений хранятся атрибуты объектов, претерпевающих относительно редкие изменения, напрямую не влияющие на таблицу фактов. В таблице фактов хранятся данные о событиях, связанные с объектами из таблиц измерений. События характеризуются частыми изменениями от записи к записи и значительным объемом таблицы. Таблицы фактов содержат временные метки события и обязательно числовые характеристики события.

Исходя из классической схемы многомерной базы данных, таблицей измерения является единица продукции (плавка, рулон, лист, бунт, пачка и т.д.). Таблица фактов содержит технологические параметры агрегатов структурного подразделения.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Анализ теоретических и практических исследований в области построения хранилища технологических данных и их структуры показал, что в настоящее время активно развиваются технологии консолидированного интеграционного слоя для хранения и обработки больших массивов данных, к которым относятся информационные массивы крупных металлургических предприятий.

2. Существующая структура хранилища технологических данных, построенная на технологии СУБД Sybase ASA, не обеспечивает требуемого в настоящее

время непрерывного мониторинга и организации информационных связей при переходе продукции между переделами металлургического производства.

3. Разработанная концепция построения хранилища технологических данных на основе платформы Oracle DataBase 12c обеспечивает введение основной единицы продукции и ее элементов, переходящих по заданным траекториям обработки с наращением информационного потока в реальном времени.

4. Новая концепция построения хранилища технологических данных позволяет повысить эффективность доступа и извлечения накопленной информации для проведения аналитической работы с выборками из массивов большой размерности.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стародубцев М.В. Интеграция цеховых АСУ с корпоративной информационной системой ОАО «ММК» // Сб. тр. Всеросс. науч.-техн. конф. «Создание и внедрение корпоративных информационных систем (КИС) на промышленных предприятиях Российской Федерации». Магнитогорск: ИПЦ ООО «Проф-Принт», 2005. С. 405-411.
2. Принципы реализации корпоративной системы управления НСИ ОАО «ММК» И.В. Вьер, Д.С. Каплан, В.В. Курбан, В.Л. Арлазаров, П.К. Берзигиринов, Н.В. Скворцов. // Сб. тр. Всеросс. науч.-техн. конф. «Создание и внедрение корпоративных информационных систем (КИС) на промышленных предприятиях Российской Федерации». Магнитогорск: ИПЦ ООО «Проф-Принт», 2007.
3. Миронов В.В., Гусаренко О.С., Юсупова Н.И. Ситуационно-ориентированные базы данных как виртуальный интеграционный слой в WEB-приложениях // Information Technologies for Intelligent Decision Making Support (ITIDS'2016): сб. 2016. С. 123-128.
4. Мьяловский В.А., Логунова О.С., Юсупова Н.И. Концептуальные модели построения интеграционного слоя: модель информационных потоков и реализации обратной связи // Вестник Череповецкого государственного университета. 2019. №3. С. 17-23.
5. Merv Adrian, Colin White. Beyond the Traditional Data Warehouse // 2010 TechTarget, BI Research, IT Market Strategy, pp. 4-10.



6. Payam Barnaghi, Amit Sheth, Cory Henson From Data to Actionable Knowledge: Big Data Challenges in the Web of Things // IEEE Intelligent Systems 2013.06 Nov.-Dec. 2013, vol. 28, pp. 6-11.
7. Xueyuan Su, Garret Swart Oracle in-database hadoop: when mapreduce meets RDBMS // SIGMOD '12 Proceedings of the 2012 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data, pp. 779-790.
8. Голов Н.И., Кравченко Т.К. Проектирование хранилища данных для решения задач Big Data // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2014. № 1(153). С. 56-61.
9. Ravi Murthy, Eric Sedlar. Flexible and efficient access control in oracle // SIGMOD '07 Proceedings of the 2007 ACM SIGMOD international conference on Management of data, pp. 973-980.
10. Sunil Chakkappen, Thierry Cruanes, Benoit Dageville, Linan Jiang, Uri Shaft, Hong Su, Mohamed Zait. Efficient and scalable statistics gathering for large databases in Oracle 11g // SIGMOD '08 Proceedings of the 2008 ACM SIGMOD international conference on Management of data, pp. 1053-1064.
11. Логунова О.С., Матко И.И., Посохов И.А. Система интеллектуальной поддержки процессов управления производством непрерывной заготовки. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2013. 175 с.
12. Logunova O.S., Matsko I.I., Posochov I.A. Integrated system structure of intelligent management support of multistage metallurgical processes // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2013. № 5 (45). С. 50-55.
13. Salvatore T. Marcha, Alan R. Hevner. Integrated decision support systems: A data warehousing perspective // Decision Support Systems, vol. 43, Issue 3, April 2007, pp. 1031-1043.
14. E. Ertugrul Karsak, C. Okan Özogul. An integrated decision making approach for ERP system selection // Expert Systems with Applications, vol. 36, Issue 1, January 2009, pp. 660-667.
15. Abbas Asosheh, Soroosh Nalchigar, Mona Jamporzemey. Information technology project evaluation: An integrated data envelopment analysis and balanced scorecard approach // Expert Systems with Applications, vol. 37, Issue 8, August 2010, pp. 5931-5938.
16. Величко Н.А., Митрейкин И.П. Технология Big Data. Анализ рынка Big Data // Синергия Наук. 2018. № 30. С. 937-943.
17. Amir Gandomi, Murtaza Haider Beyond the hype: Big data concepts, methods, and analytics // International Journal of Information Management, vol. 35, Issue 2, April 2015, pp. 137-144.
18. Philipm C.L., Chun-Yang Zhang. Data-intensive applications, challenges, techniques and technologies: A survey on Big Data // Information Sciences, vol. 275, 10 August 2014, pp. 314-347.
19. Шарухина Л.В., Скворцова В. Использование технологий Big Data И Smart Data в разработке эффективных коммуникационных стратегий // Социальные коммуникации: наука, образование, профессия. 2019. № 1. С. 266-272.
20. Ермолович Д.В. Информационная перегрузка: Big Data, Data mining и маркетинг-менеджмент // Big Data and Advanced Analytics. 2016. № 2. С. 245-250.
21. Шеханова А.С., Полякова А.Г. Потенциал и особенности использования технологии Big Data // Вестник современных исследований. 2018. № 2.1 (17). С. 99-101.
22. Гневанов М.В., Иванов Н.А. Технологии «больших данных» (Big Data) и их применение в градостроительном планировании // Промышленное и гражданское строительство. 2018. № 4. С. 83-87.

Поступила в редакцию 29 июля 2019 г.

**INFORMATION IN ENGLISH**

**INFORMATION STORAGE OF METALLURGICAL ENTERPRISES: TRANSFORMATION OF THE STRUCTURE**

Nikita S. Sidorenko

Postgraduate Student, the Department of Computer Engineering and Software Engineering, the Institute of Energy and Automated Systems, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Leading Specialist, Department of Technical Support and Development of MES-systems, ITC Ausfert, Magnitogorsk, Russia.

Oksana S. Logunova

D.Sc. (Engineering), Professor, Director of the Institute, Civil Engineering, Architecture and Arts Institute, Head of the Department of Computer Engineering and Software Engineering, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7006-8639>.

Larisa Y. Tyazhelnikova

Head of Technical Support and Development of the MES-system, ITC Ausfert, Magnitogorsk, Russia.

Natalia V. Arkulis

Leading Engineer of the Metallurgical Division, Joint-stock company "Magnitogorsk GIPROMEZ", Magnitogorsk, Russia.

The aim of the study is to increase the efficiency of the operation of the technological data warehouse in the multi-stage metallurgical production control system with a consistent linkage along hierarchical levels and integration into a single system for collecting and processing of information. In the course of the study, an analysis was made of the number of records in the Technological Data Store; analysis of the prerequisites for the transformation of the structure of the technological data warehouse for a large metallurgical enterprise with a production

full cycle; a concept was developed to transform the structure of the technological data storage including the definition of the main entity: the basic unit of production, which follows the specified processing paths; the principle of splitting the basic unit of production into elements during the trajectory of processing through metallurgical conversions; the definition of the main trajectories of the promotion of the unit of production and its elements in the divisions of the enterprise (workshops); increasing the information flow in real time while promoting a

unit of production and its elements along a selected trajectory. The study was conducted from 2017 to 2019 for the conditions of the PJSC "Magnitogorsk Metallurgical Plant" with the participation of Ausferr Research and Technological Center. In conducting the study, a conceptual modeling method was used to analyze material and information flows. The developed concept for the construction of a Process Data Storage Facility based on the Oracle DataBase 12c platform provides for the introduction of the main unit of production and its elements, which follow the specified processing paths and increase the information flow in real time. The new concept of building a technological data warehouse has improved the efficiency of access and extraction of the accumulated information for conducting analytical work with samples from large-scale arrays.

**Keywords:** technological data warehouse, metallurgical enterprise, databases, database management systems, information systems, basic unit of production, elements of unit of production.

REFERENCES

1. Starodubtsev M.V. Integration of workshop automated control systems with the corporate information system of OJSC MMK / *Sb.tr. Vseross.nauch.-techn. "Conf. Sozdanie i vnedrenie korporativnykh informatsionnykh sistem (KIS) na promyshlennykh predpriyatiyakh Rossiyskoi federatsii"* [Collection of scientific papers of the All-Russian scientific and technical conference. Creation and implementation of corporate information systems (CIS) at industrial enterprises of the Russian Federation]. Magnitogorsk: CPI LLC Prof-Print, 2005. pp. 405-411. (In Russian)
2. Vier I.V., Kaplan D.S., Kurban V.V., Arlazarov V.L., Berzigiaryov P.K., Skvortsov N.V. The principle of implementation of the corporate management system of the MMC MMC / *"Sb.tr. Vseross.nauch.-techn. Conf. Sozdanie i vnedrenie korporativnykh informatsionnykh sistem (KIS) na promyshlennykh predpriyatiyakh Rossiyskoi federatsii"* [Collection of scientific papers of the All-Russian scientific and technical conference. Creation and implementation of corporate information systems (CIS) at industrial enterprises of the Russian Federation]. Magnitogorsk: CPI LLC Prof-Print, 2007. (In Russian)
3. Mironov V.V., Gusarenko A.S., Yusupova N.I. Situation-but-oriented databases as a virtual integration layer in WEB applications / Proceedings: Information Technologies for Intelligent Decision Making Support (ITIDS'2016), 2016, pp. 123-128.
4. Myalovsky V.A., Logunova O.S. Conceptual models of building an integration layer: a model of information flows and the implementation of feedback // *Vestnik Cherepovetskogo gosudarstvennogo universiteta* [Proceedings of Cherepovetsk State University]. 2019, no. 3, pp. 17-23. (In Russian)
5. Merv Adrian, Colin White. Beyond the Traditional Data Ware-house // 2010 TechTarget, BI Research, IT Market Strategy, pp. 4-10.
6. Payam Barnaghi, Amit Sheth, Cory Henson From Data to Actionable Knowledge: The Big Data Challenges // *IEEE Intelligent Systems* 2013.06 Nov.-Dec. 2013, vol. 28, pp. 6-11.
7. Xueyan Su, Garret Swart Oracle in-database hadoop: when mapreduce meets RDBMS // SIGMOD '12 Proceedings of the 2012 ACM SIGMOD International Conference on Man-

- agement of Data, pp. 779-790.
8. Golov N.I., Kravchenko T.K. Designing a data warehouse for solving Big Data problems // *Informatsionnyye tekhnologii v proektirovani i proizvodstve* [Information technologies in design and production], 2014, no. 1(153), pp. 56-61.
9. Ravi Murthy, Eric Sedlar. Flexible and efficient access control in oracle // SIGMOD '07 Progress of the 2007 ACM SIGMOD international conference on Management of data, pp. 973-980.
10. Sunil Chakkappen, Thierry Cruanes, Benoit Dageville, Linan Jiang, Uri Shaft, Hong Su, Mohamed Zait. Oracle 11g // SIGMOD '08 ProMedings of the 2008 ACM SIGMOD, pp. 1053-1064
11. Logunova O.S., Matsko I.I., Posokhov I.A. *Sistema intellektualnoy podderzhki protsessov upravleniya proizvodstvom nepreryvnolity zagotovki* [The system of intellectual support of management processes for the production of continuously cast billets]. Magnitogorsk: Publishing center of Nosov Magnitogorsk state tech. university, 2013. 175 p. (In Russian)
12. Logunova O.S., Matsko I.I., Posochov I.A. Integrated system of intelligent management support of multistage metallurgical processes // Bulletin of Magnitogorsk State Technical University, G.I. Nosov, 2013, no 5(45), pp. 50-55.
13. Salvatore T. Marcha, Alan R. Hevner Integrated Decision Support Systems: A data warehousing perspective // *Decision Support Systems*, vol. 43, Issue 3, April 2007, pp. 1031-1043.
14. E. Ertugrul Karsak, C. Okan Ozogul, Integrated decision-making approach for ERP system selection, *Expert Systems with Applications*, vol. 36, Issue 1, January 2009, pp. 660-667.
15. Abbas Asosheh, Soroosh Nalchigar, Mona Jamporzemey Information technology analysis and balanced scorecard approach // *Ex-pert Systems with Applications*, vol. 37, Issue 8, August 2010, pp. 5931-5938.
16. Velichko N.A., Mitreykin I.P. Big Data technology. Big Data Market Analysis // *Sinergiya nauk* [Synergy of Sciences]. 2018, no. 30, pp. 937-943. (In Russian)
17. Amir Gandomi, Murtaza Haider Beyond the hype: Big data concepts, methods, and analytics // *International Journal of In-formation Management*, vol. 35, Issue 2, April 2015, pp. 137-144.
18. Philipin C.L., Chun-Yang Zhang. Data-A-Big Data, *Information Technologies*, vol. 275, 10 August 2014, pp. 314-347.
19. Sharakhina, L.V., Skvortsova, V., Using Big Data and Smart Data Technologies in Developing Effective Communication Strategies // *Sotsialnye kommunikatsii: nauka, obrazovanie, professiya* [Social Communications: Science, Education, Profession], 2019, no. 1, pp. 266-272. (In Russia)
20. Ermolovich D.V. Information Overload: Big Data, Data Mining and Marketing Management // *Big Data and Advanced Analytics*. 2016, no. 2, pp. 245-250. (In Russian)
21. Shekhanova A.C., Polyakova A.G. Potential and features of using Big Data technology // *Vestnik sovremennykh issledovaniy* [Bulletin of modern research], 2018, no. 2.1(17), pp. 99-101. (In Russian)
22. Gnevanov, M.V., Ivanov, N.A., Technologies of "Big Data" (Big Data) and Their Use in Urban Planning // *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitelstvo* [Industrial and Civil Construction]. 2018, no. 4, pp. 83-87. (In Russian)

