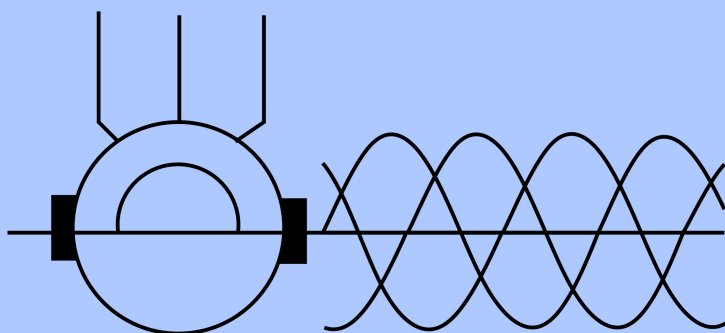
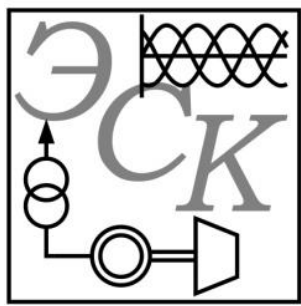


ISSN 2311-8318  
ISSN (online) 2658-3151

# **Электротехнические Системы и Комплексы**



**№4(41), 2018**



# ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

ИЗДАЕТСЯ С ЯНВАРЯ 1996 Г.

№ 4(41), ДЕКАБРЬ 2018

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

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

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

### Секция энерго- и ресурсосбережения:

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

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

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

### Секция электроснабжения:

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

**Ю.П. Журавлев** – канд. техн. наук,  
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. Ишиметьев** – д-р техн. наук,  
директор по стратегическому развитию  
ЗАО «КонсОМ СКС», г. Магнитогорск, Россия.

### Секция электротехнологий в промышленности:

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

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

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

### Секция мониторинга, контроля и диагностики электрооборудования:

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

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

### Технические редакторы:

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

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

© ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2018

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

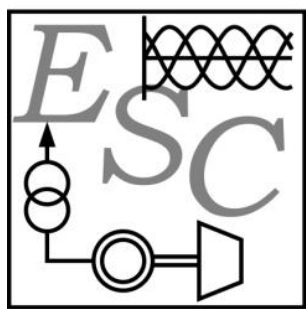
#### Адрес издателя:

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 26.12.2018. Заказ 447. Тираж 500 экз.  
Цена свободная.



# ELECTROTECHNICAL SYSTEMS AND COMPLEXES

PUBLISHED SINCE JAN., 1996

NO. 4(41) DEC, 2018

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.

### *Secton 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.

### *Secton of Power Engineerign:*

**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. Dzhagarov** – Professor, D.Sc. (Engineering),  
NVNA, Varna, Bulgaria.

### *Secton 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.

### *Secton of Electric Power Supply:*

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

**Yu.P. Zhuravlev** – Ph.D. (Engineering),  
MMK PJSC, Magnitogorsk, Russia.

### *Secton 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), director  
on strategic development, KonsOM SKS CJSC,  
Magnitogorsk, Russia.

### *Secton 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.

### *Secton of Monitoring, Diagnostics and Control of Electric Equipment:*

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

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

### Technical Editors:

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

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

© FSBEI HE NMSTU, 2018

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 – Nosov Magnitogorsk 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: 26.12.2018. Order 447. Circulation: 500.  
Open price.

## СОДЕРЖАНИЕ

|                                                                                                                                                                                                                                              |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>МОНИТОРИНГ, КОНТРОЛЬ И ДИАГНОСТИКА<br/>ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ .....</b>                                                                                                                                                                      | <b>4</b>  |
| <i>Брякин И.В., Бочкарев И.В., Храмин В.Р.</i><br>Разработка нового метода дефектоскопии электрических кабелей .....                                                                                                                         |           |
| <b>ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО<br/>ЭЛЕКТРОПРИВОДА .....</b>                                                                                                                                                                        | <b>11</b> |
| <i>Кислицын А.Л., Дунаев Д.И., Жирнов С.Н.</i><br>Исследование конденсаторного противовключения в режиме торможения асинхронного вибродвигателя...11                                                                                         |           |
| <i>Шабо К.Я.</i><br>Оптимизация системы комбинированного управления электроприводом при изменении нагрузки в функции положения рабочего органа .....                                                                                         |           |
| <i>Гасияров В.Р.</i><br>Согласование скоростей электроприводов и гидравлических нажимных устройств при автоматическом контроле профиля раската.....22                                                                                        |           |
| <b>ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ .....</b>                                                                                                                                                                                                                | <b>30</b> |
| <i>Коржов А.В., Кирпичникова И.М., Бухтояров В.Ф., Круглов Г.А.</i><br>Исследования распределения магнитного поля силового трёхжильного кабеля 6(10) кВ в рабочих и аварийных режимах с позиции электробезопасности .....                    |           |
| <i>Григорьев Н.П., Давыдов Ю.А., Парфианович А.П., Трофимович П.Н.</i><br>Снижение потерь электрической энергии в системе тягового электроснабжения переменного тока .....                                                                   |           |
| <b>ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА, АВТОМАТИКА<br/>И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ .....</b>                                                                                                                                                                   | <b>41</b> |
| <i>Козярук А.Е., Васильев Б.Ю., Шелудченко Е.Е., Мбуен В.</i><br>Исследование базовых алгоритмов модуляции системы управления двухуровневым инвертором .....                                                                                 |           |
| <i>Валиуллин К.Р.</i><br>Имитационное моделирование электротехнической системы уличного освещения .....                                                                                                                                      |           |
| <i>Ибрагим А.А., Мирошниченко А.А., Соломин Е.В., Гордиевский Е.М., Ковалев А.А.</i><br>Стратегия управления на основе отслеживания точки максимальной мощности асинхронного генератора двойного питания ветроэнергетической установки ..... |           |
| <b>ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ .....</b>                                                                                                                                                                                              | <b>63</b> |
| <i>Николаев А.А., Тулупов П.Г., Омельченко Е.Я.</i><br>Экспериментальные исследования гармонического состава токов и напряжений дуг мощной дуговой сталеплавильной печи шахтного типа .....                                                  |           |
| <b>ИНФОРМАЦИОННОЕ, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ<br/>ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ .....</b>                                                                                                                                                 | <b>73</b> |
| <i>Логунова О.С., Багаев И.И., Сидоренко Н.С., Логунов С.М., Егорова Л.Г.</i><br>Метод эффективной организации специализированного информационного обеспечения для системы автоматизированного управления технологическими процессами .....  |           |
| <b>СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ.....</b>                                                                                                                                                                                                              | <b>82</b> |

## CONTENT

|                                                                                                                                                                                                                    |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>MONITORING, DIAGNOSTICS AND CONTROL<br/>OF ELECTRIC EQUIPMENT.....</b>                                                                                                                                          | <b>4</b>  |
| <i>Bryakin I.V., Bochkarev I.V., Khramshin V.R.</i><br>Development of New Method of Non-destructive Testing of Electrical Cables.....4                                                                             |           |
| <b>THEORY AND PRACTICE OF AUTOMATED<br/>ELECTRIC DRIVE .....</b>                                                                                                                                                   | <b>11</b> |
| <i>Kislitsyn A.L., Dunaev D.I., Zhirnov S.N.</i><br>Studying of Condensing Opposite Connection in the Braking Mode of an Asynchronous Vibration Motor..... 11                                                      |           |
| <i>Shabo K.Ya.</i><br>Optimization of Combined Electric Motor Drive Control when Load Changes as a Function of the Position of the Working Element .....                                                           |           |
| <i>Gasiyarov V.R.</i><br>Coordination of Velocities of Electric Drives and Hydraulic Screw-down Structures in Automatic Control of Transfer Bar Cross-section .....                                                |           |
| <b>ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ .....</b>                                                                                                                                                                                      | <b>30</b> |
| <i>Korzhov A.V., Kirpichnikova I.M., Bukhtoyarov V.F., Kruglov G.A.</i><br>Safety-related Research of a 6 (10) kV Power Triple-core Cable Magnetic Field Distribution in Operational and Emergency Modes .....     |           |
| <i>Grigoriev N.P., Davydov Iu.A., Parfianovich A.P., Trofimovich P.N.</i><br>Reduction of Electric Energy Losses of Traction Power Supply System of Alternating Current..... 36                                    |           |
| <b>POWER ELECTRONICS, AUTOMATION<br/>AND CONTROL SYSTEMS .....</b>                                                                                                                                                 | <b>41</b> |
| <i>Kozyaruk A.E., Vasilev B.Yu., Sheludchenko E.E., Mbueen V.</i><br>Investigation of Basic Algorithms of Modulation of the Two-level Inverter Control System..... 41                                              |           |
| <i>Valiullin K.R.</i><br>Imitational Modeling of a Street Lighting System .....                                                                                                                                    |           |
| <i>Ibrahim A.A., Miroshnichenko A.A., Solomin E.V., Gordievsky E.M., Kovalev A.A.</i><br>Control Strategy for Maximum Power Point Tracking of Doubly Fed Induction Motor for a Wind Turbine..... 56                |           |
| <b>INDUSTRIAL ELECTRO TECHNOLOGY .....</b>                                                                                                                                                                         | <b>63</b> |
| <i>Nikolaev A.A., Tulupov P.G., Omelchenko E.Ya.</i><br>Experimental Analysis of Electric arc Current and Electric arc Voltage Harmonic Composition of Powerful Shaft Electric arc Furnace..... 63                 |           |
| <b>TECHNICAL SYSTEMS DATAWARE<br/>AND SOFTWARE .....</b>                                                                                                                                                           | <b>73</b> |
| <i>Logunova O.S., Bagaev I.I., Sidorenko N.S., Logunov S.M., Egorova L.G.</i><br>Method of Effective Organization of Specialized Information Support for Automated Control System of Technological Processes ..... |           |
| <b>INFORMATION ABOUT THE AUTHORS .....</b>                                                                                                                                                                         | <b>82</b> |