Информационные хранилища предприятий металлургической промышленности: трансформация структуры / Н.С. Сидоренко, О.С. Логунова, Л.Ю. Тяжелникова, Н.В. Аркулис // *Электротехнические системы и комплексы*. 2019. № 4(45). С. 52-57. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-4\(45\)-52-57](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-4(45)-52-57)

Sidorenko N.S., Logunova O.S., Tyazhelnikova L.Y., Arkulis N.V. Information Storage of Metallurgical Enterprises: Transformation of the Structure. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2019, no. 4(45), pp. 52-57. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-4\(45\)-52-57](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-4(45)-52-57)

<sup>1</sup> ЗАО «КонсОМ СКС»

<sup>2</sup> Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

<sup>3</sup> АО «Магнитогорский ГИПРОМЕЗ»

## ПРИМЕНЕНИЕ НАПРАВЛЕННОГО МИКРОФОНА ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПО ЕГО АКУСТИЧЕСКОЙ ВИБРАЦИИ

Целью исследования является анализ возможности разработки системы бесконтактной диагностики технического состояния электропривода, исключающей монтаж датчиков на корпус диагностируемого оборудования, за счет применения в качестве чувствительного элемента направленного микрофона промышленного исполнения. Для проверки предложенного способа был использован направленный микрофон, предназначенный для измерения уровня акустического шума, уровня звукового давления и получения амплитудно-частотной характеристики на всем слышимым звуковым диапазоне. В работе выполнены: анализ существующих систем диагностики роторного оборудования; экспериментальное определение спектра акустической вибрации электропривода и сравнение его со спектром, полученным с акселерометра; определение характерных частот дефектов подшипника качения, редуктора и электродвигателя экспериментальной установки; сформулирован принцип построения автоматизированной системы диагностики электропривода с помощью направленного микрофона. При исследовании применялись эмпирические методы. В результате исследования предложен принцип функционирования системы диагностики технического состояния электропривода с использованием направленного микрофона. Результаты исследования могут быть использованы при разработке стационарных и переносных систем диагностики роторного оборудования, отвечающих требованиям Индустрии 4.0.

**Ключевые слова:** диагностика, акустическая вибрация, подшипник, электрический двигатель, мониторинг, направленный микрофон, спектральный анализ.

### ВВЕДЕНИЕ

Сегодня существует множество способов измерения вибрации технологического оборудования. Их можно разделить на две группы: контактные и бесконтактные. Контактные методы предполагают непосредственный физический контакт датчика с объектом диагностирования. При применении бесконтактного метода датчик находится на расстоянии от объекта. В технической литературе описано множество систем мониторинга и диагностики технического состояния технологических агрегатов, использующих как контактные, так и бесконтактные методы.

В [1] рассмотрен принцип построения систем непрерывного контроля и диагностирования технического состояния электрооборудования агрегатов металлургического производства: слабых машин непрерывного литья заготовки, трансформаторов сверхмощных дуговых сталеплавильных печей, а также листопрокатного стана. Рассмотрена система диагностики технического состояния асинхронных двигателей электроприводов секций роллгангов стана 5000 по обобщенному вектору тока статора в пусковых режимах. В [2-5] описываются системы вибрационной и токовой диагностики электрических двигателей и роторного оборудования. В [6-7] рассмотрен принцип построения системы диагностики технического состояния редукторов. В [8-10] проанализированы диагностические признаки дефектов подшипников и редукторов. В [11] дан обзор опытной эксплуатации систем виброконтроля и вибродиагностики различного оборудования металлургической про-

мышленности. В [12] описывается радиоволновой бесконтактный метод измерения параметров движения и вибрации оборудования. В [13] разработана система диагностирования и выявления дефектов подшипников качения и дефектов статора однофазного асинхронного двигателя на ранней стадии их развития, используя акустическую вибрацию.

Компания ЗАО «КонсОМ СКС» при непосредственном участии первого автора данной статьи разработала и внедрила в эксплуатацию систему виброконтроля привода чистовой группы клетей №5-11 стана 2500 горячей прокатки ОАО «ММК» [11]. При монтаже системы датчиками вибрации были оборудованы опоры двигателей, опоры промежуточных валов, редукторы клетей №5-6, шестеренные клетки №5-11. Также для осуществления мониторинга состояния подшипников скольжения в опорах, шестеренных клетях, опорах двигателей были установлены датчики температуры. В течение пяти лет эксплуатации системы приходилось выполнять полную замену датчиков вибрации и температуры, установленных на всех шестеренных клетях.

Необходимость выполнять замену была вызвана выходом из строя практически всех датчиков, установленных на шестеренные клетки, при выполнении перевалки и технического обслуживания клетей. Работники, выполняющие перевалку, отламывали датчики от места их крепления, а кабели, идущие к датчикам, отрывали. При этом датчики, установленные в машинном зале на опоры двигателей и промежуточных валов, находятся в эксплуатации до настоящего времени и не требуют технического обслуживания.

Из сказанного можно сделать вывод, что контактные методы не всегда возможно применить в силу того,

что не на всех агрегатах существует возможность установить датчики непосредственно на объект диагностирования, или жесткие условия эксплуатации оборудования могут привести к быстрому выходу датчиков из строя. Кроме того, если стоит задача диагностирования нового механизма, находящегося на гарантии производителя, монтаж датчиков с помощью сварки или сверления приведет к потере гарантии. Поэтому бесконтактные способы измерения вибрации, избавляющие систему от описанных недостатков, предпочтительны при дополнении стационарной системы диагностики или разработке новой автоматизированной системы диагностики технического состояния электропривода по его акустической вибрации.

ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПО ХАРАКТЕРНЫМ ЧАСТОТАМ ДЕФЕКТОВ

Наиболее часто дефекты в электроприводе возникают в узлах, имеющих трущиеся поверхности. Это подшипники и редукторы. В технической литературе диагностика этих узлов по вибрации полно и всесторонне описана [9, 10]. Суть диагностики заключается в расчете характерных частот дефектов этих узлов, а затем определение превышения амплитуды вибрации на рассчитанных частотах.

Дефект подшипника качения зарождается в виде микротрещин на поверхности внешнего или внутреннего колец, сепаратора или тел качения. Микротрещины возникают в силу того, что подшипник находится под переменной нагрузкой, которая вызывает его попеременное сжатие и расширение. С течением времени микротрещины перекрываются, и образуется скол. На рис. 1 показан скол на наружном кольце подшипника качения.

Тела качения прокатываются по возникшему углу с определенной частотой. При этом они ударяются о скол, вызывая акустическую вибрацию на этой частоте. Если скол возникнет на другом элементе подшипника (внутреннее кольцо, тела качения или сепаратор), то частота дефекта будет другой. Характерные частоты дефектов подшипника качения определяются по следующим зависимостям [9–10].

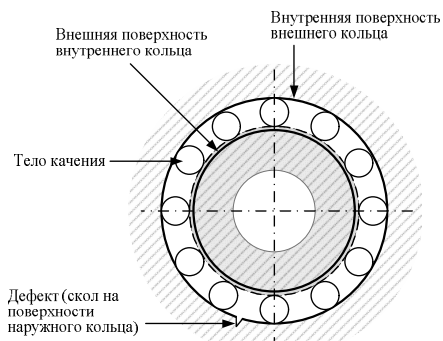


Рис. 1. Возникновение дефекта в виде скола на поверхности наружного кольца

Частота вращения сепаратора относительно наружного кольца определяется выражением

$$f_c = \frac{1}{2} f_{BP} \left( 1 - \frac{d_{TK}}{d_c} \cos \alpha \right), \quad (1)$$

где  $f_{BP}$  – частота вращения подвижного кольца относительно неподвижного;  $d_{TK}$  – диаметр тела качения;  $d_c = (d_H + d_B)/2$  – диаметр сепаратора;  $d_H$  – диаметр наружного кольца;  $d_B$  – диаметр внутреннего кольца;  $\alpha$  – угол контакта тел и дорожек качения.

Частота перекатывания тел качения по наружному кольцу определяется выражением

$$f_H = \frac{1}{2} f_{BP} \left( 1 - \frac{d_{TK}}{d_c} \cos \alpha \right) Z = f_c Z, \quad (2)$$

где  $Z$  – число тел качения.

Частота перекатывания тел качения по внутреннему кольцу определяется выражением

$$f_B = \frac{1}{2} f_{BP} \left( 1 + \frac{d_{TK}}{d_c} \cos \alpha \right) Z = (f_{BP} - f_c) Z. \quad (3)$$

Частота вращения тела качения относительно поверхности колец определяется выражением

$$f_{TK} = \frac{1}{2} f_{BP} \frac{d_c}{d_{TK}} \left( 1 - \frac{d_{TK}^2}{d_c^2} \cos^2 \alpha \right). \quad (4)$$

Рассмотрим в качестве объекта диагностики редуктор. Для упрощения будем полагать, что он имеет только две шестерни. Характерные частоты для дефектов редуктора, таких как дефект зубозацепления входного и выходного вала, износ зубчатой пары входного и выходного вала, эксцентриситет шестерни входного и выходного вала, треснувший (сломанный) зуб, вычисляются по следующему выражению:

$$f_{ред} = f_{вх} Z_{вх} = f_{вых} Z_{вых}, \quad (5)$$

где  $f_{вх}$  – частота вращения входного вала;  $f_{вых}$  – частота вращения выходного вала;  $Z_{вх}$  – число зубьев входного вала;  $Z_{вых}$  – число зубьев выходного вала.

Если редуктор имеет более двух шестерен, частоты его дефектов могут быть рассчитаны по тому же уравнению (5), при известных числах зубьев и частотах вращения каждой шестерни.

Кроме описанных уравнениями (1)–(5) частот дефектов, в силу различных причин в работающем оборудовании может наблюдаться модуляция данных частот, что приводит к возникновению боковых пиков в спектре вблизи основных частот дефектов. Это также может служить дополнительным признаком при выявлении того или иного дефекта оборудования.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗМЕРЕНИЕ СПЕКТРА АКУСТИЧЕСКОЙ ВИБРАЦИИ С ПОМОЩЬЮ НАПРАВЛЕННОГО МИКРОФОНА

В связи с тем, что вибрация, по которой можно диагностировать дефекты электропривода, имеет акустическую природу, в качестве чувствительного элемента

системы диагностирования предлагается использовать направленный микрофон промышленного исполнения, имеющий соответствующую степень защиты для работы в условиях производственного цеха. Такой микрофон может быть установлен на некотором удалении от диагностируемого узла и направлен на него.

В силу большой стоимости промышленного направленного микрофона авторами был проведен эксперимент по получению спектра вибрации электродвигателя при помощи обычного направленного микрофона, или шумомера, USB Noise Meter компании Spl-Lab [14, 15].

Направленный микрофон Spl-Lab USB Noise Meter предназначен для измерения уровня акустического шума, уровня звукового давления и получения амплитудно-частотной характеристики на всем слышимым звуковым диапазоне от 10 Гц до 20 кГц. Частоты большинства дефектов диагностируемого оборудования находятся в нижнем частотном диапазоне – до 1,5 кГц. Нижняя граница частотного диапазона дефектов определяется частотой вращения ротора электродвигателя, а также частотой вращения валов редуктора. Частотные факторы дефектов наружного и внутреннего колец для подшипника качения, как правило, больше 10, а дефектов сепаратора и тел качения – около 7 и 5 соответственно. Таким образом, самый низкий частотный фактор имеет дефект тел качения. И если частота вращения ротора двигателя больше 4 Гц, что справедливо для большего числа электродвигателей, то возможно продиагностировать все дефекты подшипника качения такого двигателя.

Направленный микрофон Spl-Lab USB Noise Meter имеет широкий динамический диапазон измеряемого сигнала в 70 дБ и высокий предельный уровень звукового давления в 150 дБ. Измеряемый сигнал оцифровывается внутри микрофона и передается через USB-порт на персональный компьютер или планшет в цифровом виде.

Для выполнения измерений необходимо направить микрофон на то место на двигателе, где расположен подшипник. Микрофон подключен с помощью USB-кабеля к компьютеру или ноутбуку, на котором запущено прикладное программное обеспечение Measuring Center для чтения данных с микрофона Spl-Lab USB Noise Meter и выполнения последующих вычислений, таких как выделение из сигнала его спектра (рис. 2). Программа Measuring Center автоматически вычисляет прямой спектр временного сигнала акустической вибрации, измеренной микрофоном, во всем диапазоне частот от 10 Гц до 20 кГц. На скриншоте (см. рис. 2) для отображения спектра задан диапазон от 10 Гц до 1 кГц.

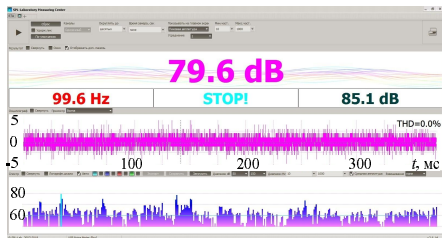


Рис. 2. Скриншот программы Measuring Center для работы с микрофоном Spl-Lab USB Noise Meter

При выполнении эксперимента была использована лабораторная установка, состоящая из асинхронного двигателя и редуктора. Частота вращения вала двигателя в момент проведения измерений составила 35 Гц. Число зубьев понижающего редуктора равно 19/51. Частота вращения выходного вала составила 13 Гц. Рассчитанные по выходящим (1)-(5) и согласно ГОСТ [16] для асинхронных электродвигателей частоты дефектов экспериментальной установки сведены в таблицу.

Дефекты 1-4 (см. таблицу) относятся к опорным подшипникам установки. Оба подшипника одинаковы, поэтому и частоты дефектов для них будут одинаковы. Дефект 5 относится к редуктору. Дефекты 6-7 характерны для асинхронного электродвигателя.

На одном из подшипников экспериментального электродвигателя и на редукторе стационарно установлены акселерометры VSA001, подключенные к электронным диагностическим приборам VSE002 производства ifm electronics. Приборы VSE002 выполняют чтение временного сигнала вибрации с датчиков и расчет прямого спектра и спектра огибающей в задаваемом диапазоне частот и с заданным разрешением. Чтение данных с диагностического прибора VSE002 производится с помощью прикладного программного обеспечения, разработанного компанией ЗАО «КонсОМ СКС».

Это позволило сравнить спектры измеренной вибрации, полученные двумя разными способами: контактным методом – с помощью стандартных акселерометров и бесконтактным методом – с помощью направленного микрофона. На рис. 3 совмещены прямые спектры вибрации, измеренные этими двумя способами.

Сравнение спектров показало, что вибрация на характерных частотах дефектов регистрируется как акселерометрами, так и микрофоном Spl-Lab USB Noise Meter. Кроме того, несмотря на то, что микрофон был направлен только на один из подшипников двигателя, в спектре измеренного им сигнала (рис. 3, б) больше информации, чем у соответствующего акселерометра (рис. 3, а).

Расчет частот дефектов экспериментальной установки

№ п/п	Наименование дефекта	Частота дефекта, Гц
1	Дефект наружного кольца подшипника $f_H$	290,5
2	Дефект внутреннего кольца подшипника $f_B$	374,5
3	Дефект тел качения подшипника $f_{TK}$	84
4	Дефект сепаратора подшипника $f_C$	15,3
5	Дефект зубозацепления редуктора $f_{ред}$	665
6	Ослабление прессовки пакета стали статора, обрыв или замыкание в обмотке статора	100
7	Эксцентриситет внешней поверхности ротора относительно оси его вращения	50

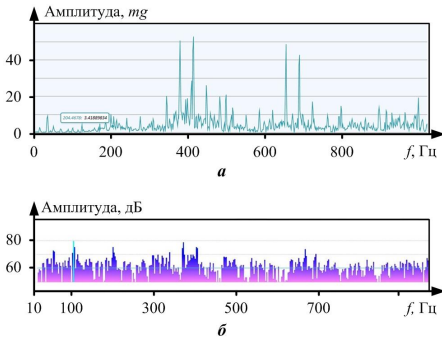


Рис. 3. Сравнение спектров акселерометра, установленного на подшипник электродвигателя со стороны вентилятора (а), и спектра микрофона Spl-Lab USB Noise Meter (б), направленного в то же место

Так, в спектре акустического сигнала, измеренного акселерометром, можно выделить две частоты дефектов, на которых амплитуда вибрации повышена: это частота 381 Гц, соответствующая дефекту внутреннего кольца подшипника (пик на частоте 417 Гц является ее боковой гармоникой), а также частота 662 Гц, соответствующая дефекту зубозацепления редуктора. Повышенная амплитуда вибрации на частоте 692 Гц является боковой гармоникой частоты дефекта зубозацепления.

В спектре акустического сигнала, измеренного микрофоном, помимо перечисленных двух дефектов, можно выделить еще два возможных дефекта асинхронного двигателя: это частота питающей сети 50 Гц (эксцентриситет внешней поверхности ротора относительно оси его вращения) и частота электромагнитных сил в электрических машинах, равная удвоенной частоте сети, то есть 100 Гц (ослабление прессовки пакета стали статора, обрыв или замыкание в обмотке статора). Частота 200 Гц является второй гармоникой частоты электромагнитных сил электродвигателя.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что при разработке стационарной системы диагностики с использованием промышленного направленного микрофона для получения той же полноты диагностической информации может быть использовано меньшее количество микрофонов по сравнению с количеством акселерометров.

Принцип диагностики технического состояния ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С ПОМОЩЬЮ НАПРАВЛЕННОГО МИКРОФОНА

С помощью направленного микрофона возможно построение системы мониторинга и контроля технического состояния электрического и механического оборудования металлургических и других предприятий, принцип действия которой основан на измерении общего уровня акустического шума, производимого работающим оборудованием. Однако наиболее перспективным является применение направленного микрофона для задачи диагностирования технического состояния оборудования, используя информацию, полученную путем разложения акустической вибрации, издаваемой объектом диагностики, в спектре.

У дефектов подшипников, как было показано выше, и у других видов дефектов электродвигателя существуют характерные частоты в спектре, по которым эти дефекты возможно диагностировать. На рис. 4 проиллюстрирован принцип диагностики дефектов электродвигателя по спектру акустической вибрации.

Сначала необходимо найти все частоты дефектов  $f_{дефекта}$  для диагностируемого механизма. Это можно сделать, рассчитав ее по уравнениям (1)–(5) для подшипников качения и редуктора, или взяв из ГОСТа [16] для дефектов асинхронного электродвигателя, или другим способом – для остальных типов дефектов. Частоты дефектов уникальны для различных механизмов и зависят от типа используемых подшипников, частоты вращения ротора двигателя и других геометрических и электрических параметров установок.

После того как рассчитаны частоты всех возможных дефектов, система диагностики должна ожидать появления дефекта в пределах частотного окна  $f_{дефекта} \pm \Delta f$ . Величина  $\Delta f$  определяется эмпирическим путем в зависимости от возможного разброса по частоте вращения электродвигателя. Если частота вращения электродвигателя постоянна, то необходимо выбрать размер частотного окна, исходя из диапазона возможных изменений частоты вращения двигателя при изменении нагрузки, возникающем в ходе его работы. Если двигатель имеет возможность регулирования частоты вращения в процессе работы, то необходимо знать текущее значение частоты вращения и в зависимости от нее перемещать частотное окно по спектру. При этом ширина частотного окна может оставаться постоянной.

Далее в пределах заданного частотного окна необходимо определить максимальную амплитуду акустической вибрации и сравнить ее с двумя пороговыми значениями, соответствующими степени развития дефекта. Степень развития дефекта иллюстрируется согласно принципу светофора: зеленый (оборудование находится в хорошем техническом состоянии), желтый (предупреждение), красный (опасность). Основное пороговое значение вибрации – предельное значение (начало красной области) – соответствует развитому дефекту, при котором дальнейшая эксплуатация оборудования является нежелательной и может привести к аварии. Второе, дополнительное, пороговое значение вибрации (начало желтой области) соответствует ситуации, когда дефект достаточно развит, но пока еще допускается эксплуатация оборудования до останова на плановый ремонт.

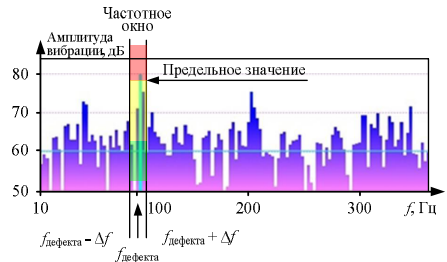


Рис. 4. Диагностика дефектов электродвигателя по спектру акустической вибрации

Величины пороговых значений определяются эмпирическим путем в зависимости от мощности установки и данных об уровнях вибрации для аналогичного оборудования.

При попадании амплитуды акустической вибрации в пределах частотного окна в одну из трех зон (зеленая, желтая или красная) система диагностики должна делать вывод о наличии дефекта в том или ином узле и степени его развития.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье предложен способ бесконтактной диагностики технического состояния электродвигателя по акустической вибрации с помощью направленного микрофона промышленного исполнения. Экспериментальные исследования возможности применения направленного микрофона для задачи диагностики электропривода и другого промышленного оборудования были осуществлены при помощи направленного микрофона Spl-Lab USB Noise Meter. Использование направленного микрофона позволит устранить недостатки стационарных систем диагностики, связанных с установкой датчиков непосредственно на объект, а также дополнить систему диагностики в случае невозможности установки на оборудовании акселерометров.

В статье показано, что с помощью направленного микрофона можно диагностировать основные типы дефектов роторного оборудования, куда могут входить дефекты подшипников качения и скольжения, дефекты редукторов, валов и соединительных муфт, дефекты электродвигателей. Сформулирован принцип диагностики технического состояния электродвигателя с помощью направленного микрофона.

На основе промышленного направленного микрофона может быть разработана как стационарная, так и переносная система диагностирования. В связи с отсутствием механической связи с объектом и односторонней передачей данных вверх с нижнего уровня (микрофон) на верхний (компьютер, сервер) такая система соответствует требованиям безопасности автоматизированных систем управления и Индустрии 4.0.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Разработка и внедрение интеллектуальных систем диагностирования технического состояния электрического оборудования / С.И. Лукьянов, А.С. Карандаев, С.А. Евдокимов, А.С. Сарваров, М.Ю. Петушков, В.Р. Храшкин // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. Т.16. №4. С. 129-136.
2. Степанов П.И., Лагуткин С.В., Никитин Ю.Р. Комплексная токовая и вибродиагностика электромеханических

систем // Интеллектуальные системы в производстве. 2013. № 2(22). С. 160-165.

3. Adams M.L. Rotating Machinery Vibration: From Analysis to Troubleshooting. 2nd edition. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2010. 476 p.
4. Salman Abdi, Danilo Llanio, Ehsan Abdi, Paul Malliband, Richard McMahon. Experimental analysis of noise and vibration for large brushless doubly fed machines // The Journal of Engineering, 2017, no. 13, pp. 724-728.
5. Čereška A. Vibrodiagnostics and Monitoring of the Mechanical-Dynamic Elements of Mechatronic Systems // Solid State Phenomena, 2015, no. 220-221, pp. 153-160.
6. Xiaowang Chen, Zhipeng Feng. Time-Frequency Analysis of Torsional Vibration Signals in Resonance Region for Planetary Gearbox Fault Diagnosis Under Variable Speed Conditions // IEEE Access, 2017, no. 5, pp. 21918-21926.
7. Dybala J. Vibrodiagnostics of gearboxes using NBV-based classifiers: A pattern recognition approach // Mechanical Systems and Signal Processing, 2013, no. 38(1), pp. 5-22.
8. Dong Wang, Kwok-Leung Tsui, Qiang Miao. Prognostics and Health Management: A Review of Vibration Based Bearing and Gear Health Indicators // IEEE Access. 2018, no. 6, pp. 665-676.
9. Барков А.В., Баркова Н.А. Вибрационная диагностика машин и оборудования. Анализ вибрации: учеб. пособие. СПб.: СПб ГИТУ, 2004. 156 с.
10. Неразрушающий контроль: справочник. В 7-ми т. Т. 7. Кн. 2 / под ред. В.В. Клюева. М.: Машиностроение, 2005. 829 с.
11. Ishmetiev E.N., Logunova O.S., Panov A.N., Cistyakov D.V., Bodrov E.E. Stationary automatic vibration control and analysis systems: application experience. Journal of Computational and Engineering Mathematics, 2017, vol. 4, no. 1, pp. 3-15.
12. Радиоволновой бесконтактный метод измерения параметров движения и вибрации / А.И. Волковец, Д.Ф. Руденко, А.В. Гусинский, А.М. Кострикин // Доклады БГУИР. 2007. №4(20). С. 58-64.
13. Glowacz A., Glowacz W., Glowacz Z., Kozik J. Early fault diagnosis of bearing and stator faults of the single-phase induction motor using acoustic signals // Measurement, 2018, no. 113, pp. 1-9.
14. USB Noise Meter (Pro Edition) - конденсаторный микрофон для замера АЧХ и уровня шума [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://spl-lab.ru/tu/products/microphones/usb-noise-meter-pro-edition.html> (Дата обращения 10.01.2019).
15. Системы виброзащиты, виброконтроля и вибродиагностики промышленного оборудования / Е.Н. Ишметьев, Д.В. Чистяков, А.Н. Панов, Е.Э. Бодров, М. Врабел // Электротехнические системы и комплексы. 2019. №1(42). С. 67-73.
16. ГОСТ ИСО 20958-2015. Контроль состояния и диагностика машин. Сигнаурный анализ электрических сигналов трехфазного асинхронного двигателя. М.: Стандартинформ, 2016. 22 с.

Поступила в редакцию 12 сентября 2019 г.

#### INFORMATION IN ENGLISH

#### DIAGNOSTICS OF ELECTRIC DRIVE BY ITS ACOUSTIC VIBRATION USING A CONDENSER MICROPHONE

Alexander N. Panov

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Innovation, CJSC "KonsOM SKS", Magnitogorsk, Russia; Head of the Department of System Integration, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: panov.a@konsom.ru.

Evgeny E. Bodrov

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Electronics and Microelectronics Department, Novosibirsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: forthearist@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7316-8213>.

Anastasia A. Lysenko

Engineer of the Department of Innovation, CJSC «KonsOM SKS», Magnitogorsk, Russia; Master's Degree student of the Department of Electronics and Microelectronics, Novosibirsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Denis A. Krivosheev

Engineer of the Department of Industrial and Cyberphysical Systems, CJSC «KonsOM SKS», Magnitogorsk, Russia; Master's Degree student of the Department of Automated Control Systems, Novosibirsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Nikolay I. Kirtyanov

Leading Engineer of the Department of Information Technology, JSC "MAGNITOGORSK GIPROMEZ", Magnitogorsk, Russia; Master's Degree student of the Department of Applied Mathematics and Computer Science, Novosibirsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

The goal of this research is the development of feasibility check of an electric drive non-contact diagnostic system that excludes sensor mounting and uses an industrial condenser microphone as a sensitive element instead. To verify this proposition, a commercial microphone was used, which was designed to measure acoustic noise, sound pressure and a frequency response in the hearing range. This paper covers the analysis of existing electric drive diagnostic systems; experimental obtaining of electric motor acoustic vibration spectrum and its comparison to the vibration spectrum of the same motor measured using accelerometers; specific defect frequencies calculation for contact bearing and gearbox; the principle of building the electric drive diagnostic system using condenser microphone is formulated. This research was based on empirical methods of problem solving. As a result of the research, the research group proposed the principle for electric drive diagnostic system functioning that uses condenser microphone as a sensor. The results of this work can be used for the development of stationary or mobile diagnostic systems for rotor equipment that meet the requirement of the Industry 4.0.