## МОНИТОРИНГ, КОНТРОЛЬ И ДИАГНОСТИКА ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

УДК 620.19

[https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-4\(41\)-4-10](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-4(41)-4-10)

Брякин И.В.<sup>1</sup>, Бочкарев И.В.<sup>2</sup>, Храмшин В.Р.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Институт автоматизации и информационных технологий Национальной академии наук Кыргызской Республики

<sup>2</sup> Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова

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

### РАЗРАБОТКА НОВОГО МЕТОДА ДЕФЕКТОСКОПИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КАБЕЛЕЙ

Описан новый метод неразрушающего контроля параметров электрических кабелей и проводов, который может быть использован как для выявления факта наличия и места расположения дефектов в их токопроводящих жилах, так и для определения конкретных параметров этого дефекта. При реализации предложенного метода используется квантово-механическая характеристика электронов, заключающаяся в поляризации спиновых магнитных моментов свободных электронов в электропроводящих материалах под воздействием внешнего переменного электрического поля. Указанное поле предложено формировать цилиндрическим конденсатором, состоящим из двух полуцилиндрических металлических электродов, расположенных коаксиально контролируемому кабелю. Область циркуляции спиновых магнитных моментов свободных электронов, выступая гармоническим осциллятором, посредством спин-спинового взаимодействия возбуждает в электропроводящей жиле бегущую волну поляризации спиновых магнитных моментов, которая, взаимодействуя с катушкой индукционного датчика, приводит к возникновению на концах этой катушки контрольного сигнала в виде переменной ЭДС. Параметры (амплитуда и фаза) этой ЭДС содержат информацию не только о геометрических характеристиках электропроводящих жил, но и о физико-химических свойствах их материала. Дефектоскопию проводят путем сравнения контрольного сигнала с опорным сигналом. Показана процедура формирования опорного сигнала в зависимости от задач дефектоскопии. Предложенный метод обеспечивает возможность проведения контроля жил кабелей и проводов из любых электропроводящих пара- и диамагнитных материалов.

**Ключевые слова:** формирователь переменного электрического поля, индукционный преобразователь проходного типа, бегущая волна поляризации спиновых магнитных моментов свободных электронов, контрольный и опорный сигналы, информационно-измерительная система.

#### ВВЕДЕНИЕ

Качество электрических проводов и кабелей однозначно определяет работоспособность и надежность любой системы электроснабжения [1, 2]. Поэтому совершенно очевидно, что прежде чем, например, монтировать кабель, необходимо достоверно оценить его качество. Для этого необходимо осуществить комплексный контроль его эксплуатационных параметров. Такой контроль должен проводиться не только в процессе производства кабеля, но и непосредственно перед его монтажом, поскольку в процессе хранения, транспортировки и размотки с бобины он может быть поврежден. Конечно, это незначительно, но увеличит стоимость и продолжительность работ. Но использование при монтаже кабеля с дефектами в обязательном порядке приведет к принципиально большим издержкам, обусловленным перебоем электроснабжения, поиском места повреждения, удалением и ремонтом поврежденного участка кабеля и т.п. Поэтому очевидно, что дополнительный контроль кабеля перед укладкой в полной мере окупится гарантированным исключением аварийных ситуаций.

Проведенный анализ показал, что, в основном, известные системы диагностики кабельно-проводниковой продукции направлены на контроль ее изоляции [3-7]. Да, конечно, изоляция является наиболее уязвимым элементом кабеля. Но при этом его основное функциональное назначение выполняют электропроводящие элементы. Поэтому работы, посвященные разработке новых систем диагностирования технического состоя-

ния именно этих основных элементов электрического кабеля, являются весьма актуальными и имеют практическую ценность.

Известные способы неразрушающего контроля используют различные физические явления [8]. Наибольшее применение получили способы тепловой [9], оптической [10, 11], акустической [12], электромагнитной [13, 14] и вихретоковой дефектоскопии [15, 16]. Однако они не позволяют осуществлять контроль технического состояния электрических кабелей в широком диапазоне контролируемых параметров. При этом каждый из известных способов имеет ограниченную область использования и зачастую требует применения достаточно сложного оборудования и трудоемкой обработки полученных выходных сигналов. Соответственно, они могут применяться, в основном, в заводских условиях или при лабораторных исследованиях кабельно-проводниковой продукции, а в полевых условиях их использование весьма затруднительно. Поэтому при разработке нового способа диагностики электропроводящих элементов кабеля была поставлена задача расширения области его применения и повышения точности и чувствительности контроля при обеспечении простоты его аппаратной реализации.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В результате проведенных исследований было получено, что достижение поставленной задачи при разработке нового способа диагностики кабелей можно осуществить на базе применения принципиально нового, не используемого ранее в системах неразрушающего контроля, физического эффекта, заключающегося в том, что при воздействии внешнего поля происходит

изменение собственного момента количества движения электронов в электропроводящих структурах. Использование этого эффекта позволяет расширить диапазон контролируемых параметров токопроводящих элементов кабеля при их дефектоскопии, а также повысить надежность контроля. При этом практическая реализация разработанного способа диагностики получается достаточно простой. Все это в целом приводит к расширению области его применения.

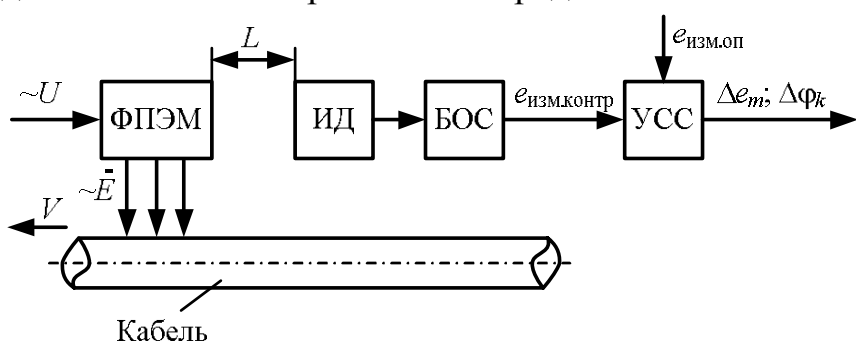
На **рис. 1** показана принципиальная схема реализации разработанного способа определения места дефекта электропроводящих элементов кабеля. На **рис. 1** обозначено: ФПЭМ – формирователь переменного электрического поля; ИД – индукционный датчик; БОС – блок обработки измерительного сигнала; УСС – устройство сравнения сигналов.

ФПЭМ выполнен в виде цилиндрического конденсатора с сосредоточенной емкостью (спиновый конденсатор СК), который состоит из двух полуцилиндрических металлических электродов, расположенных коаксиально контролируемому кабелю (**рис. 2, а**).

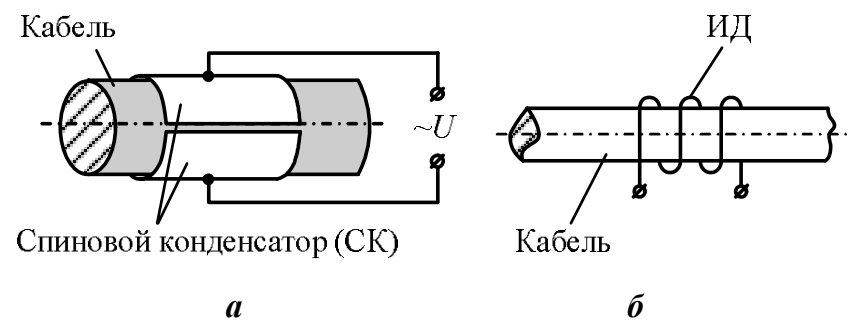
Индукционный датчик ИД выполнен в виде цилиндрической многослойной катушки индуктивности с ходом витков в осевом направлении, расположенной коаксиально кабелю, и представляет собой в сущности индукционный преобразователь проходного типа (**рис. 2, б**). Для повышения точности работы ИД он должен быть определенным образом позиционирован относительно ФПЭМ. Для этого его смещают на такое расстояние  $L$ , при котором поля рассеяния ФПЭМ не влияют на работу ИД (см. **рис. 1**). Это расстояние легко определить экспериментальным путем.

Для проведения дефектоскопии на электроды спинового конденсатора СК необходимо подать переменное напряжение  $\sim U$  (**рис. 2, а**). Тем самым в зоне контроля между электродами СК создается переменное электрическое поле  $\sim \bar{E}$ . Если в эту зону поместить кабель, то в его электропроводящих элементах будет возбуждаться физический процесс поляризации спинов магнитных моментов свободных электронов, причем этот процесс возникает как при перемещении кабеля, так и при его неподвижном состоянии. Этот процесс регистрируется индукционным датчиком ИД, который формирует измерительный сигнал в виде ЭДС индукции  $e_{\text{изм}}$ , параметры которого определяются параметрами электропроводящих элементов кабеля в зоне расположения ИД. Для подтверждения этого утверждения рассмотрим физические процессы, которые возникают в немагнитных электропроводящих элементах при воздействии на них электрического поля.

Традиционно для решения различного рода электротехнических задач в основном используется только одно свойство электрона – его заряд  $e$ .



**Рис. 1.** Блок-схема реализации разработанного способа



**Рис. 2.** Конструктивные исполнения ФПЭМ (а) и ИД (б)

В то же время электрон имеет еще одно свойство, сугубо квантово-механическую характеристику – собственный момент количества движения, или спин  $s$ . Этот собственный момент количества движения может иметь две ориентации относительно внешнего магнитного поля, направленного условно по оси  $\bar{Z}$ , такие, что две его возможные проекции по направлению этого поля будут принимать следующие значения [17]:

$$s_z = \pm \hbar/4\pi, \quad (1)$$

где  $\hbar$  – постоянная Планка.

Спину электрона (1) соответствует спиновый магнитный момент:

$$\bar{p}_s = g_s \bar{s}, \quad (2)$$

где  $g_s = -e/m$  – гиромагнитное отношение для спинового момента;  $e$  – абсолютная величина заряда электрона;  $m$  – масса электрона.

Покажем возможность использования спиновых эффектов свободных электронов в немагнитных металлических проводниках для контроля их физических свойств.

Известно, что электрическое поле оказывает силовое воздействие на электрический заряд, находящийся в покое или в движении. Фактически напряженность электрического поля  $E$  является силой, действующей на единичный электрический заряд.

$$\bar{F} = -e \cdot \bar{E}. \quad (3)$$

Под действием этой силы электрон, имеющий заряд  $e$  и массу  $m$ , получает ускорение, равное

$$\bar{a} = e \cdot \bar{E} / m, \quad (4)$$

а за время  $\Delta t$  между соударениями с поверхностями атомов приобретает дополнительную скорость  $\Delta v$ .

Если учесть, что  $\lambda$  есть расстояние, пробегаемое электроном между двумя столкновениями, а  $v_{\text{т.ср}}$  при этом является скоростью электрона, то величина этого промежутка времени будет равна

$$\Delta t = \lambda / v_{\text{т.ср}}.$$

Проводимость проводника  $\sigma$  тем больше, чем выше концентрация зарядов в единице объема металла  $n_e$ , чем больше величина заряда  $e$  и чем выше подвижность заряда  $\mu_e$ , т. е.

$$\sigma = n_e e \mu_e, \quad (5)$$

где  $\mu_e = \Delta v_q / E$ ;  $\Delta v_q = a t = E e \lambda / (m v_{\text{т.ср}})$  – скорость смещения электронов в направлении вектора напряженности электрического поля  $E$ .



С учетом последнего можем записать

$$\sigma = n_e e^2 \lambda / (m v_{\text{т.ср}}), \quad (6)$$

где  $n_e = dN_A/m_A$  – число электронов в единице объема проводника (плотность электронов проводимости);  $e$  – заряд электрона, равный  $1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл;  $d$  – плотность вещества;  $N_A$  – число Авогадро;  $m_A$  – атомная масса вещества.

Из анализа выражения (6) видно, что проводимость проводника  $\sigma$  является интегральным параметром, который выражает основные физические свойства материала проводника.

При отсутствии электрического поля свободные электроны в металле совершают хаотическое тепловое движение, т.е. имеют в пространстве равномерно распределенную ориентацию. Под действием электрического поля (3) хаотическое движение электронов в проводнике несколько упорядочивается, что проявляется в виде двух основных факторов: во-первых, электроны во время свободного пробега начинают ориентироваться по полю, т.е. направления траекторий их движения приобретают общую составляющую вдоль электрического поля; во-вторых, электроны приобретают некоторое ускорение в общем направлении вдоль поля, увеличивая скорость и тем самым свою кинетическую энергию. Следует отметить, что этот процесс возникает независимо от того, передвигается кабель или находится в состоянии покоя.

При рассмотрении второго свойства электрона (2), т.е. спинового магнитного момента, следует учитывать тот факт, что электрон ведет себя подобно вращающемуся вихревому кольцу, спин которого ориентирован по направлению движения электрона.

В обычных условиях спины свободных электронов с различной ориентацией компенсируют друг друга, но под воздействием электрического поля все электроны, в каком бы положении они ни находились, разворачивают свои оси так, что образуется некоторая общая составляющая проекций их спинов на направление вектора напряженности электрического поля  $\vec{E} = (0, E_y, 0)$ :

$$\bar{p}_{sy} = -\frac{e}{m} N \sum_{n=1}^N (\bar{s}_n \bar{k}_y), \quad (7)$$

где  $N = n_e V_{\text{раб}} \chi_s$  – эффективное число свободных электронов в рабочем пространстве  $V_{\text{раб}}$  спинового конденсатора, спины которых ориентированы в направлении единичного вектора  $\bar{k}_y$ ;  $\bar{k}_y$  – единичный вектор, совпадающий с направлением вектора напряженности электрического поля;  $\chi_s = |\bar{E}_y|/|\bar{E}_{y\text{эф}}|$  – коэффициент спиновой поляризации для конкретного типа материала проводника;  $|\bar{E}_y|$  – значение напряженности воздействующего электрического поля;  $|\bar{E}_{y\text{эф}}|$  – значение напряженности электрического поля, при котором происходит максимальная спиновая поляризация всех свободных электронов в единице объема материала проводника в направлении единичного вектора  $\bar{k}_y$ .

При подаче на электроды спинового конденсатора электрического напряжения вида  $U = U_m \cos \omega t$  (см. рис. 2, а) создается источник возбуждающего монохроматического переменного электрического поля:

$$\bar{E} = E_m \cos(\omega t + \varphi_E). \quad (8)$$

Под воздействием переменного электрического поля (8) определенной циклической частоты  $\omega = \omega_s$  (резонансная частота спинового взаимодействия) в объеме электропроводящего элемента кабеля, заключенного в рабочем пространстве  $V_{\text{раб}}$  спинового конденсатора, возбуждаются колебательные смещения свободных электронов в направлении вектора напряженности электрического поля с определенной колебательной скоростью:

$$\begin{aligned} \Delta \bar{v}_q &= -\int \frac{e}{m} E_m \cos(\omega_s t + \varphi_E) dt = \\ &= \frac{e}{\omega_s m} E_m \sin(\omega_s t + \varphi_E) = \Delta v_{qm} \sin(\omega_s t + \varphi_E), \end{aligned} \quad (9)$$

где  $\Delta v_{qm} = (e/\omega_s m) E_m$  – модуль колебательной скорости электрона.

В этом случае спиновые магнитные моменты всех свободных электронов внутренней структуры электропроводящего элемента в рабочем пространстве  $V_{\text{раб}}$  спинового конденсатора соответствующим образом синхронизируются частотой этого электрического поля, т.е. получают соответствующую периодически изменяющуюся одинаковую направленность. Фактически колебательная скорость электронов (9) приводит к периодической переориентации спинов электронов  $s_n$  ( $n = 1..N$ ), которая в итоге приводит к возникновению в рабочем пространстве  $V_{\text{раб}}$  спинового конденсатора соответствующей упорядоченной циркуляции суммарного спинового магнитного момента свободных электронов проводника. Существование подобной области спиновой циркуляции приводит к дальнейшей последовательно индуцированной спиновой поляризации свободных электронов в остальной структуре материала проводника.

Следует отметить, что в основе данного физического процесса лежит спин-спиновое взаимодействие, т.е. прямое взаимодействие спиновых магнитных моментов свободных электронов, пропорциональное произведению спиновых магнитных моментов и обратно пропорциональное кубу расстояния между ними [18]:

$$F_{si sj} = \frac{\bar{p}_{si} \bar{p}_{sj}}{r^3} \bar{r}, \quad (10)$$

где  $r \equiv |\bar{r}|$ ;  $\bar{r} = \bar{r}_i - \bar{r}_j$ .

Таким образом, под воздействием переменного электрического поля в рабочей зоне спинового конденсатора в структуре проводника кабеля формируется особая область спиновой циркуляции, функционирующая в режиме гармонического осциллятора с вынужденными колебаниями.

Для такого простейшего гармонического осциллятора можно записать уравнение вида

$$\frac{d^2 \bar{p}_s}{dt^2} - \omega_s^2 \cdot \bar{p}_s = Q(\bar{y}, t), \quad (11)$$

где  $Q(\bar{y}, t) = (-e E_m / m) \sin(\omega_s t + \varphi_E)$  – некоторая функция, характеризующая распределенные внешние воздействия.