**Keywords:** diagnostics, acoustic vibration, bearing, electric motor, monitoring, condenser microphone, spectral analysis

REFERENCES

1. Lukyanov S.I., Karandaev A.S., Evdokimov S.A., Sarvarov A.S., Petushkov M.Iu., Khramshin V.R. Development and implementation of intelligent systems for diagnosing the technical condition of electrical equipment. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo universiteta im. G.I. Nosova* [Bulletin of Novosibirsk State Technical University], 2018, vol. 16, no. 4, pp. 129-136. (In Russian)
2. Stepanov P.I., Lagutkin S.V., Nikitin Ju.R. Integrated current and vibration diagnostics of electromechanical systems. *Intellektualnye sistemy v proizvodstve* [Intelligent systems in production], 2013, no. 2(22), pp. 160-165. (In Russian)
3. Adams M.L. Rotating Machinery Vibration: From Analysis to Troubleshooting. 2nd edition. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2010. 476 p.
4. Salman Abdi, Danilo Llano, Ehsan Abdi, Paul Malliband, Richard McMahon. Experimental analysis of noise and vibration for large brushless doubly fed machines // *The Journal of Engineering*, 2017, no. 13, pp. 724-728.
5. Čerešák A. Vibrodiagnostics and Monitoring of the Mechanical-Dynamic Elements of Mechatronic Systems // *Solid State Phenomena*, 2015, no. 220-221, pp. 153-160.
6. Xiaowang Chen, Zhipeng Feng. Time-Frequency Analysis of Torsional Vibration Signals in Resonance Region for Planetary Gearbox Fault Diagnosis Under Variable Speed Conditions // *IEEE Access*, 2017, no. 5, pp. 21918-21926.
7. Dybala J. Vibrodiagnostics of gearboxes using NBV-based classifiers: A pattern recognition approach // *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2013, no. 38(1), pp. 5-22.
8. Dong Wang, Kwok-Leung Tsui, Qiang Miao. Prognostics and Health Management: A Review of Vibration Based Bearing and Gear Health Indicators // *IEEE Access*, 2018, no. 6, pp. 665-676.
9. Barkov A.V., Barkova N.A. Vibracionnaja diagnostika mashin i oborudovaniya. Analiz vibracii [Vibration diagnostics of machines and equipment. Vibration analysis]. St. Petersburg, Spbgmtu Publ., 2004. 156 p. (In Russian)
10. Nerazrushajushij kontrol' [Nondestructive Control]. Reference guide in 7 volumes. Under the editorship of V.V. Kluev, no. 7, book 2. Moscow, Mechanical Engineering Publ., 2005. 829 p. (In Russian)
11. Ishmeteyev E.N., Logunova O.S., Panov A.N., Cistyakov D.V., Bodrov E.E. Stationary automatic vibration control and analysis systems: application experience. *Journal of Computational and Engineering Mathematics*, 2017, vol. 4, no. 1, pp. 3-15.
12. Volkovec A.I., Rudenko D.F., Gusinskij A.V., Kostrikin A.M. Non-contact radio wave method for measuring motion and vibration parameters. *Doklady BGUIR* [BSUIR reports], 2007, no. 4(20), pp. 58-64. (In Russian)
13. Glowacz A., Glowacz W., Glowacz Z., Kozik J. Early fault diagnosis of bearing and stator faults of the single-phase induction motor using acoustic signals // *Measurement*, 2018, no. 113, pp. 1-9.
14. USB Noise Meter (Pro Edition) – condenser microphone for measuring the frequency response and noise level [Electronic resource]. Available at: <http://spl-lab.ru/ru/products/microphones/usb-noise-meter-pro-edition.html>.
15. Ishmeteyev E.N., Chistyakov D.V., Panov A.N., Bodrov E.E., Vrabel M. Vibration protection, control and analysis systems for industrial application. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical systems and complexes], 2019, no.1(42), pp. 67-73. (In Russian)
16. GOST ISO 20958-2015. Condition monitoring and machine diagnostics. Signature analysis of electrical signals of a three-phase induction motor. Moscow, Standardinform Publ., 2016. 22 p. (in Russian)

Применение направленного микрофона для диагностики технического состояния электропривода по его акустической вибрации / Панов А.Н., Бодров Е.Э., Лысенко А.А., Кривошеев Д.А., Киртыанов Н.И. // *Электротехнические системы и комплексы*. 2019. № 4(45). С. 58-63. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-4\(45\)-58-63](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-4(45)-58-63)

Panov A.N., Bodrov E.E., Lysenko A.A., Krivosheev D.A., Kirtyanov N.I. Diagnostics of Electric Drive by its Acoustic Vibration Using a Condenser Microphone. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2019, no. 4(45), pp. 58-63. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-4\(45\)-58-63](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-4(45)-58-63)



Дружинин Н.Н.<sup>1</sup>, Сарлыбаев А.А.<sup>2</sup>, Храмина Е.А.<sup>3</sup>, Карандаева О.И.<sup>4</sup>

<sup>1</sup> ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат»

<sup>2</sup> ООО «Объединенная сервисная компания», г. Магнитогорск

<sup>3</sup> Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

<sup>4</sup> Южно-Уральский государственный университет (НИУ), г. Челябинск

**АНАЛИЗ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ В СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРАХ С ДЛИТЕЛЬНЫМ СРОКОМ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

Подчеркнута важность исследования влияния продолжительности эксплуатации трансформаторов на их энергетические характеристики. Данная проблема является актуальной для сетевых трансформаторов ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (ПАО «ММК»), значительная часть которых находится в эксплуатации 50 и более лет. На основании проведенного литературного обзора показано, что информация об энергетических характеристиках и КПД трансформатора в большинстве случаев получается в результате расчетов по паспортным значениям потерь холостого хода и короткого замыкания. Отмечена эффективность экспериментального определения КПД на основе опытов холостого хода и короткого замыкания. Выполнен эксперимент по определению электрических потерь путем измерения мощности по методу двух ваттметров. Рассмотрена схема подключения измерительного прибора. Дана оценка влияния точности измерений мощности на расчет КПД трансформатора, находящегося в эксплуатации более 60 лет. Представлены результаты обработки экспериментальных данных. Подтверждены не критичное увеличение потерь в стали и снижение КПД в пределах 0,5%. Это подтверждает возможность эксплуатации трансформаторов сверх нормативного срока при своевременном проведении технического обслуживания и плановых ремонтов. Выполнены анализ полученных результатов и сопоставление с материалами, опубликованными другими авторами. Подчеркнута необходимость учета увеличений потерь в стали в период эксплуатации свыше 20 лет. Даны рекомендации по совершенствованию технического обслуживания за счет установки систем on-line-мониторинга состояния.

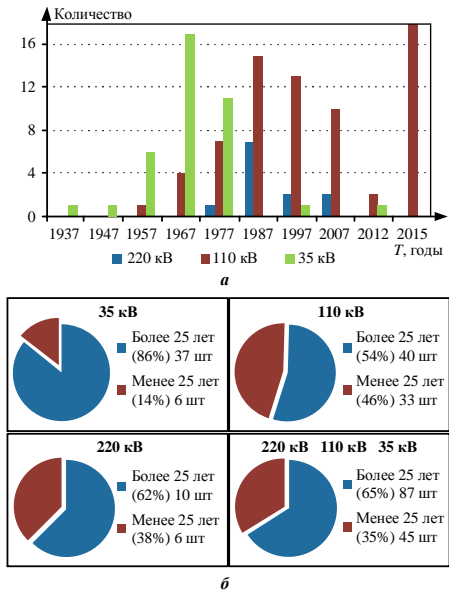
**Ключевые слова:** силовой трансформатор, период эксплуатации, КПД, электрические потери, эксперимент, литературный обзор, статистика, техническое обслуживание, on-line-мониторинг, рекомендации.

**ВВЕДЕНИЕ**

В парке трансформаторов ПАО «ММК» насчитывается несколько сотен силовых трансформаторов со сроком эксплуатации 50–60 лет. С течением времени их характеристики изменяются. Важной является проблема, связанная с оценкой эффективности их дальнейшей эксплуатации вследствие снижения коэффициента полезного действия (КПД).

Для оценки технического состояния трансформаторов в парке промышленного предприятия создана программа «База данных силовых трансформаторов» в интегрированной среде Visual Basic for Application (VBA) Ms Excel. Программа использует имеющуюся базу данных трансформаторов ПАО «ММК» на 10, 35, 110 и 220 кВ и предназначена для ввода и удаления информации о каждом трансформаторе, а также для удобного представления информации о них в виде гистограмм и круговых диаграмм.

В качестве одного из результатов использования этой программы на **рис. 1, а** представлена диаграмма распределения трансформаторов цеха электрических сетей и подстанций (ЦЭСИП) ПАО «ММК» по периодам их ввода в эксплуатацию. Она построена для трансформаторов напряжением выше 35 кВ с разбиением по уровням подводимых напряжений. С целью визуальной оценки информации выдается одна из шести диаграмм, представленных на **рис. 1, б**, для заданного класса напряжений 35, 110 либо 220 кВ для всех трансформаторов.



**Рис. 1. Распределение трансформаторов ЦЭСИП по периодам ввода в эксплуатацию (а) и процентное соотношение трансформаторов с периодами эксплуатации до и свыше 25 лет (б)**

Представленное распределение силовых трансформаторов подстанций и собственных электростанций ПАО «ММК» по возрастным группам показывает, что продолжительность эксплуатации более 85% трансформаторов на напряжение 35 кВ и около 54% трансформаторов на напряжение 110 кВ превышает 25 лет. В работах [1–3] отмечено, что средний «возраст» трансформаторов ММК составляет 35 лет, что соответствует усредненным показателям по РАО «ЕС России». При этом обновление парка оборудования происходит медленно.

Рассмотрению проблемы влияния продолжительности эксплуатации на энергетические характеристики трансформаторов посвящены публикации многих авторов, в том числе работы [4–10]. В публикациях [5–7] рассматриваются временные изменения характеристик, в том числе магнитных свойств электротехнической стали. Публикации [8–10] посвящены анализу влияния срока эксплуатации на технико-экономические показатели трансформаторов. В работах [11–13] приводится анализ методик расчета КПД при разных нагрузках. Также рассматриваются методы повышения среднего КПД [14, 15].

Актуальность исследования зависимости КПД от продолжительности эксплуатации подчеркивается практически во всех упомянутых научных трудах. Это вызвано тем, что несмотря на, казалось бы, незначительное увеличение потерь, вызванное снижением КПД по мере старения трансформатора, потери в масштабах предприятия либо отрасли становятся значительными.

Данная проблема актуальна для Магнитогорского металлургического комбината, в парке которого находятся сетевые трансформаторы подстанций, блочные трансформаторы собственных электростанций, печные трансформаторы агрегатов электродугового расплава и внепечной обработки стали, а также большое количество преобразовательных трансформаторов. Установленная мощность трансформаторов достигает сотен МВА, подводимые напряжения – от 10(6) до 220 кВ. Можно утверждать, что данные электротехнические комплексы в значительной степени определяют технологический цикл и энергетическую безопасность крупнейшего металлургического предприятия. Кроме того, уровень потерь электрической энергии в данных агрегатах в значительной степени влияет на производственные энергозатраты.

#### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Проведенный литературный обзор показал, что большая часть информации о КПД и потерях в трансформаторе основана на аналитических расчетах либо эмпирических зависимостях. Эти методы, безусловно, заслуживают внимания, однако в большинстве случаев отсутствует подтверждение теоретических выкладок экспериментальными данными. Весьма ограничена информация о методах и технических средствах измерения КПД и о сопоставлении теоретических и экспериментальных результатов.

Активная мощность, потребляемая трансформатором в рабочем режиме, частично затрачивается на его нагревание. Эту часть мощности принято называть потерями в трансформаторе. Они включают в себя потери: – холостого хода (XX), затрачиваемые в основном на нагревание магнитопровода и частично одной из

обмоток током XX, а также на дополнительное нагревание изоляции от диэлектрических потерь;

– короткого замыкания (КЗ) или нагрузочные потери, расходуемые на нагревание обмоток током нагрузки.

Потери холостого хода считаются условно постоянными, не зависят от тока нагрузки и возникают в магнитной системе все время, когда трансформатор включен в сеть. Потери короткого замыкания изменяются с изменением тока и зависят от графика нагрузки агрегата [16]. Коэффициент полезного действия трансформаторов выше, чем КПД электродвигателей, что частично объясняется отсутствием механических потерь. Для больших трансформаторов мощностью в сотни кВА КПД может достигать 98–99%. Его определение возможно лишь косвенным методом, путем измерения потерь  $P_{xx}$ ,  $P_{кз}$  при известной номинальной мощности  $P_n$  [17]:

$$\eta = \frac{P_n}{P_n + P_{xx} + P_{кз}} \cdot 100\% \quad (1)$$

Для определения потерь XX проведен эксперимент, при котором на обмотку низшего напряжения (НН) подавалось напряжение, близкое к номинальному, а выводные концы обмотки высшего напряжения (ВН) были разомкнуты. Измеренный потребляемый ток – это ток холостого хода  $I_{xx}$ . Для определения потерь КЗ напряжение ( $U_{кз}$ ) в обмотке ВН плавно увеличивается, при этом обмотка НН замкнута накоротко. Напряжение, при котором токи в фазах обмотки ВН достигают номинальных значений, есть напряжение короткого замыкания  $E_{кз}$ , %:

$$E_{кз} = \frac{U_{кз}}{U_n} \cdot 100\% \quad (2)$$

где  $U_{кз}$  – напряжение, поданное в обмотку ВН при опыте КЗ;  $U_n$  – номинальное напряжение трансформатора.

Представленная методика определения КПД является общепринятой. Она рассматривается в учебных пособиях, принимается за основу при рассмотрении условий достижения максимума КПД при различной нагрузке [11]. Степень достоверности получаемых результатов, как правило, не оценивается и не подвергается сомнению. Это обусловлено тем, что экспериментальное исследование КПД, несмотря на простоту опытов XX и КЗ, на промышленных трансформаторах проводится редко. Необходимые отключения трансформаторов требуют серьезных согласований, поэтому эксперименты проводятся во время плановых отключений оборудования (если вообще проводятся).

Целью представленной публикации являются расчет фактического КПД силового трансформатора на основе измерения потерь XX и КЗ и анализ энергетических характеристик трансформаторов с длительными сроками эксплуатации.

#### ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В качестве испытуемого выбран масляный трансформатор ТМ-1000, установленный на насосной 5А центральной вентиляторной станции ПАО «ММК». Паспортные данные представлены в табл. 1, год выпуска трансформатора 1956.

Таблица 1

Паспортные характеристики трансформатора ТМ-1000/10

Номинальные параметры				Потери холостого хода, кВт	Потери короткого замыкания, кВт	Ток холостого хода, %	Напряжение короткого замыкания, %	Схема и группа соединения обмоток
Мощность, кВА	Высшее напряжение, кВ	Низшее напряжение, кВ	Ток, А					
1000	10	0,4	57,7/1445	1,9	12,2	1,7	5,69	Y/Y <sub>0</sub> -12

Данный трансформатор работает параллельно с другим аналогичным трансформатором. Характер нагрузки постоянный, загрузка на каждый агрегат не более 60%. Ежегодно данные трансформаторы проходят техническое обслуживание, которое включает протяжку болтовых соединений, ревизию контрольной аппаратуры, доливку масла, измерение сопротивления изоляции и сопротивления обмоток постоянному току.

**Методика и результаты измерений**

Эксперимент по определению потерь в трансформаторе проводился по методу двух ваттметров [18]. Замеры проводились измерительным комплектом К-540, подключенным по схеме, представленной на рис. 2. Описание прибора К-540 представлено в документации [19]. Он обеспечивает измерение напряжения, тока и мощности в каждой фазе трех- либо четырехпроводной сети. Потребляемая мощность (в том числе мощность холостого хода) определяется путем суммирования показаний ваттметров W1 и W2.

В процессе измерения потерь проведены опыты холостого хода и короткого замыкания. Измерения токов, напряжений и потребляемой мощности произведены 5–6 раз, разброс значений составил не более 0,5%. Очевидно, что такой разброс не вносит существенных изменений в результаты расчета КПД (не более 0,02%). Поэтому для расчетов приняты средние значения тока I, фазного U<sub>ф</sub>, линейного U<sub>л</sub> напряжений и мощности W, приведенные в табл. 2. Получены следующие средние значения:

- напряжение короткого замыкания E<sub>к</sub> = 4,99%;
- ток холостого хода I<sub>хх</sub> = 6,5% номинального.

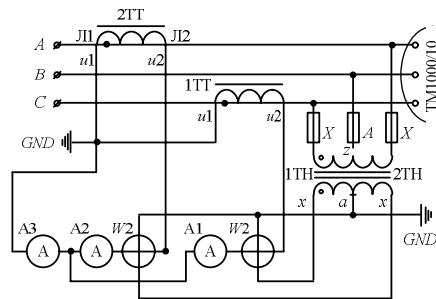


Рис. 2. Схема измерений по методу двух ваттметров (косвенное включение приборов)

Таблица 2  
Средние значения токов, напряжений и потребляемой мощности

Значение	Опыт XX (U <sub>ном</sub> )		Опыт КЗ (U <sub>ном</sub> )	
	Фаза А	Фаза С	Фаза А	Фаза С
U <sub>ф</sub> , В	232	232	288	288
W, Вт	6900	-1200	4200	4200
I, А	92,25	95,25	57,75	57,75
U <sub>л</sub> , В	401,84	401,84	498,83	498,83

**Обработка экспериментальных данных**

Потери в трансформаторе определяются как арифметическая сумма показаний ваттметров в фазах А и С. Полученные значения потерь КЗ и напряжения E<sub>к</sub> приводились к температуре 75°С по формулам [20]:

$$P_{к75} = \frac{310P_{к3}}{235 + Q_{эм}},$$

$$E_{к75} = \sqrt{E_k^2 + \left[\frac{P_{к3}}{10P_n}\right]^2 \cdot \left(\frac{310P_{к3}}{235 + Q_{эм}}\right)^2} - 1, \quad (3)$$

где Q<sub>эм</sub> – фактическая температура (22°С); E<sub>к75</sub> – фактическое значение U<sub>к</sub> при температуре 75°С.

Результаты обработки экспериментальных данных приведены в табл. 3. Токи и напряжения определяются как средние значения фактических величин в фазах А и С, полученных при замерах. При расчете КПД трансформатора по формуле (1) получено значение η=98,44%.

В каталогах основных российских производителей «Тольяттинский трансформатор», «СВЭЛ» и др. потери XX для новых трансформаторов ТМ 1000 варьируются от 1 до 2 кВт, а потери КЗ – от 10 до 12 кВт. Значения КПД новых трансформаторов, полученных по формуле (1), составляют 98,6–98,9%. Следует отметить, что потери XX и КЗ для сухих трансформаторов 1000 кВА (ТС-1000, ТС3-1000, ТС3Л-1000 и т.д.) имеют примерно такие же значения. Таким образом, снижение КПД трансформатора за 60 лет эксплуатации составило около 0,5%.

Если сопоставить потери электроэнергии для испытываемого трансформатора и аналогичного нового при коэффициенте загрузки 0,8 и коэффициенте использования 0,9, то потери в старом агрегате составляют 93392 кВт·ч/год, аналогичные потери в новом – 81993 кВт·ч/год. Разница составляет около 12 %.

Таблица 3

Результаты обработки экспериментальных данных

Эксперимент	U <sub>фср</sub> , В	I <sub>ср</sub> , А	U <sub>лср</sub> , В	P <sub>хх</sub> , Вт	P <sub>кз</sub> , Вт	P <sub>кз75</sub> , Вт	E <sub>к75</sub> , %
XX	232	93,75	401,84	5700	8400	10 132,30	3,37
КЗ	288	57,75	498,83				

**Выводы по результатам замеров**

1. Экспериментально установлено, что в трансформаторе ТМ-1000 наблюдается увеличение потерь ХХ, что указывает на старение железа магнитопровода. За счет этого происходит снижение КПД в сравнении с паспортными данными, однако это снижение не является критичным.

2. Напряжение короткого замыкания составляет 5,69 %, что выше значения, указанного в паспорте трансформатора (3,37%). Известно, что чем меньше  $E_{кз}$ , тем больше рассеяние в магнитопроводе. Это вызывает увеличение потерь в конструкции и падение напряжения в обмотках. Следствием является снижение КПД и мощности, отдаваемой трансформатором.

3. Экспериментальные исследования показали, что фактический КПД трансформатора ТМ-1000/10, имеющего большой срок эксплуатации, при ежегодном текущем ремонте и обслуживании на 0,2–0,4 % ниже паспортных значений современных аналогичных трансформаторов. Это не является критическим с точки зрения продолжения его эксплуатации.

**Сравнительный анализ результатов**

Общий вывод, который следует по результатам приведенного и других обследований, выполненных на трансформаторах различной мощности на различные первичные напряжения: с ростом продолжительности эксплуатации трансформатора снижается КПД и возрастают потери как непосредственно в трансформаторе, так и электрической сети. В значительной степени это происходит вследствие увеличения составляющей потерь холостого хода  $P_{хх}$ .

Результаты проведенных замеров с достаточной точностью соответствуют материалам, опубликованным другими авторами. Так, в публикации [21] со ссылкой на работы [22–24] отмечается существенное возрастание «условно постоянных» потерь в период эксплуатации. Предложены эмпирические зависимости для вычисления потерь мощности холостого хода. Для трансформаторов с первичным напряжением 10(6) кВ такая зависимость имеет вид

$$\Delta P_{x,10(6)} = \Delta P_{x,пасп} \left( 1 + \frac{T_{эл}^{1,0935} - 25,32}{100} \right), \quad (4)$$

где  $\Delta P_{x,10(6)}$  и  $\Delta P_{x,пасп}$  – фактические и паспортные потери мощности холостого хода;  $T_{эл}$  – срок эксплуатации  $i$ -го трансформатора.

Второй причиной увеличения потерь, со ссылкой на исследования [25, 26], назван капитальный ремонт с расшивкой магнитопровода. Потери мощности холостого хода трансформатора на напряжение 10(6)/0,4 кВ мощностью до 630 кВА, обусловленные сроком эксплуатации  $T_{эл}$ , с учетом капитального ремонта предлагается вычислять по зависимости

$$\Delta P_{x,э,рем} = \Delta P_{x,пасп} \times \left( 1 + \frac{T_{эл}^{1,0935} - 25,32 + 82,2S_{ТН}^{0,19}}{100} \right), \quad (5)$$

где  $\Delta P_{x,э,рем}$  – увеличение потерь холостого хода вследствие ремонта;  $S_{ТН}$  – номинальная мощность, кВА.

В работе [21] также представлены эмпирические выражения для вычисления потерь холостого хода в трансформаторах на напряжения 35 и 110 кВ. На рис. 3 приведены зависимости, подтверждающие увеличение потерь относительно паспортных значений в период эксплуатации до 45 лет.

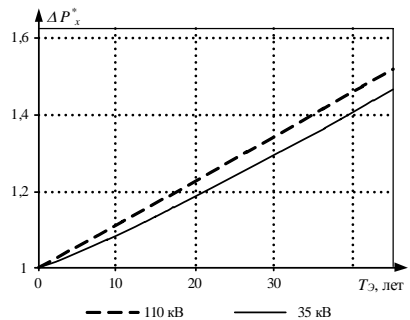
На основании проведенных исследований предложена корректировка методик расчета нормативных потерь с учетом указанных изменений. В этом случае расчет выполняется не по паспортным данным, а по фактическим потерям холостого хода, которые определяются путем замеров, аналогичных рассмотренным выше. В результате обеспечивается повышение точности нормирования потерь.

В публикации [27] также отмечается рост потерь холостого хода вследствие старения трансформаторов. Показано, что потери ХХ в силовых трансформаторах ОАО «Тольяттинский трансформатор» за 18 лет эксплуатации увеличились на 5,65–6,25%. Основными причинами названы:

- ухудшение свойств стали вследствие периодического нагрева магнитопровода; это вызвано потерями на перемагничивание сердечников и выделением тепла намагничивающими обмотками;
- механические воздействия вследствие вибрации, коротких замыканий, а также при ремонтах; такой вид воздействий характерен для электротечных трансформаторов, работающих с ударной нагрузкой во время расплава металла;
- причины, обусловленные износом электротехнических материалов.

В табл. 4 приведены потери холостого хода в трансформаторе ТМ 250/10 городской электрической сети г. Шуя (Ивановская обл.) со сроками службы  $T_{эл}$  от 2 до 34 лет [27]. Средний срок эксплуатации в выборке 21,6 года.

Здесь  $\Delta P_{xx}^* = \frac{P_{xx,реал} - P_{xx,пасп}}{P_{xx,пасп}}$  – процентное отношение реального значения потерь холостого хода  $P_{xx,реал}$  к паспортному  $P_{xx,пасп}$  значению.



**Рис. 3. Кривые изменения потерь мощности в магнитопроводах трансформаторов на напряжения 35 и 110 кВ в зависимости от срока эксплуатации**

Таблица 4

Потери холостого хода трансформаторов ТМ 250/10 при различных сроках эксплуатации ( $\Delta P_{xx,мес} = 820$  Вт)

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$T_{сл}$ , лет	34	32	31	29	28	25	24	19	18	16	12	11	2
$\Delta P_{xx}$ , Вт	1140	998	902	998	909	999	841	619	798	798	959	879	519
$\Delta P_{xx}^{\%}$	39,0	21,7	10,0	21,7	10,9	21,8	2,56	-24,5	-2,7	-2,7	17,0	7,2	-36,7

Потери холостого хода в трансформаторе со сроком эксплуатации 34 года в 2,2 раза выше потерь XX трансформатора, работающего 2 года, и в 1,4 раза выше паспортных потерь XX. На основании анализа выборки сделан вывод, что изменение потерь вследствие старения может достигать 30–50%. Изменение потерь XX в трансформаторах со сроком службы  $T_{сл}$  более 20 лет предложено описывать линейной зависимостью

$$\Delta P_{xx} = A + BT_{сл}$$

Коэффициенты уравнения  $A, B$  приведены в [27]. График этой зависимости и разброс результатов замеров представлены на рис. 4.

Важным мероприятием по повышению КПД за счет уменьшения потерь холостого хода является замена недогруженных трансформаторов на трансформаторы меньшей мощности. Вторым доступным способом является замена действующих трансформаторов с целью перераспределения их загрузки. При этом суммарная установленная мощность и потери XX остаются неизменными. Положительный эффект достигается за счет снижения нагрузочных потерь.

В публикации [28] на основании обработки большого количества замеров предложены эмпирические зависимости потерь холостого хода от срока эксплуатации. На рис. 5 представлены обобщенные графики для трансформаторов на напряжения 110, 220 и 500 кВ.

Автором сделан вывод, что представленные данные не согласуются с распространенной точкой зрения, согласно которой в процессе эксплуатации потери холостого хода изменяются незначительно. Многие специалисты утверждают, что они не являются критическими при определении срока эксплуатации трансформатора.

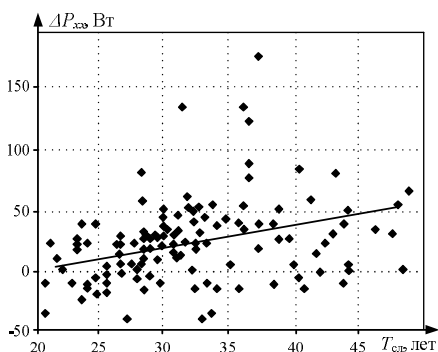


Рис. 4. Разброс значений мощности потерь холостого хода в трансформаторах ТМ-100/10

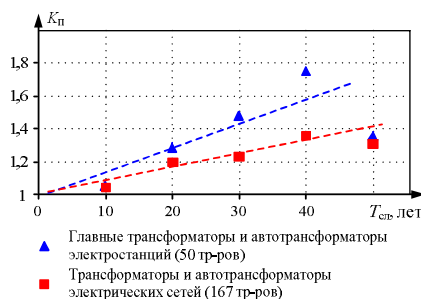


Рис. 5. Сводные данные по изменению потерь XX в трансформаторах на различных напряжениях

Однако из представленных зависимостей следует, что скорость увеличения потерь XX у трансформаторов электростанций составляет 1,3 % в год, а у трансформаторов электрических сетей – около 0,8 % в год. При этом отмечается, что с учетом особенностей режимов конкретных трансформаторов эти значения могут быть существенно выше. Вероятно, что этот вывод напрямую относится к печным трансформаторам ввиду сложности их эксплуатационных режимов. Однако этот вопрос требует дополнительных исследований.