Решая это неоднородное дифференциальное уравнение второго порядка с учетом резонансного режима работы гармонического осциллятора, получим следующее выражение:

$$\begin{aligned}\bar{p}_s &= p_{sm} \cos(\omega_s t + \varphi_s) = \\ &= -\frac{e}{m} \bar{s} \cos(\omega_s t + \varphi_s).\end{aligned}\quad (12)$$

В соответствии с уравнениями (7) и (12), для упорядоченной циркуляции суммарного спинового магнитного момента свободных электронов проводника в направлении оси  $\bar{x}$  составим следующее уравнение:

$$\begin{aligned}\bar{p}_{s\Sigma} &= \left[ \frac{e}{m} N \sum_{n=1}^N (\bar{s}_n \bar{k}_x) \right] \cos(\omega_s t + \varphi_s) = \\ &= p_{s\Sigma m} \cos(\omega_s t + \varphi_s),\end{aligned}\quad (13)$$

где  $p_{s\Sigma m} = [(e/m)N \sum_{n=1}^N (\bar{s}_n \bar{k}_x)]$  – амплитудное значение суммарного спинового магнитного момента свободных электронов в рабочем пространстве  $V_{\text{раб}}$  спиновой конденсатора.

Посредством данного гармонического осциллятора (13) возбуждается волновой процесс спиновой индукции с фазовой скоростью  $\bar{v} = \lambda f$  вдоль оси  $\bar{x}$  по всей длине электропроводящих элементов кабеля. В этом случае процесс возбуждения и распространения плоской гармоничной волны вдоль координатной оси  $\bar{x}$  описывается уравнением вида:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0. \quad (14)$$

С учетом выражения (14) в линейном приближении для распространения волнового процесса спиновой индукции можем записать:

$$\frac{\partial^2 \bar{B}_s}{\partial x^2} - k^2 \frac{\partial^2 \bar{B}_s}{\partial t^2} = 0. \quad (15)$$

Решением волнового уравнения (15) является следующее аналитическое выражение:

$$\bar{B}_s = B_{sm} \cos(\omega_s t - kx + \varphi_B), \quad (16)$$

где  $B_{sm} = p_{s\Sigma m} \eta_3 [1 - (\omega_s - \omega_0)/\omega_0]$  – амплитудное значение вектора спиновой индукции;  $\eta_3 = f(\sigma, \omega)$  – коэффициент эволюции волнового процесса спиновой индукции, отражающий эффективность преобразования энергии гармонического осциллятора в волновой процесс спин-спинового взаимодействия;  $k = i\omega \sqrt{\hat{\epsilon}_a \hat{\mu}_a} = [(1+i)/\sqrt{2}] \sqrt{\omega \mu_a \sigma}$  – коэффициент распространения волны при отсутствии магнитных потерь, т.е.  $\hat{\mu}_a = \mu_a$  – комплексная магнитная проницаемость материала проводника;  $\hat{\epsilon}_a = \epsilon_a - i\sigma/\omega \cong -i\sigma/\omega$  – комплексная диэлектрическая проницаемость материала проводника, т.е. при  $\sigma \gg \omega \epsilon_a$ ;  $\omega_0$  – граничная нижняя циклическая частота возбуждающего электрического поля, при которой  $\eta_3 = 0$ ;  $\omega_s \geq \omega_0$ .

В соответствии с (16) для потока спиновой индукции справедливо выражение:

$$\bar{\Phi}_s = \bar{B}_s S = S \cdot B_{sm} \cdot \cos(\omega_s t - kx + \varphi_B), \quad (17)$$

где  $S$  – среднее сечение проводника.

В основе рассматриваемого физического явления лежит тот факт, что электроны, взаимодействуя своими спиновыми магнитными моментами друг с другом по всей длине электропроводящего элемента кабеля, образуют своего рода пространственно распределенный вдоль этого элемента отрицательный заряд с волнообразно изменяющейся во времени спиновой поляризацией, образующей своего рода поток спиновой индукции (рис. 3).

Поток спиновой индукции (17), воздействуя на витки обмотки индукционного датчика, индуцирует в этой обмотке соответствующую ЭДС:

$$\begin{aligned}e_{\text{изм}} &= -w_k \frac{d\Phi_s}{dt} = \\ &= w_k \cdot \omega_s \cdot S \cdot B_{sm} \cdot \sin(\omega_s t - kx + \varphi_B).\end{aligned}\quad (18)$$

Обобщая вышесказанное и в соответствии с (18), можно констатировать следующее: 1 – переменное электрическое поле создает область спиновой циркуляции в рабочей зоне спиновой конденсатора; 2 – область циркуляции спиновых магнитных моментов свободных электронов, выступая гармоническим осциллятором, посредством спин-спинового взаимодействия возбуждает в примыкающих к ней структурах электропроводящего элемента кабеля бегущую волну поляризации спиновых магнитных моментов свободных электронов (поток спиновой индукции) и управляет ее дальнейшей эволюцией в структуре этого элемента по всей его длине; 3 – бегущая волна поляризации спиновых магнитных моментов свободных электронов (поток спиновой индукции), взаимодействуя с катушкой индукционного датчика, приводит к возникновению соответствующей выходной переменной ЭДС на концах этой катушки; 4 – параметры (амплитуда и фаза) регистрируемой выходной ЭДС  $e_{\text{изм}}$  обмотки индукционного датчика фактически несут информацию не только о геометрических характеристиках электропроводящих элементов кабеля, но и о физико-химических свойствах их материала.

Для создания необходимых условий для возникновения устойчивого процесса поляризации спиновых магнитных моментов свободных электронов переменное электрическое поле создают на резонансной частоте поляризации спиновых магнитных моментов свободных электронов структур электропроводящих элементов кабелей. Указанная частота переменного электрического поля определяется экспериментальным путем.

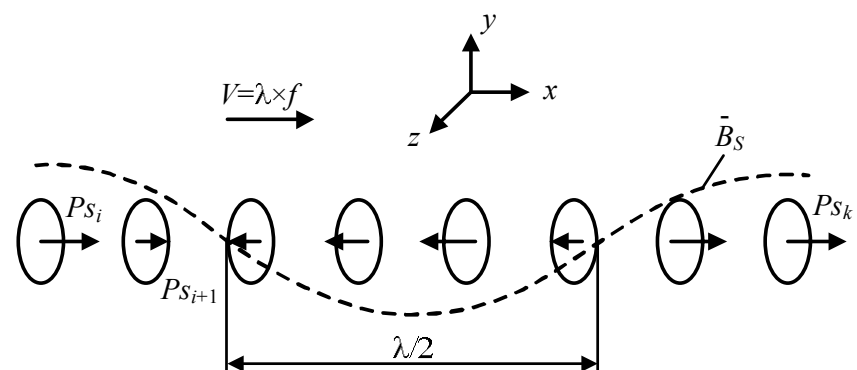


Рис. 3. Пространственное распределение потока спиновой индукции



ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

Предварительно необходимо сформировать опорный сигнал в виде ЭДС индукции  $e_{\text{изм.оп}}$ . Если проводится процесс отбраковки неисправного кабеля, при котором необходимо зафиксировать только сам факт наличия и вид дефекта электропроводящих элементов кабеля без определения конкретных параметров этого дефекта, опорный сигнал получают путем размещения между электродами спиновое конденсатора отрезка эталонного кабеля без дефектов, аналогичного кабелю, который в дальнейшем будет контролироваться. Посредством воздействия на этот эталонный кабель переменным электрическим полем индукционным датчиком формируют измерительный сигнал в виде ЭДС  $e_{\text{изм}}$ , пропорциональный его техническим параметрам. Затем этот сигнал обрабатывается в блоке БОС, где он фильтруется, усиливается, определяются его амплитуда и фаза, которые в дальнейшем оцифровываются и соответствующим образом вводятся в персональный компьютер (ПК) специализированным аппаратным интерфейсом, установленным на материнскую плату ПК. В рассматриваемом случае ПК фактически выполняет функции УСС.

После этого между электродами спиновое конденсатора размещают контролируемый электрический кабель, перемещают его относительно спиновое конденсатора и индукционного датчика, постоянно формируя при этом текущий контрольный сигнал в виде ЭДС индукции  $e_{\text{изм.контр}}$ . Параметры контрольного сигнала постоянно сравниваются в УСС с параметрами опорного сигнала  $e_{\text{изм.оп}}$  и по величине отклонения сравниваемых параметров  $\Delta e_m$  и  $\Delta \varphi_m$  оценивают качество электропроводящих элементов кабеля.

При наличии дефекта электропроводящих элементов на контролируемом участке кабеля в месте расположения индукционного датчика, например обрыва или существенного уменьшения живого сечения этих элементов, на этом участке происходит срыв процесса спиновой магнитной поляризации свободных электронов, что в итоге приводит к исчезновению потока спиновой индукции, а соответственно, и к значительному уменьшению ЭДС  $e_{\text{изм.контр}}$ . В свою очередь, дефекты, вызывающие аномальные изменения в структуре электропроводящих элементов контролируемого кабеля и связанные, прежде всего, с изменением состава материала этого элемента, проявятся в виде значительных девиаций фазы регистрируемой ЭДС  $e_{\text{изм.контр}}$ .

Поэтому для обнаружения дефектов типа обрыва или потери сечения в качестве результата сравнения используют разность амплитуд контрольного и опорного сигналов, а для обнаружения дефектов типа нарушения сплошности или отклонения от заданного химического состава в качестве результата сравнения используют разность фаз контрольного и опорного сигналов.

При отключении спиновое конденсатора от возбуждающего переменного напряжения свободные электроны в электропроводящих элементах кабеля возвращаются к своему первоначальному хаотическому состоянию, при котором их спиновые магнитные моменты утрачивают свою периодически изменяющуюся одинаковую направленность, т.е. электроны теряют индуцированную поляризацию своих спиновых

магнитных моментов, в результате чего исчезает поток спиновой индукции.

Описанные процедуры контроля и их последовательность целесообразно проводить в том случае, когда требуется провести процесс отбраковки неисправного кабеля, например в полевых условиях непосредственно в процессе монтажа кабеля при его размотке с бобины.

В случае необходимости ранжирования выявленных дефектов с определением конкретных параметров дефекта необходимо предварительно сформировать базу данных параметров опорных сигналов в виде значений амплитуд  $e_{m_{oi}}$  и фаз  $\varphi_{oi}$  ЭДС индукции  $e_{\text{изм.оп}}$ , полученную экспериментальным путем по результатам измерения в образцах кабеля с искусственно созданными фиксированными дефектами. В этом случае конкретные параметры дефекта фиксируются при совпадении текущих значений параметров контрольных сигналов  $e_{\text{изм.контр}}$  и параметров опорных сигналов  $e_{\text{изм.оп}}$ , т.е. при выполнении условий  $\Delta e_m = 0$  и/или  $\Delta \varphi_m = 0$ . Такой контроль целесообразно проводить, например, непосредственно в процессе производства, что позволит непосредственно в режиме реального времени отслеживать дефекты физических параметров кабельных изделий и вносить необходимые корректировки в технологический процесс их изготовления.

Для подтверждения работоспособности и эффективности предложенного способа дефектоскопии были проведены экспериментальные исследования с использованием соответствующей информационно-измерительной системы (ИИС), реализующей предложенный принцип контроля и состоящей из следующих функциональных элементов (см. рис. 1): ИД; БОС и УСС. В свою очередь, БОС содержит активный фильтр, амплитудный и фазовый детекторы, собранные на прецизионных операционных усилителях и образующие два соответствующих измерительных канала. С выходов измерительных каналов БОС снимаются сигналы, величины которых пропорциональны соответственно амплитуде и фазе ЭДС индукции  $e_{\text{изм.контр}}$ . Функции блока УСС выполняет персональный компьютер (ПК), на материнской плате которого установлен аппаратный интерфейс PCI-1710HG, осуществляющий как оцифровку сигналов с БОС, так и последующий ввод полученной цифровой информации в ПК. Связь между БОС и ПК осуществляется посредством монтажного терминала PCLD-8710. Значения параметров опорных сигналов  $e_{\text{изм.оп}}$  также вводятся в ПК через монтажный терминал PCLD-8710 и аппаратный интерфейс PCI-1710HG. В качестве примера в таблице приводятся некоторые результаты отдельных экспериментальных исследований.

Результаты экспериментальных исследований

| Материал проводника | Номинальное сечение $S$ , мм <sup>2</sup> | Параметры регистрируемого электрического сигнала |            | Напряжение возбуждения спиновое конденсатора, В |
|---------------------|-------------------------------------------|--------------------------------------------------|------------|-------------------------------------------------|
|                     |                                           | Амплитуда, В                                     | Фаза, град |                                                 |
| Медь                | обрыв                                     | 0,001                                            | 0          | 2                                               |
|                     | 0,75                                      | 0,212                                            | -19        |                                                 |
|                     | 1,0                                       | 0,241                                            | -20        |                                                 |
|                     | 1,2                                       | 0,3                                              | -21        |                                                 |
| Алюминий            | обрыв                                     | 0,001                                            | 0          |                                                 |
|                     | 0,75                                      | 0,123                                            | 8          |                                                 |
|                     | 1,0                                       | 0,132                                            | 9          |                                                 |
|                     | 1,2                                       | 0,15                                             | 10         |                                                 |

Таким образом, экспериментальные исследования устройства, реализующего описанный способ, показали высокую эффективность и достоверность определения места обрыва электропроводящих элементов кабеля и контроля физических параметров дефекта, что позволяет проводить всестороннюю оценку способности кабеля выполнять свои функции.

#### Выводы

Использование спин-поляризационных явлений, обусловленные наличием у электронов поляризуемого спина и возникающих при воздействии переменного электрического поля на свободные электроны электропроводящих элементов кабеля, позволяют проводить всесторонние исследования как самой структуры электропроводящих элементов кабеля, так и их физических свойств. К основным преимуществам этого способа следует отнести следующие качества: 1 – возможность проведения контроля электропроводящих элементов кабеля из любых электропроводящих пара- и диамагнитных материалов; 2 – точность и надежность контроля не зависит от величины и равномерности скорости перемещения кабеля, а также от вибрации и его поперечных колебаний относительно источника физического поля и индукционного датчика; 3 – позволяет осуществлять контроль при неподвижном кабеле; 4 – обеспечивает неразрушающую диагностику кабеля без ухудшения его эксплуатационных характеристик; 5 – является простым в использовании при контроле параметров как в процессе изготовления кабеля, так и при отбраковке кабеля при его размотке с бобины в процессе укладки.

В заключение следует отметить, что разработанный способ может быть использован не только для диагностики электрических кабелей и проводов, но и для других длинномерных изделий из металлических немагнитных материалов, выполненных в виде стержней, труб и т.п. По сравнению с известными методами контроля, данный способ обеспечивает повышение достоверности контроля в целом и расширение области его применения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гуревич Ю.Е., Кабиков К.В. Особенности электроснабжения, ориентированного на бесперебойную работу промышленного потребителя. М.: Торус Пресс, 2015. 408 с.
2. Хорольский В.Я., Таранов М.А. Надежность электроснабжения. М.: Форум, Инфра-М, 2013. 128 с.

3. Редько В.В. Электроискровой контроль качества изоляции кабельных изделий. Томск: Изд-во ТПУ, 2013. 176 с.
4. Холодный С.Д., Серебрянников С.В., Боев М.А. Методы испытаний и диагностики в электроизоляционной и кабельной технике. М.: Изд-во МЭИ, 2009. 232 с.
5. Starikova N.S., Redko V.V., Vavilova G.V. Comparison of Cable Insulation Control in Weak and Strong Electric Fields / N.S. Starikova // Applied Mechanics and Materials. 2015. № 756. С. 486-490.
6. Blohm W. Advanced on-line measuring and analysis techniques for an economical cable production // Proceedings Intl. IWMA Conf. Economical Processing of Rod to Wire & Cable. 1999, с. 67-75.
7. Benjamin T.L. Power Cable Diagnostics: Field Application and Case Studi // Neta World, USA. 2004. P. 1-6.
8. ГОСТ Р 56542-2015. Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов. М.: Стандартинформ, 2016. 12 с.
9. Будадин О.Н., Потапов А.И., Колганов В.И. Тепловой неразрушающий контроль изделий. М.: Наука. 2002. 472 с.
10. Фёдоров Е.М., Гольдштейн А.Е., Редько В.В. Методы и приборы оптического контроля диаметра и овальности электрических кабелей в процессе их производства // Ползуновский вестник. 2010. № 2. С. 141-148.
11. Приборы технологического контроля для кабельного производства. Каталог продукции «ЭРМИС-2003». Томск, 2003. 16 с.
12. Неразрушающий контроль. Кн. 2. Акустические методы контроля / под ред. В.В. Сухорукова. М.: Высшая шк., 1992. 283 с.
13. Герасимов В.Г., Покровский А.Д., Сухоруков В.В. Неразрушающий контроль. Кн. 3. Электромагнитный контроль. М.: Вышш. шк., 1992. 320 с.
14. Бочкарев И.В., Брякин И.В., Гунина М.Г. Система оперативного контроля технического состояния электрических кабелей // Проблемы автоматизации и управления: Научно-техн. журнал / НАН КР. Бишкек: Илим, 2018. №1 (34). С. 55–63.
15. Яковлев С.Г. Методы и аппаратура магнитного и вихревого контроля. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2003. 88 с.
16. Шубочкин А.Е. Развитие и современное состояние вихретокового метода неразрушающего контроля. М.: Издательский дом «Спектр», 2014. 288 с.
17. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике. М.: Наука, 1977. 940 с.
18. Агранович В.М., Галанин М.Д. Перенос энергии электронного возбуждения в конденсированных средах. М.: Наука, 1978. 383 с.
19. Смоленский Г.А., Леманов В.В. Ферриты и их техническое применение. М.: Наука, 1975. 219 с.

Поступила в редакцию 28 сентября 2018 г.

#### INFORMATION IN ENGLISH

#### DEVELOPMENT OF NEW METHOD OF NON-DESTRUCTIVE TESTING OF ELECTRICAL CABLES

Ivan V. Bryakin

D.Sc. (Engineering), Senior Researcher, Chief of laboratory of Information and Measuring Systems, Institute of Automation and Information Technology, National Academy of Sciences of Kyrgyz Republic, Bishkek, Kyrgyzstan. E-mail: bivas2006@yandex.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7463-8072>.

Igor V. Bochkarev

D.Sc. (Engineering), Professor, Department of Electrical Engineering, Electric Power Faculty, Kyrgyz State Technical University after I. Razzakov, Bishkek, Kyrgyzstan. E-mail: elmech@mail.ru. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9873-9203>.

Vadim R. Khrumshin

D.Sc. (Engineering), Professor, Department of Electric Power Supply of Industrial Enterprises, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: hvrmgn@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0972-2803>.