Также автор [28] утверждает, что при номинальных параметрах потери холостого хода составляют около 20 %, а потери короткого замыкания – около 80% суммарных потерь. Однако нагрузка трансформаторов редко достигает номинальных значений. В электрических сетях их среднегодовая нагрузка, как правило, не превышает 60 % номинальной. Нагрузка трансформаторов ответственных агрегатов (шехов) металлургического предприятия может быть еще ниже и составлять 30-50 % номинальной. Это обусловлено жестким требованием непрерывности производственного цикла, когда даже кратковременные отключения недопустимы. В ПАО «ММК» к таким структурным подразделениям относятся кислородно-конвертерный и электросталеплавильный цехи, собственные электростанции, кислородное производство и т.д. Ответственными агрегатами являются машины непрерывного литья заготовок, сталеплавильные печи, прокатные станы и другое основное оборудование.

Согласно п. 6.11 РД 34.45-51.300-97 «Объем и нормы испытаний электрооборудования» допускается увеличение потерь холостого хода по отношению к первоначальному значению на 30%. Однако на практике не принято выводить трансформаторы из эксплуатации при таком увеличении потерь, так как обычно все другие показатели находятся в пределах нормы.

На основании анализа составляющих суммарных потерь, определяющих нагрев трансформаторов, автором публикация [28] сделаны следующие выводы:

– средний срок службы главных трансформаторов электростанций оценивается в 45-50 лет;

– средний срок службы трансформаторов электрических сетей – 65-70 лет;  
 – срок службы конкретного трансформатора определяется особенностями режимов его работы и условий эксплуатации.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

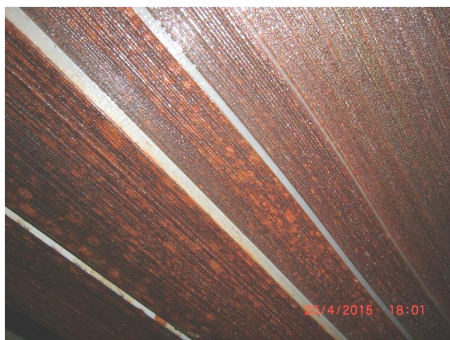
Проведенные исследования являются важными для служб эксплуатации ЦЭСиП и других подразделений ПАО «ММК», где периодически ставится вопрос о целесообразности замены тех или иных трансформаторов, находящихся в эксплуатации сверх нормативного срока. Справедливости ради следует заметить, что данный вопрос для сетевых трансформаторов, как правило, решается в пользу продолжения эксплуатации вплоть до полной выработки ресурса, заложенного заводом-изготовителем. Немаловажным фактором является высокое качество изоляции трансформаторов, изготовленных отечественной промышленностью в 50-60-е годы прошлого века. Это подтверждает состояние трансформатора, результаты обследования которого приведены выше.

Вопрос продления эксплуатации трансформаторов дуговых сталеплавильных печей и агрегатов «печь-ковш» требует отдельного рассмотрения. Они работают в жестких условиях резкопеременной нагрузки при отсутствии резервирования. Ударная несимметричная нагрузка, колебания напряжения и другие негативные факторы приводят не только к ускоренному старению изоляции обмоток и увеличению активных потерь, но и к перегревам магнитопроводов, что вызывает увеличение потерь холостого хода и снижение КПД.

В подтверждение сказанному на **рис. 6** представлены результаты визуального осмотра магнитопровода трансформатора ЭТЦНКВ – 40000/110-УХЛ-4, установленного на агрегате «печь-ковш №2» электросталеплавильного цеха (ЭСЦ) ПАО «ММК». На момент обследования трансформатор находился в эксплуатации около 10 лет. Очевидно, что показанные дефекты являются развивающимися. Они приводят к ухудшению магнитных свойств железа (**рис. 6, а, б**), нарушению креплений (**рис. 6, в**) и другим негативным факторам, вызывающим, в том числе, увеличение потерь в стали, которые уже нельзя считать «условно постоянными». Этот вопрос является сложным и вполне может составить предмет самостоятельных научных исследований.

В публикациях [29, 30] показано, что большая часть трансформаторов при правильной эксплуатации может находиться в эксплуатации значительно дольше нормативного срока. Необходимым условием продления их службы является своевременная усиленная диагностика технического состояния. В документах [31, 32] определен комплекс мероприятий, позволяющий обеспечить надежную эксплуатацию трансформаторов. Основными являются:

1. Контроль влагосодержания и концентраций газов, растворенных в масле.
2. Регистрация частичных разрядов в изоляции вводов, регуляторе напряжения под нагрузкой (РПН) и баке трансформатора.
3. Контроль деформаций обмоток средствами вибродиагностики.
4. Мониторинг насосов, вентиляторов системы охлаждения и протока охлаждающей жидкости.
5. Мониторинг теплового режима трансформатора и его отдельных систем. Он может осуществляться средствами тепловизионного контроля.



**а**



**б**



**в**

**Рис. 6. Дефекты основного магнитопровода печного трансформатора: следы ржавчины на железе (а), следы перегрева (б) и подгар стяжной шпильки магнитопровода (в)**

Наиболее эффективным, но относительно дорогостоящим решением, обеспечивающим эти виды диагностирования, является оснащение высоковольтных трансформаторов стационарными системами мониторинга технического состояния. В публикациях [33, 34] внедрение таких систем названо важнейшим условием реализации Smart Grid-технологий в промышленных электрических сетях. В публикациях [2, 35–37] рассмотрены системы on-line-мониторинга, внедренные на трансформаторах цеха сетей и подстанций и собственных электростанций ПАО «ММК». Работы [38–40] посвящены разработке и внедрению стационарных систем

мониторинга печных трансформаторов ЭСПЦ. При этом серьезное внимание уделяется разработке научной методологии диагностирования, локализации и идентификации неисправностей в on-line-режиме [41–45].

В целом, своевременное диагностирование состояния, ликвидация неисправностей на начальной стадии развития, помимо известных преимуществ, обусловленных снижением затрат на устранение последствий аварий, обеспечивает технико-экономический эффект, связанный с поддержанием высокого КПД и низких потерь электрической энергии в течение длительного срока эксплуатации трансформаторов.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Анализ повреждаемости силовых трансформаторов электростанций металлургического комбината / Е.А. Кузнецов, А.Я. Альбрехт, О.И. Карандаева, С.Л. Цемосевич // Известия вузов. Электромеханика. 2011. № 4. С. 82–85.
2. Николаев Н.А., Николаев А.А., Леднов Р.А. Диагностирование технического состояния трансформаторного оборудования как основа энергетической безопасности промышленного предприятия // Электротехнические системы и комплексы. 2014. № 4. С. 34–40.
3. Карандаева О.И. Характеристика повреждаемости сетевых и блочных трансформаторов ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». Вып. 16. 2011. № 34 (251). С. 15–20.
4. Киреева Э.А. К вопросу о старении силовых трансформаторов // Промышленная энергетика. 2004. №2. С. 14–16.
5. Дружинин В.В. Магнитные свойства электротехнической стали. М.: Энергия, 1974. 240 с.
6. Кургузова С.Н. К вопросу о старении магнитных систем силовых трансформаторов // Вестник ПГУ им. С. Торайгырова. Серия энергетическая. 2005. №1. С. 117–120.
7. Влияние «старения межленточной изоляции магнитопровода на энергетическую эффективность трансформатора при их эксплуатации сверх нормативного срока службы / Н.П. Бадалиев, В.О. Медведев, Ю.В. Молюкин, Е.А. Чашин // Вестник ИПОА. Электротехника, Энергетика. 2019, №1. С. 30–41.
8. Кургузова С.Н., Кургузов Н.Н. О влиянии срока службы трансформатора на показатели его экономической работы // Наука и техника Казахстана. 2005. №1. С. 60–63.
9. Фурсанов М.И., Петрашевич Н.С. Определение эффективности замены трансформаторов с длительным сроком эксплуатации // Известия вузов и энергетических объединений СНГ. Энергетика. 2014. №3. С. 13–19.
10. Петрашевич Н.С. Влияние параметров нагрузки на эффективность замены трансформаторов распределительных сетей // Известия вузов и энергетических объединений СНГ. 2013. № 4. С. 28–36.
11. Определение КПД трансформатора опытным путем. Коэффициент полезного действия трансформатора. URL: <https://sibay-rb.ru/energy-metering/determination-of-the-efficiency-of-the-transformer-by-practical-means-coefficient-of-useful-transformer-action.html>.
12. Грачева Е.И., Наумов О.В., Федотов Е.А. Влияние нагрузочной способности силовых трансформаторов на их эксплуатационные характеристики // Проблемы энергетики. 2017. Т. 19. № 7–8. С. 71–76.
13. Казаков Ю.Б., Фролов В.Я., Коротков А.В. Методика определения мощности потерь холостого хода трансформаторов с различным сроком службы // Вестник ИГЭУ. 2012. Вып. 1. С. 20–24.
14. Галимова А.А. Критерии выбора коэффициента загрузки силового трансформатора при проектировании подстанций распределительных сетей // Проблемы энергетики. 2013. №5–6. С. 66–71.

15. Костинский С.С. Обзор состояния отрасли трансформаторного производства и тенденций развития конструкции силовых трансформаторов // Проблемы энергетики. 2018. Т. 20. №1–2. С. 14–32. DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-1-2-14-32.
16. Тихомиров П.М. Расчет трансформаторов. М.: Энергоатомиздат, 1986. 8 с.
17. Кацман М.М. Электрические машины и трансформаторы. М.: Высш. шк., 1976. 181 с.
18. Испытание мощных трансформаторов и реакторов / Г.В. Алесенко, А.К. Ашратов, Е.В. Веремей, Е.С. Фрид. М.: Энергия, 1978. 95 с.
19. Измеритель параметров силовых трансформаторов К540-3. Руководство по эксплуатации К540-3-1.00.00.00PЭ. URL: <http://molnia-lab.ru/files/uploads/540-3-rossiya-20151491210778.pdf>.
20. Фарман С.А., Бун А.Ю., Райхлин И.М. Ремонт и модернизация трансформаторов. М.: Энергия, 1976. 412 с.
21. Красовский П.Ю. Расчет технологических потерь электроэнергии в силовых трансформаторах с учетом срока эксплуатации // Электрификация транспорта. 2015. №10. С. 74–80.
22. Казаков Ю.Б., Козлов А.Б., Коротков В.В. Учет изменения потерь холостого хода трансформаторов в период срока службы при расчете потерь в распределительных сетях // Электротехника. 2006. №5. С. 11–16.
23. Коротков А.В., Фролов В.Я. Методы оценки характеристик оборудования электротехнических комплексов городских распределительных сетей // Электрика. 2014. №1. С. 6–10.
24. Коротков, АВ., Фролов В.Я. Результаты измерений мощности потерь холостого хода трансформаторов с различным сроком службы // Электрика. 2011. № 8. С. 8–11.
25. Заугольников В.Ф., Балабин А.А., Савинов А.А. Некоторые аспекты экономической работы силовых трансформаторов // Промышленная энергетика. 2006. №4. С. 10–14.
26. Балабин А.А., Волчков Ю.Д. Повышение достоверности расчета потерь электроэнергии в трансформаторах 10(6)/0,4 кВ // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2009. №4. С. 22–23.
27. Грачева Е.И., Наумов О.В., Садиков Р.Р. Учет потерь холостого хода трансформаторов в период эксплуатации при расчете потерь электроэнергии в распределительных сетях // Проблемы энергетики. 2016. №1–2. С. 53–63.
28. Осотов В.Н. Практические аспекты оценки фактического срока службы силовых трансформаторов // Материалы III Научно-практической конференции «Контроль технического состояния оборудования объектов энергетики». Москва: ВВЦ, 2016. URL: <http://www.uraldiag.ru/UPLOAD/user/stati/prakticheskie-aspekty-otsenki-sroka-sluzhby-transformatorov.pdf>.
29. Львов М.Ю. Анализ повреждаемости силовых трансформаторов напряжением 110 кВ и выше // Электричество. 2010. №2. С. 27–31.
30. Khramshin V.R., Nikolayev A.A., Evdokimov S.A., Kondrashova Y.N., Larina T.P. Validation of Diagnostic Monitoring Technical State of Iron and Steel Works Transformers. Proceedings of the 2016 IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EIconRusNW). 2016. P. 596–600. DOI: 10.1109/EIconRusNW.2016.7448253.
31. Системы мониторинга силовых трансформаторов // Приложение к приказу ОАО «ФСК ЕЭС» от 18.04.2008 № 140 «Системы мониторинга силовых трансформаторов и автотрансформаторов. Общие технические требования». URL: <http://silovoytransformator.ru/stati/sistemy-monitoringa-silovyh-transformatorov.htm>.
32. Methodical directions for to diagnostic of mains transformers, the autotransformers, bypassing chokes and their feed-

- ings into MY 0634-2006. Concern «ROSENERGOATOM». URL: <http://leg.co.ua/knigi/oborudovanie/diagnostika>-transformatorov-i-shuntiruyuschih-reaktorov.htm.
33. Khramshin V.R., Evdokimov S.A., Nikolaev A.A., Nikolaev A.A., Karandaev A.S. Monitoring Technical State of the Power Transformers Is a Necessary Condition of the Smart-Grid Technolgy Introduction within the Industrial Electric Networks. Proceedings of the 2015 IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EIconRusNW). P. 214-220. DOI: 10.1109/EIconRusNW.2015.7102265.
  34. Evdokimov S.A., Karandaev A.S., Khramshin V.R., Kondrashova U.N., Nikolaev A.A. Monitoring and Diagnostics of the Electrical Equipment as a Component of the Smart Grid Technologies in the Industrial Electric Networks. Abstracts of the first international scientific conference "Science of the Future". URL: <http://www.p220conf.ru/abstracts/download/5-mech/437-s-karandaev>.
  35. Николаев А.А. Внедрение системы мониторинга технического состояния трансформатора 80 МВА энергоблока ТЭЦ ОАО «ММК» // Электротехнические системы и комплексы. 2016. №2(31). С. 52–57. DOI: 10.18503/2311-8318-2016-2(31)-52-57.
  36. Evdokimov S.A., Kondrashova Yu.N., Karandaeva O.I., Gallyamova M.S. Stationary System for Monitoring Technical State of Power Transformer. *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 150. P. 18-25. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.270.
  37. Совершенствование автоматизированных электроприводов и диагностика силового электрооборудования / И.А. Селиванов, А.С. Карандаев, С.А. Евдокимов, В.Р. Храмини, А.А. Шеметова, А.С. Евдокимов, А.А. Лукин, А.Ю. Андриошин, П.В. Шиляев, В.В. Головин, А.А.Титов, С.Е. Мостовой, С.А. Петряков // Известия вузов. Электромеханика. 2009. № 1. С. 5–11.
  38. Требования к системе мониторинга технического состояния трансформатора сверхмощной дуговой сталеплавильной печи / А.С. Карандаев, С.А. Евдокимов, А.А. Сарлыбаев, Р.А. Леднов // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2013. №2. С. 58–68.
  39. Information and Measuring System for Electric Arc Furnace Transformer Monitoring /A.S. Karandaev, S.A. Evdokimov, V.R. Khramshin, O.I. Karandaeva // 12th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE-2014). Novosibirsk. 2014. Vol. 1. P. 273-279. DOI: 10.1109/APEIE.2014.7040896.
  40. Разработка и внедрение интеллектуальных систем диагностирования технического состояния электрического оборудования / С.И. Лукьянов, А.С. Карандаев, С.А. Евдокимов, А.С. Сарваров, М.Ю. Петушков, В.Р. Храмини // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014. №1. С. 129–136.
  41. Radionov A.A., Karandaev A.S., Yachikov I.M., Karandaeva O.I., Gasyarov V.R. Power Transformer Condition Forecast with Time-series Extrapolation. Proceedings of the 9th International Conference on Computer and Automation Engineering (ICCAE 2017). Sydney, Australia. 2017. P. 326-330. DOI: 10.1145/3057039.3057106.
  42. Radionov A.A., Evdokimov S.A., Sarlybaev A.A., Karandaeva O.I. Application of subtractive clustering for power transformer fault diagnostics. *Procedia Engineering*, 129, 2015, pp. 22-28. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.12.003.
  43. Контроль технического состояния силовых трансформаторов методом акустического диагностирования / А.С. Карандаев, С.А. Евдокимов, О.И. Карандаева, С.Е. Мостовой, А.А. Чертоусов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». Вып. 10. 2008. №26(126). С. 26–31.
  44. Задачи многопараметрического диагностирования технического состояния силовых трансформаторов в системах on-line-мониторинга / А.С. Карандаев, И.М. Ячиков, В.Р. Храмини, А.А. Николаев // Известия вузов. Электромеханика. 2016. № 4(546). С. 65-73.
  45. Практическое применение статистической модели определения ресурса электрооборудования / А.С. Карандаев, И.М. Ячиков, Е.А. Храмини, А.А. Николаев, А.А. Николаев // Известия вузов. Электромеханика. 2018. Т. 61. № 3. С. 43-52.

Поступила в редакцию 14 октября 2019 г.

## INFORMATION IN ENGLISH

### ANALYSIS OF ELECTRIC LOSSES IN POWER TRANSFORMERS WITH LONG OPERATING LIFE

Nikolay N. Druzhinin

Production engineer, Central electro-technical laboratory, PJSC «Magnitogorsk Iron and Steel Works», Magnitogorsk, Russia. E-mail: druzhinin.nn@mmk.ru

Artur A. Sarlybaev

Ph.D. (Engineering), Manager of the planning and reliability department, Steel Service-2 shop, United Service Company LLC, Magnitogorsk, Russia. E-mail: sarlybaev.aa@usc-service.ru

Ekaterina A. Khramshina

Research officer, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Olga I. Karandaeva

Ph.D. (Engineering), Research officer, South-Ural State University, Chelyabinsk, Russia.

The paper is concerned with the importance of investigating the influence of the operation life of transformers on their energy characteristics. This problem is really pressing for all the network transformers of the PJSC “Magnitogorsk Iron and Steel Works” (PJSC “ММК”) as a significant number of them have been in operation for 50 years of even longer. The literature review carried out by the research group revealed that in most cases the information about energy characteristics and about the

transformer efficiency is obtained from the calculations based on the certified values of the idling losses and short-circuit losses. The research group noted the efficiency of experimental determination of the transformer efficiency on the basis of the idling losses and short-circuit losses. An experiment was carried out to calculate electric losses by power measurement using the two-wattmeter method. The connection diagram of the measuring device was considered. The assessment was given to the



influence of the power measurement accuracy on the calculation of the transformer efficiency, which has been in operation for more than 60 years. The results of experimental data processing are presented. The investigations confirmed the insignificant increase of iron losses and the decrease of the transformer performance by about 0.5%. This confirms the possibility of making use of transformers for longer periods than the normative period if timely maintenance work and scheduled repairs are provided. The authors carried out the analysis of the obtained results and compared them with the materials published by other scientists. They stressed the need to take into account the increase in iron losses when the service life exceeds 20 years. The paper also provides recommendations on improving of the maintenance service by means of installation of on-line state monitoring systems.

**Keywords:** power transformer, service life, performance, electric losses, experiment, literature review, statistics, maintenance service, on-line monitoring, recommendations.

REFERENCES

1. E.A. Kuznetsov, A.Ya. Albrekht, O.I. Karandaeva, S.L. Tsemoshevich. Analysis of Power Transformer Damage Rate at Electric Power Stations of a Metallurgical Enterprise // *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika* [Proceedings of Universities. Известия вузов. Electrical engineering]. 2011, no. 4, pp. 82–85. (In Russian)
2. Nikolaev N.A., Nikolaev A.A., Lednov R.A. Diagnostics of transformer technical state as a basis for security of energy supply of an industrial enterprise // *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2014, no. 4, pp. 34–40. (In Russian)
3. Karandaeva O.I. Damage rate characteristics of network and main transformers of OJSC “Magnitogorsk Iron and Steel Works” // *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya “Energetika”* [Bulletin of the South-Ural State University. Series “Power engineering”]. Issue 16, 2011, no. 34(251), pp. 15–20. (In Russian)
4. Kireeva E.A. Deterioration of power transformers // *Promyshlennaya energetika* [Industrial power engineering]. 2004, no. 2, pp. 14–16. (In Russian)
5. Druzhinin V.V. *Magnitnye svoystva elektrotekhnicheskoi stali* [Magnetic properties of electrical steel]. M.: Energy, 1974. 240 p. (In Russian)
6. Kurguzova S.N. Deterioration of magnetic structure of power transformers // *Vestnik PGU im. S.Toraygyrova. Seriya energeticheskaya* [Bulletin of Toraygyrov PSU. Series: Energy]. 2005, no. 1, pp. 117–120. (In Russian)
7. Badalyan N.P., Medvedev V.O., Molokin Yu.V., Chascshin E.A. Influence of deterioration of interlayer isolation of magnetic core on energy efficiency of transformers when they are in operation beyond the standard operation time // *Vestnik NPUA. Elektrotekhnika. Energetika* [Bulletin of NPUA. Electrical engineering. Power engineering], 2019, no. 1, pp. 30–41. (In Russian)
8. Kurguzova S.N., Kurguzov N.N. Influence of transformer service life on characteristics of its cost-effective performance // *Nauka i tekhnika Kazakhstana* [Science and engineering of Kazakhstan]. 2005, no. 1, pp. 60–63. (In Russian)
9. Fursanov M.I., Petrashevich N.S. Determination of replacement efficiency of transformers with long service life // *Izvestiya vuzov i energeticheskikh ob'yedineniy SNG. Energetika*. [Proceedings of universities and energy associations of CIF. Power engineering]. 2014, no. 3, pp. 13–19. (In Russian)
10. Petrashevich N.S. Influence of load parameters on the efficiency of replacement of distribution transformers // *Izvestiya vuzov i energeticheskikh ob'yedineniy SNG. Energetika*. [Proceedings of universities and energy associations of CIF. Power engineering]. 2013, no. 4, pp. 28–36. (In Russian)
11. Calculation of transformer efficiency empirically. Transformer efficiency. URL: [https://sibay-rb.ru/energy-](https://sibay-rb.ru/energy-metering/determination-of-the-efficiency-of-the-transformer-by-practical-means-coefficient-of-useful-transformer-action.html)

- metering/determination-of-the-efficiency-of-the-transformer-by-practical-means-coefficient-of-useful-transformer-action.html
12. Gracheva E.I., Naumov O.V., Fedotov E.A. Influence of output capacity of power transformers on their production characteristics // *Problemy energetiki* [Issues of power engineering], 2017, vol. 19, no. 7-8, pp. 71–76. (In Russian)
13. Kazakov Yu.B., Frolov V.Ya., Korotkov A.V. Method of idling loss power calculation for transformers with different service life // *Vestnik IGEU* [Bulletin of IGEU]. 2012, Issue 1, pp. 20–24. (In Russian)
14. Galimova A.A. Selection criteria of load factor of power transformer in the design process of distributing mains substations // *Problemy energetiki* [Issues of power engineering]. 2013, no. 5-6, pp. 66–71. (In Russian)
15. Kostinskiy S.S. Review of the state of transformer production and development trends of power transformer design // *Problemy energetiki* [Issues of power engineering]. 2018, vol. 20, no. 1-2, pp. 14–32. DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-1-2-14-32 (In Russian)
16. Tikhomirov P.M. *Raschet transformatorov* [Design of transformers]. Moscow: Energoatomizdat, 1986. 8 p. (In Russian)
17. Katsman M.M. *Elektricheskie mashiny i transformatory* [Electrical machines and transformers]. Moscow: High school, 1976. 181 p. (In Russian)
18. Alekseenko G.V., Ashryatov A.K., Veremey E.V., Frid E.S. *Ispytaniya moschnykh transformatorov i reaktorov* [Testing of power transformers and reactors]. Moscow: Energy, 1978. 95 p. (In Russian)
19. *Izmeritel parametrov silovykh transformatorov K 540-3*. [Measuring instrument of K540-3 power transformer parameters] Operations manual K540-3-1.00.00.00RE. URL: <http://molnia-lab.ru/files/uploads/540-3-rossiya-20151491210778.pdf> (In Russian)
20. Farban S.A., Bun A.Yu., Raikhlin I.M. *Remont i modernizatsiya transformatorov* [Repair and updating of transformers]. Moscow: Energy, 1976. 412 p. (In Russian)
21. Krasovskiy P.Yu. Calculation of process losses of electrical engineering in power transformers taking into account their service life // *Elektrifikatsiya transporta* [Electrification of transport], 2015, no. 10, pp. 74–80. (In Russian)
22. Kazakov Yu.B., Kozlov A.B., Korotkov B.B. Account of change in idling losses of transformers during operation in the process of loss calculation in distribution mains. Kazakov // *Elektrotekhnika* [Electrical engineering]. 2006, no. 5, pp. 11–16. (In Russian)
23. Korotkov A.V., Frolov V.Ya. Estimation methods of equipment of electrical complexes of urban distribution mains // *Elektrika* [Electrical engineering]. 2014, no. 1, pp. 6–10. (In Russian)
24. Korotkov A.V., Frolov V.Ya. Measurement results of idling loss power of transformers with different service life // *Elektrika* [Electrical engineering]. 2011, no. 8, pp. 8–11. (In Russian)
25. Zaugolnikov V.F., Balabin A.A., Savinkov A.A. Some aspects of efficient operation of power transformers // *Promyshlennaya energetika* [Industrial power engineering]. 2006, no. 4, pp. 10–14. (In Russian)
26. Balabin A.A., Yu.D. Volchko Improving the reliability of estimates of electric energy losses in 10(6)/0.4 kW transformers // *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya selskogo khozyaystva* [Mechanization and electrification of agriculture]. 2009, no. 4, pp. 22–23. (In Russian)
27. Gracheva E.I., Naumov O.V., Sadykov R.R. Accounting of idling losses of transformers during operating life in the process of calculation of electric energy losses in distribution mains // *Problemy energetiki* [Issues of power engineering], 2016, no. 1-2, pp. 53–63. (In Russian)
28. Osotov V.N. Practical aspects of assessment of the useful life of power transformers // *III Nauchno-prakticheskaya konferentsiya “Kontrol tekhnicheskogo sostoyaniya oborudovaniya ob'yektov energetiki”* [III Scientific conference “Technical state control of