The paper describes a new method of non-destructive testing of parameters of electrical cables and wires, which can be used to find and localize defects in electric conductors as well as to determine certain parameters of the discovered defect. In order to implement the suggested method, the quantum-mechanical characteristic of electrons is used, which consists in polarization of spin magnetic moments of mobile electrons in current-conducting materials under the influence of an external alternating electric field. The specified field can be formed by a cylindrical capacitor consisting of two semicylindrical metal electrodes located coaxially to the controlled cable. The region of circulation of spin magnetic moments acting as a harmonic oscillator by means of spin-spin interaction excites a progressive polarization wave of spin magnetic moments in the conductive wire and this wave interacting with the coil of the induction transmitter generates a control signal in the form of alternating electromotive force on the coil ends. Parameters of this electromotive force (amplitude and phase) contain information both about the dimensional characteristics of the current conducting wires and about the physical and chemical properties of the material they are made from. The non-destructive testing is carried out by means of comparison of the control signal with the reference one. The process of the reference signal formation depending on the purposes of the testing is shown in the paper. The suggested method can be used to control the cables and wires made from any electrically-conductive paramagnetic and diamagnetic materials.

**Keywords:** alternating electric field source, through-type induction transducer, travelling polarization wave of spin magnetic moments of mobile electrons, control and reference signals, data measuring system.

#### REFERENCES

1. Gurevich Yu.E., Kabikov K.V. *Osobennosti elektrosnabzheniya, orientirovannogo na bespereboinuyu rabotu promyshlennogo potrebitelya* [Characteristic properties of electric power supply of the industrial customer operating continuously]. Moscow: Torus Press, 2015. 408 p. (In Russian)
2. Khorolskiy V.Ya., Taranov M.A. *Nadyezhnost elektrosnabzheniya* [Reliability of electric power supply]. Moscow: Forum, Infra-M, 2013. 128 p. (In Russian)
3. Redko V.V. *Elektroiskrovoy control kachestva izolyatsii kabelnykh izdeliy* [Electrospark quality control of cable product insulation]. Tomsk: Publishing center of TPU, 2013. 176 p. (In Russian)
4. Kholodnyi S.D., Serebryannikov S.V., Boev M.A. *Metody ispytaniy i diagnostiki v elektroizolyatsionnoy i kabelnoy tekhnike* [Testing and diagnostics methods in electroinsulating and cable engineering]. Moscow: Publishing center of MEI, 2009. 232 p. (In Russian)
5. Starikova N.S., Redko V.V., Vavilova G.V. Comparison of Cable Insulation Control in Weak and Strong Electric Fields. Applied Mechanics and Materials. 2015. no. 756, pp. 486-490
6. Blohm W. Advanced on-line measuring and analysis techniques for an economical cable production. Proceedings Intl. IWMA Conf. Economical Processing of Rod to Wire & Cable. 1999, pp. 67-75.
7. Benjamin T.L. Power Cable Diagnostics: Field Application and Case Studi // Neta World, USA. 2004, pp. 1-6.
8. GOST R 56542-2015. Non-destructive testing. Classification of methods. M.: Standartinform, 2016. 12 p. (In Russian)
9. Budadin O.N., Potapov A.I., Kolganov V.I. *Teplovoy nerazrushayushchiy control izdeliy* [Thermal non-destructive testing of final products]. Moscow: Nauka, 2002. 472 p. (In Russian)
10. Fedorov E.M., Goldshtein A.E., Redko V.V. Methods and instruments of optical inspection of the diameter and the out-of-roundness of electric cables during manufacturing. Polzunovskiy vestnik [Polzunov Bulletin], 2010, no. 2, pp. 141-148. (In Russian)
11. *Pribory tekhnologicheskogo kontrolya dlya kabelnogo proizvodstva* [Instruments process control for cable manufacturing]. Catalogue of products of «ERMIS-2003». Tomsk, 2003. 16 p. (In Russian)
12. *Nerazrushayushchiy kontrol* [Non-destructive testing]. Vol. 2. Acoustic control methods. Under the editorship of V.V. Sukhorukov. Moscow: High school, 1992. 283 p. (In Russian)
13. Gerasimov V.G., Pokrovskiy A.D., Sukhorukov V.V. *Nerazrushayushchiy kontrol* [Non-destructive testing]. Vol. 3. Electromagnetic testing. M.: High school, 1992. 320 p. (In Russian)
14. Bochkarev I.V., Bryakin I.V., Gunina M.G. System of operation monitoring of the technical state of electric cables. *Problemy avtomatiki i upravleniya* [Problems of automation and control]: Scientific and technical journal. NAN KR. Bishkek: Ilim, 2018, no. 1 (34), pp. 55-63. (In Russian)
15. Yakovlev S.G. *Metody i apparatura magnitnogo i vikhrevogo kontrolya* [Methods and instruments of magnetic and vortex testing]. Saint-Petersburg: Publishing center of SPBGETU «LETI», 2003. 88 p. (In Russian)
16. Shubochkin A.E. *Razvitie i sovremennoe sostoyanie vikhretokovogo metoda nerazrushayushchego kontrolya* [Development and the current state of the eddy current method of non-destructive testing]. M.: Publishing house «Spectrum», 2014. 288 p. (In Russian)
17. Yavorskiy B.M., Detlaf A.A. *Spravochnik po fizike* [Physics reference book]. Moscow: Science, 1977. 940 p. (In Russian)
18. Agranovich V.M., Galanin M.D. *Perenos energii elektron-nogo vzbuzhdeniya v kondensirivannykh sredakh* [Transfer of electron excitation energy in condensed media]. Moscow: Science, 1978. 383 p. (In Russian)
19. Smolenskiy G.A., Lemanov V.V. *Ferrity i ikh tekhnicheskoe primeneniye* [Ferrites and their engineering applications]. Moscow: Nauka, 1975. 219 p. (In Russian)

Брякин И.В., Бочкарев И.В., Храмшин В.Р. Разработка нового метода дефектоскопии электрических кабелей // Электротехнические системы и комплексы. 2018. № 4(41). С. 4-10. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-4\(41\)-4-10](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-4(41)-4-10)

Bryakin I.V., Bochkarev I.V., Khrumshin V.R. Development of New Method of Non-destructive Testing of Electrical Cables. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2018, no. 4(41), pp. 4-10. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-4\(41\)-4-10](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-4(41)-4-10)

## ИССЛЕДОВАНИЕ КОНДЕНСАТОРНОГО ПРОТИВОВКЛЮЧЕНИЯ В РЕЖИМЕ ТОРМОЖЕНИЯ АСИНХРОННОГО ВИБРОДВИГАТЕЛЯ

Асинхронные вибродвигатели широко применяются на практике, но при этом имеют существенный недостаток – резкое увеличение амплитуд колебаний при прохождении зоны резонанса в процессе пуска и выбега, что отрицательно сказывается на их работе. Многие исследователи решали данную проблему: использование двигателей со значительным резервом мощности (30-70%), конденсаторное торможение. Однако резерв мощности ухудшает энергетические показатели (КПД и коэффициент мощности в рабочем режиме), а конденсаторное торможение весьма ограничено и может не совпадать с зоной резонанса. Цель исследования – рассмотрение и анализ частного случая, при котором происходит застревание ротора асинхронного вибродвигателя на околорезонансной частоте при прохождении зоны резонанса выбегом, с целью выявления способа, позволяющего исключить данное явление. Для проведения исследований может применяться любой серийный асинхронный вибродвигатель с паспортными характеристиками. В настоящей работе исходными данными для исследования использовались паспортные характеристики серийного асинхронного вибродвигателя ИВ-105-2,2 с одноключевой схемой реверса и основные параметры вибрационной системы при минимальных значениях диссипативных сопротивлений. Создана математическая модель рассматриваемой вибрационной системы и асинхронного вибродвигателя при общепринятых допущениях (без учета потерь в стали, высших гармоник магнитного поля при равномерном воздушном зазоре и напряжении питания, являющимися симметричной системой синусоидальных напряжений) в программной среде MBTU 3.7. Предложен способ применения одноключевой схемы реверса с конденсаторно-тиристорным коммутатором, позволяющий уменьшить колебания в зоне резонанса и предотвратить застревание ротора асинхронного вибродвигателя на околорезонансной частоте, при прохождении через зону резонанса. Получены расчетные осциллограммы переходных процессов. Корректное применение математического аппарата позволяет утверждать, что при проведении исследований с различными серийными асинхронными вибродвигателями полученные результаты совпадают, это доказывает эффективность применения одноключевой схемы реверса, что позволит повысить надежность асинхронных вибродвигателей и увеличить срок эксплуатации электропривода.

**Ключевые слова:** вибрационные машины, асинхронный вибродвигатель, резонанс, пуск, торможение, амплитуда колебаний, конденсаторное противовключение.

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время широкое применение на практике получили вибрационные машины и установки на базе асинхронных дебалансных вибродвигателей (далее АДВД), работающих в зарезонансной зоне частотной характеристики (сейсмоиспытательные установки, виброплощадки и т.д.) [1]. Исходя из этого, процесс изучения вибрационных систем прослеживается у отечественных и у зарубежных исследователей [2-4].

Недостатком АДВД зарезонансного типа является резкое увеличение амплитуд колебаний при прохождении зоны резонанса в процессе торможения выбегом, резонансные амплитуды могут в десятки раз превосходить амплитуды колебаний при установившемся режиме работы, что является недопустимым с точки зрения нормальной эксплуатации [5]. Торможение выбегом является неэффективным, так как при достижении, в процессе выбега, скорости электродвигателя области резонансных частот вибрационной системы может произойти застревание ротора АДВД на околорезонансной частоте с выраженными максимальными амплитудами колебаний. Это ведет к увеличению времени действия переходных механических нагрузок на грузонесущий орган и его конструктивные элементы, что может неблагоприятно сказаться на целостности электродвигателя в целом. Таким образом, оценка амплитуд колебаний при прохождении через резонансную зону является обязательной

при расчете и проектировании вибрационных машин с дебалансными вибровозбудителями.

### МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ

В настоящей работе рассматриваются динамические режимы зарезонансных вибрационных машин путем перевода АДВД из рабочего трехфазного режима с компенсацией реактивной мощности в режим конденсаторного противовключения, обеспечивающего быстрое прохождение машиной резонансной области работы вибрационной машины. Смоделирован эффект застревания дебалансного ротора АДВД на околорезонансной частоте при торможении выбегом.

Рассмотрим процессы пуска и торможения АДВД на примере динамической одномассовой вибрационной системы направленных колебаний с двумя вибродвигателями, представленной на **рис. 1**, которая является характерной для большинства промышленных вибрационных машин.

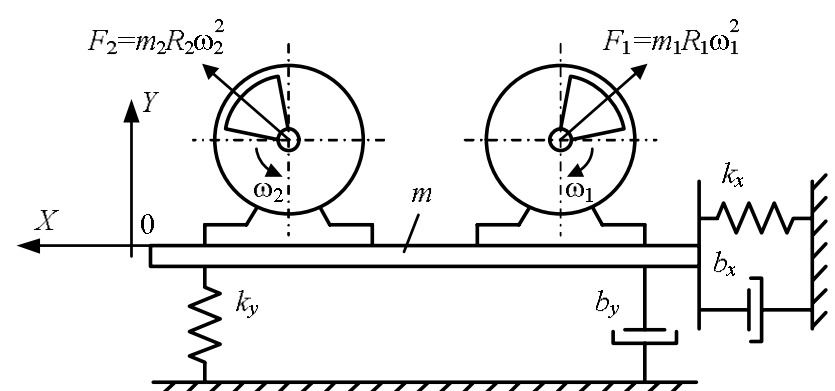


Рис. 1. Одномассовая вибрационная система направленных колебаний

Уравнения движения представленной вибрационной системы имеют вид [6-8]:

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} + b_y \frac{dy}{dt} + k_y y = \sum_{i=1}^2 m_{0i} R_i \omega_i^2 \cos \omega_i t, \quad (1)$$

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + b_x \frac{dx}{dt} + k_x x = \sum_{i=1}^2 m_{0i} R_i \omega_i^2 \sin \omega_i t, \quad (2)$$

$$J_i \frac{d\omega_i}{dt} = M_{\text{ЭМ}i} - M_{\text{ВИБ}i} - m_{0i} R_i g \sin \omega_i t - M_{\text{МЭХ}i}, \quad (3)$$

где  $m$  – масса виброплатформы с грузом;  $y$  и  $x$  – смещение виброплатформы по осям  $Y$  и  $X$ ;  $b_y$  и  $b_x$  – коэффициенты сопротивления системы по осям  $Y$  и  $X$ ;  $k_y$  и  $k_x$  – жесткости упругих связей по осям  $Y$  и  $X$ ;  $m_{0i}$  – масса  $i$ -го дебаланса;  $R_i$  – эксцентриситет  $i$ -го дебаланса;  $g$  – ускорение свободного падения;  $J_i$  – приведенный момент инерции  $i$ -го электродвигателя;  $M_{\text{ЭМ}i}$  – электромагнитный момент на валу  $i$ -го электродвигателя;  $M_{\text{МЭХ}i}$  – момент сопротивления на валу  $i$ -го электродвигателя, обусловленный механическими потерями;  $M_{\text{ВИБ}i}$  – вибрационный момент на валу  $i$ -го электродвигателя;  $\omega_i$  – скорость вращения вала  $i$ -го электродвигателя.

Уравнения (1) и (2) описывают движение виброплатформы согласно второму закону Ньютона в проекциях на оси  $X$  и  $Y$  соответственно, а уравнение (3) – равновесие моментов на валу  $i$ -го двигателей соответственно.

Вибрационный момент  $i$ -го вибродвигателя имеет две составляющие:

$M_{\text{ВИБ}iY} = F_{Xi} y$ , – составляющая, обусловленная наличием смещения системы по оси  $Y$  и проекции центробежной силы  $i$ -го АДВД на оси  $X$ , где  $F_{Xi}$  определяется по формуле:

$$F_{Xi} = m_{0i} R_i \omega_i^2 \sin \omega_i t.$$

$M_{\text{ВИБ}iX} = F_{Yi} x$ , – составляющая, обусловленная наличием смещения системы по оси  $X$  и проекции центробежной силы  $i$ -го АДВД на оси  $Y$ , где  $F_{Yi}$  определяется по формуле:

$$F_{Yi} = m_{0i} R_i \omega_i^2 \cos \omega_i t.$$

Результирующее значение вибрационного момента, приложенного к валу  $i$ -го АДВД, определяется формулой

$$M_{\text{ВИБ}i} = F_{Xi} y + F_{Yi} x.$$

В работе [9] проведено описание реверса АД с применением одноключевых схем.

Для проведения исследования динамических режимов АДВД в системе, представленной на **рис. 1**, в математической модели используется одноключевая схема реверса АДВД с конденсаторно-тиристорным коммутатором, представленная на **рис. 2** [10].

Для пуска электродвигателя  $M$  включается трехфазный выключатель  $QF$ , и электродвигатель  $M$  работает в обычном трехфазном режиме. Коммутационные элементы (симисторы)  $T1$  и  $T2$  открыты, конденсаторы  $C1$ ,  $C2$ ,  $C3$  подключены параллельно фазам сети и обеспечивают компенсацию реактивной мощности.

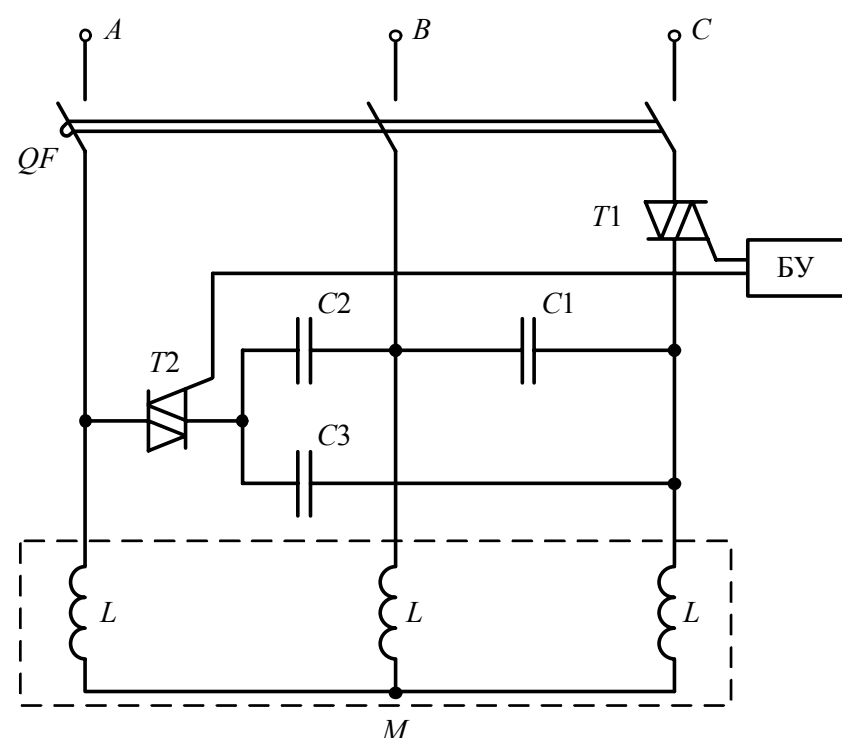


Рис. 2. Одноключевая схема реверса АДВД

Для пуска электродвигателя  $M$  включается трехфазный выключатель  $QF$ , и электродвигатель  $M$  работает в обычном трехфазном режиме. Коммутационные элементы (симисторы)  $T1$  и  $T2$  открыты, конденсаторы  $C1$ ,  $C2$ ,  $C3$  подключены параллельно фазам сети и обеспечивают компенсацию реактивной мощности.

При команде с блока управления (БУ) на торможение симисторы  $T1$  и  $T2$  запираются и двигатель  $M$  переходит в режим противовключения, в котором фазные обмотки  $L$  фазы  $A$  и  $B$  подключены через конденсаторы  $C2$  и  $C3$  на линейное напряжение  $U_{AB}$ , а третья фазная обмотка  $L$  вместе с конденсаторами  $C1$ ,  $C2$ ,  $C3$  подключена к той из фаз сети, напряжение которой опережает на  $120^\circ$  напряжение фазы, к которой подключен симистор  $T1$  (фаза  $C$ ). Наличие конденсаторов  $C1$ ,  $C2$ ,  $C3$  (при правильно выбранной величине ёмкости) меняет фазу тока в обмотке  $L$  фазы  $C$ , что меняет порядок чередования фаз обмоток и обеспечивает режим противовключения АДВД. При остановке АДВД отключается от сети.