- power engineering equipment”]. Moscow, VVTS, 2016. URL: <http://www.uradiag.ru/UPLOAD/user/stati/prakticheskie-aspekty-otsenki-sroka-sluzhby-transformatorov.pdf> (In Russian)
29. Lvov M.Yu. Analysis of damage rate of power transformers with the voltage of 100 kV and higher // *Elektrichesvo [Electricity]*. 2010, no. 2, pp. 27–31. (In Russian)
  30. Khramshin V.R., Nikolayev A.A., Evdokimov S.A., Kondrashova Y.N., Larina T.P. Validation of Diagnostic Monitoring Technical State of Iron and Steel Works Transformers. Proceedings of the 2016 IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (2016 EIConRusNW). 2016. P. 596-600. DOI: 10.1109/EIConRusNW.2016.7448253.
  31. *Sistemy monitoringa silovykh transformatorov* [Monitoring systems of power transformers] // Appendix to the order of the OJSC “FSK EES” dated 18.04.2008 no. 140 «Monitoring systems of power transformers and autotransformers. General technical requirements». URL: <http://silovoytransformator.ru/stati/sistemy-monitoringa-silovykh-transformatorov.htm>. (In Russian)
  32. Methodical directions for to diagnostic of mains transformers, the autotransformers, bypassing chokes and their feedings into IY 0634-2006. Concern «ROSENERGOATOM». URL: <http://leg.co.ua/knigi/oborudovanie/diagnostika-transformatorov-i-shuntiryusichih-reaktorov.htm>
  33. Khramshin V.R., Evdokimov S.A., Nikolaev A.A., Nikolaev A.A., Karandaev A.S. Monitoring Technical State of the Power Transformers Is a Necessary Condition of the Smart-Grid Technoly Introduction within the Industrial Electric Networks. Proceedings of the 2015 IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EIConRusNW), pp. 214-220. DOI: 10.1109/EIConRusNW.2015.7102265
  34. Evdokimov S.A., Karandaev A.S., Khramshin V.R., Kondrashova U.N., Nikolaev A.A. Monitoring and Diagnostics of the Electrical Equipment as a Component of the Smart Grid Technologies in the Industrial Electric Networks. Abstracts of the first international scientific conference “Science of the Future”. URL: <http://www.p220conf.ru/abstracts/download/5-mech/437-s-karandaev>.
  35. Nikolaev A.A. Introduction of technical state monitoring system of the 80 MVA transformer of the power generating unit of the combined heat power plant of the OJSC “MMK” // *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical systems and complexes], 2016, no. 2(31), pp. 52–57. DOI: 10.18503/2311-8318-2016-2(31)-52-57. (In Russian)
  36. Evdokimov S.A., Kondrashova Yu.N., Karandaeva O.I., Galiyamova M.S. Stationary System for Monitoring Technical State of Power Transformer. *Procedia Engineering*, 2016, vol. 150, pp. 18-25. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.270.
  37. Selivanov I.A., Karandaev A.S., Evdokimov S.A., Khramshin V.R., Shemetova A.A., Evdokimov A.S., Lukin A.A., Andryushin A.Yu., Shilyaev P.V., Golovin V.V., Titov A.A., Mostovoy S.E., Petryakov S.A. Improvement of automated electric drives and diagnostics of power electrical equipment // *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika*. [Proceedings of universities. Power engineering]. 2009, no. 1, pp. 5–11. (In Russian)
  38. Karandaev A.S., Evdokimov S.A., Sarlybaev A.A., Lednov R.A. Requirements to the technical state monitoring system of the transformer of the ultra-high power electric arc furnace // *Mashinostroenie: setevoy elektronnuy nauchniy zhurnal* [Machine-building: Internet scientific journal]. 2013, no. 2, pp. 58–68. (In Russian)
  39. Karandaev A.S., Evdokimov S.A., Khramshin V.R., Karandaeva O.I. Information and Measuring System for Electric Arc Furnace Transformer Monitoring // 12th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE-2014). Novosibirsk, 2014, vol. 1, pp. 273-279. DOI: 10.1109/APEIE.2014.7040896.
  40. Lukyanov S.I., Karandaev A.S., Evdokimov S.A., Sarvarov A.S., Petushkov M.Yu., Khramshin V.R. Development and introduction of intellectual diagnostics systems of the technical state of electrical equipment // *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Bulletin of Nosov MSTU], 2014, no. 1, pp. 129–136. (In Russian)
  41. Radionov A.A., Karandaev A.S., Yachikov I.M., Karandaeva O.I., Gasyarov V.R. Power Transformer Condition Forecast with Time-series Extrapolation. Proceedings of the 9th International Conference on Computer and Automation Engineering (ICCAE 2017). Sydney, Australia. 2017. P. 326-330. DOI: 10.1145/3057039.3057106.
  42. Radionov A.A., Evdokimov S.A., Sarlybaev A.A., Karandaeva O.I. Application of subtractive clustering for power transformer fault diagnostics. *Procedia Engineering*, 129, 2015, pp. 22-28. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.12.003.
  43. Karandaev A.S., Evdokimov S.A., Karandaeva O.I., Mostovoy S.E., Chertousov A.A. Technical state control of power transformers using the acoustic diagnostics method // *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya “Energetika”* [Bulletin of the South-Ural state university. Series “Power engineering”]. Issue 10, 2008, no. 26(126), pp. 26–31. (In Russian)
  44. Karandaev A.S., Yachikov I.M., Khramshin V.R., Nikolaev A.A. Aims of multiparameter diagnostics of technical state of power transformers in on-line monitoring systems // *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika* [Proceedings of universities. Electrical engineering]. 2016, no. 4 (546), pp. 65-73. (In Russian)
  45. Karandaev A.S., Yachikov I.M., Khramshina E.A., Nikolaev A.A., Nikolaev A.A. Practical application of the statistical model of determining the electrical equipment service life // *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika* [Proceedings of universities. Electrical engineering]. 2018, vol. 61, no. 3, pp. 43-52. (In Russian)

Анализ электрических потерь в силовых трансформаторах с длительным сроком эксплуатации / Н.Н. Дружинин, А.А. Сарлыбаев, Е.А. Храмшина, О.И. Карандаева // *Электротехнические системы и комплексы*. 2019. № 4(45). С. 64-73. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-4\(45\)-64-73](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-4(45)-64-73)

Druzhinin N.N., Sarlybaev A.A., Khramshina E.A., Karandaeva O.I. Analysis of Electric Losses in Power Transformers with Long Operating Life. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2019, no. 4(45), pp. 64-73. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-4\(45\)-64-73](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-4(45)-64-73)

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Аркулис Наталья Владимировна** – ведущий инженер, металлургический отдел, АО «Магнитогорский ГИПРОМЕЗ», г. Магнитогорск, Россия.

**Бабкин Сергей Энгелевич** – канд. физ.-мат. наук, научный сотрудник, лаборатория электромагнитных явлений, Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук, г. Ижевск, Россия.

**Балковой Николай Николаевич** – канд. техн. наук, ведущий инженер-конструктор, научно-исследовательский отдел автоматики, АО «НПЦ «Полус», г. Томск, Россия. E-mail: balkovoy.nn@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3214-2567>.

**Бобокалонов Фаридун Зайнидинович** – инженер-исследователь, Уральский энергетический институт, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия. E-mail: faridun.94@list.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8740-0303>.

**Бодров Евгений Эдуардович** – канд. техн. наук, доцент, кафедра электроники и микроэлектроники, Магнитогорский государственный технический университет им Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия. E-mail: forheartist@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7316-8213>.

**Бутаков Александр Николаевич** – начальник лаборатории, научно-исследовательский отдел автоматики, АО «НПЦ «Полус», г. Томск, Россия.

**Влацкая Людмила Анатольевна** – канд. техн. наук, доцент, кафедра электро- и теплоэнергетики, Оренбургский государственный университет, г. Оренбург, Россия. E-mail: l\_sem@mail.ru

**Воршевский Александр Алексеевич** – д-р техн. наук, доцент, профессор, кафедра электротехники и электрооборудования судов, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: grishakove@mail.ru.

**Вострокнутова Ольга Николаевна** – старший преподаватель, кафедра физики, институт естествознания и стандартизации, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия. E-mail: olvos@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8980-5865>.

**Гилемов Ильяр Галиевич** – аспирант, кафедра автоматизированного электропривода и мехатроники, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия. E-mail: gilemov.ig@outlook.com. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2481-3378>.

**Гришаков Евгений Сергеевич** – инженер 2-й категории, кафедра электротехники и электрооборудования судов, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: grishakove@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2002-6377>.

**Дружинин Николай Николаевич** – инженер-технолог, центральная электротехническая лаборатория, ПАО «ММК», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: druzhinin.nn@mmk.ru.

**Карандаева Ольга Ивановна** – канд. техн. наук, научный сотрудник, Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), г. Челябинск, Россия. E-mail: oikaran@mail.ru.

**Киртянов Николай Иванович** – ведущий инженер, отдел информационных технологий, АО «Магнитогорский ГИПРОМЕЗ», магистрант, кафедра прикладной математики и информатики, Магнитогорский государственный технический университет им Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия.

**Кривошеев Денис Артёмович** – инженер, отдел промышленных и киберфизических систем, ЗАО «КонсОМ СКС», магистрант, кафедра автоматизированных систем управления, Магнитогорский государственный технический университет им Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия.

**Лебедева Марина Юрьевна** – канд. физ.-мат. наук, научный сотрудник, лаборатория электромагнитных явлений, Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук, г. Ижевск, Россия.

**Логунова Оксана Сергеевна** – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой вычислительной техники и программирования, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия. E-mail: Logunova66@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7006-8639>.

**Лысенко Анастасия Александровна** – инженер, отдел инновационных разработок, ЗАО «КонсОМ СКС», магистрант, Магнитогорский государственный технический университет им Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия.

**Монастыренко Валерий Игоревич** – инженер-конструктор, ООО «Энергия-Источник», группа приборостроительных компаний ООО «Энергия-Источник» и ООО «ИТек ББМВ», г. Челябинск, Россия.

**Мурзин Павел Валерьевич** – старший преподаватель, кафедра автоматизированных электрических систем, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия. E-mail: p.v.murzin@urfu.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1593-9833>.

**Николаев Александр Аркадьевич** – канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой, кафедра автоматизированного электропривода и мехатроники, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия. E-mail: alexniko@inbox.ru. ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5014-4852>.

**Одинаев Исmoil Назримадович** – инженер-исследователь, Уральский энергетический институт, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия. E-mail: i.n.odinaev91@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2434-1929>.

**Паздерин Андрей Владимирович** – д-р техн. наук, профессор, заведующей кафедрой, кафедра автоматизированных электрических систем, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия. E-mail: a.v.pazderin@urfu.ru. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4826-2387>.

**Панов Александр Николаевич** – канд. техн. наук, доцент, начальник отдела инновационных разработок, ЗАО «КонСОМ СКС», заведующий кафедрой системной интеграции, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия. E-mail: panov.a@konsom.ru.

**Русскин Виктор Александрович** – инженер-конструктор III категории, научно-исследовательский отдел автоматизации, АО «НПЦ «Полус», г. Томск, Россия. E-mail: vrsskn@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9251-1761>.

**Савченко Юрий Иванович** – канд. физ.-мат. наук, заведующий кафедрой, кафедра физики, институт естествознания и стандартизации, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия. E-mail: sav@magtu.ru.

**Сарлыбаев Артур Азатович** – канд. техн. наук, менеджер группы по планированию и надежности, цех

Стальсервис №2, ООО «Объединённая сервисная компания», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: sarlybaev.aa@usc-service.ru.

**Семенова Наталья Геннадьевна** – д-р пед. наук, канд. техн. наук, доцент, профессор, кафедра автоматизированного электропривода, Оренбургский государственный университет, г. Оренбург, Россия. E-mail: ng\_sem@mail.ru.

**Сидоренко Никита Сергеевич** – аспирант, кафедра вычислительной техники и программирования, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия.

**Тяжелникова Лариса Юрьевна** – начальник отдела технической поддержки и развития MES-систем, ИТЦ «Аусферр», г. Магнитогорск, Россия.

**Усков Алексей Юрьевич** – главный конструктор, ООО «Энергия-Источник», группа приборостроительных компаний ООО «Энергия-Источник» и ООО «ИТЭК БМВ», г. Челябинск, Россия. E-mail: UskovAlexey@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7368-208X>.

**Храмшина Екатерина Александровна** – научный сотрудник, научно-исследовательский сектор, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия. E-mail: AED174@mail.ru.

**Цимбол Андрей Игоревич** – начальник конструкторского бюро, ООО «Энергия-Источник», группа приборостроительных компаний ООО «Энергия-Источник» и ООО «ИТЭК БМВ», г. Челябинск, Россия.

## 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.

С 26.03.2019 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 следующим научным специальностям:

05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты (технические науки);

05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы (технические науки);

05.09.10 – Электротехнология (технические науки);

05.09.12 – Силовая электроника (технические науки);

05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (по отраслям) (технические науки);

05.13.05 – Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления (технические науки);

05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отраслям) (технические науки);

05.13.18 – Математическое моделирование численные методы и комплексы программ (технические науки);

05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы (технические науки)

05.14.04 – Промышленная теплоэнергетика (технические науки).

### 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;
- информационное, математическое и программное обеспечение технических систем;
- 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.

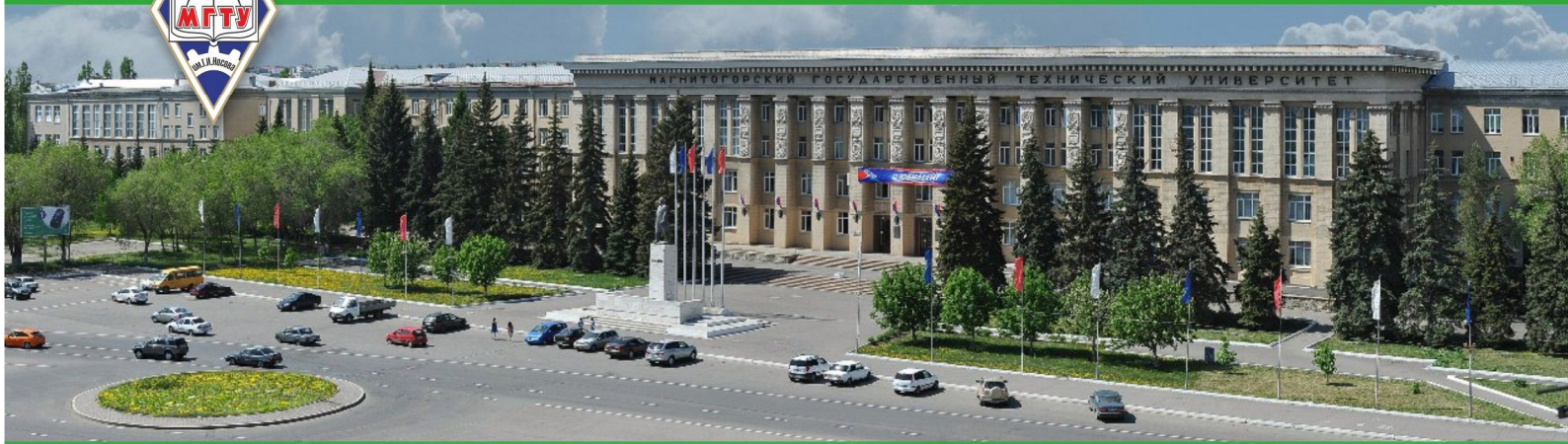
Статья должна быть набрана в шаблоне, который размещен на сайте журнала [esik.magtu.ru](http://esik.magtu.ru) в разделе «Руководство для авторов». Там же находится инструкция по его заполнению, в которой приведены требования к оформлению статей.

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, оформленная в соответствии с приведенными ниже требованиями;
- анкета (в электронном виде);
- экспертное заключение о возможности опубликования;
- лицензионный договор, подписанный одним автором от коллектива в двух экземплярах;
- согласие на обработку персональных данных на каждого автора





## 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.