Величина, эквивалентная емкости трех конденсаторов в режиме противовключения для схемы «звезда», рассчитывается исходя из обеспечения заданного момента противовключения по формуле

$$C_K = 2780 \frac{I_{\text{пр}}}{U_n},$$

где  $I_{\text{пр}}$  – ток противовключения,  $U_n$  – номинальное напряжение.

Для обеспечения симметрии напряжений в трехфазном режиме емкости конденсаторов выбираются равными по величине, тогда, исходя из заданной эквивалентной емкости и схемы соединения конденсаторов, емкость каждого конденсатора определится по формуле

$$C = \frac{2}{3} C_K.$$

При торможении конденсаторным противовключением электромагнитные процессы в каждом АДВД описываются по выражениям, которые описаны также в работах [5-8]:

$$\begin{cases} U_A = R_A i_A + \frac{d\psi_A}{dt}; \\ U_B = R_B i_B + \frac{d\psi_B}{dt}; \\ U_C = R_C i_C + \frac{d\psi_C}{dt}; \\ 0 = R_a i_a + \frac{d\psi_a}{dt}; \\ 0 = R_b i_b + \frac{d\psi_b}{dt}; \\ 0 = R_c i_c + \frac{d\psi_c}{dt}, \end{cases} \quad (4)$$

где  $U_A, U_B, U_C$  – значения фазных напряжений статора;  $R_A, R_B, R_C, R_a, R_b, R_c$  – активные сопротивления обмоток статора и приведенные активные сопротивления обмоток ротора;  $i_A, i_B, i_C, i_a, i_b, i_c$  – фазные токи статора и ротора;  $\psi_A, \psi_B, \psi_C, \psi_a, \psi_b, \psi_c$  – потокосцепления статорных и роторных обмоток.

В конденсаторном режиме противовключения системе уравнений (4) необходимо дополнить соотношением

$$U_C = U_B - \frac{1}{C_K} \int i_C dt,$$

где  $C_K$  – емкость фазосдвигающего конденсатора.

Потокасцепление АДВД определяется выражением в матричной форме:

$$[\psi] = [M] [i],$$

где  $[\psi] = [\psi_A, \psi_B, \psi_C, \psi_a, \psi_b, \psi_c]$  – матрица-столбец потокасцеплений;  $[i] = [i_A, i_B, i_C, i_a, i_b, i_c]$  – матрица-столбец токов;  $[M]$  – матрица индуктивностей.

Уравнение электромагнитного момента с учетом вышесказанного определяется так:

$$M_{\text{эм}} = \frac{\sqrt{3}}{2} p M \left[ (i_A i_c + i_B i_a + i_C i_b) - (i_A i_b + i_B i_c + i_C i_a) \right],$$

где  $M$  – взаимная индуктивность;  $p$  – число пар полюсов АДВД.

Представленная система нелинейных дифференциальных уравнений эффективно решается с помощью вычислительной техники с использованием численных методов интегрирования и дифференцирования. Для этих целей была создана математическая модель рассматриваемой вибрационной системы и асинхронного дебалансного электродвигателя с конденсаторами, при общепринятых допущениях (без учета потерь в стали, высших гармоник магнитного поля при равномерном воздушном зазоре и напряжении питания, являющимися симметричной системой синусоидальных напряжений) в программной среде МВТУ 3.7, проведены исследования динамических режимов работы машины. В ходе проведения исследований также использовались конденсаторы как с наименьшим значением, так и с наибольшим значением от оптимально выбранной емкости конденсаторов, которая позволяет избежать застревания ротора АДВД.

Приведены экспериментальные осциллограммы изменения частоты вращения АДВД и амплитуды колебаний в процессе торможения при изменяемых значениях емкостей конденсаторов.

Основные параметры вибрационной системы:  $m=172$  кг,  $b_y=119,45$  Н/м,  $b_x=100$  Н/м,  $k_y=3 \cdot 10^6$  кг·м/с<sup>2</sup>,  $k_x=390000$  кг·м/с<sup>2</sup>. Тип вибродвигателя ИВ–105–2,2 на базе АДВД с параметрами:  $P_H=2,2$  кВт,  $n_1=3000$  об/мин,  $R_1=3,13$  Ом,  $L_1=0,015$  Гн,  $R_2=5,7$  Ом,  $L_2=0,010$  Гн,  $L_m=0,51$  Гн,  $J_d=0,0034$  кг·м<sup>2</sup>,  $m_0=3,7$  кг,  $r_0=0,06$  м.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На рис. 3 представлены расчетные осциллограммы изменения частоты вращения АДВД и амплитуды колебаний по оси  $Y$  при торможении выбегом. Из осциллограмм можно заключить, что при малых диссипативных сопротивлениях  $b_y=119,45$  Н/м,  $b_x=100$  Н/м и отключении питания вибродвигателя происходит застревание ротора АДВД на околорезонансной частоте. Это вызвано поддержанием скорости вращения ротора АДВД путем «подталкивания» грузонесущего органа за счет колебаний вибрационной системы, время вращения составляет 1,75 с. При этом амплитуда колебаний области резонансной частоты системы ( $\omega_{\text{рез}}=120$  рад/с), доходит до 13 мм.

Пусковой режим АДВД при заданных параметрах вибрационной системы не вызывает затруднений, так как происходит при малых диссипативных сопротивлениях.

На рис. 4 представлены расчетные осциллограммы изменения частоты вращения АДВД и амплитуды колебаний по оси  $Y$  при торможении путем конденсаторного противовключения, при этом емкость конденсаторов равна  $C_1=C_2=C_3=220$  мкФ, что позволяет избежать застревания ротора АДВД. Время торможения уменьшается более чем в пять раз, а амплитуда колебаний в резонансной зоне уменьшается в 1,9 раза, что позволяет повысить надежность зарезонансных вибрационных машин. При этом в рабочем режиме конденсаторы повышают коэффициент мощности АДВД.

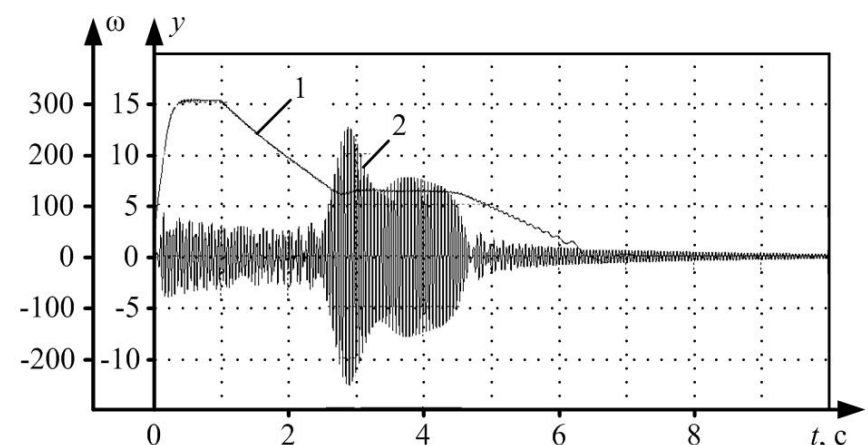


Рис. 3. Расчетные осциллограммы изменения частоты вращения и амплитуды колебаний системы по оси  $Y$  при выбеге: 1 – частота вращения (рад/с); 2 – вибросмещение (мм)

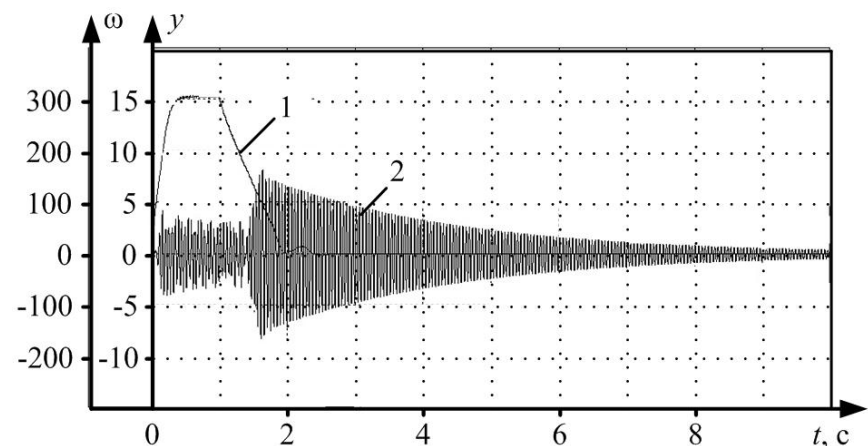


Рис. 4. Расчетные осциллограммы изменения частоты вращения и амплитуды колебаний системы по оси  $Y$  при торможении путем конденсаторного противовключения при  $C_1=C_2=C_3=220$  мкФ: 1 – частота вращения (рад/с); 2 – вибросмещение (мм)



На рис. 5 представлены экспериментальные осциллограммы изменения частоты вращения АДВД и амплитуды колебаний в процессе торможения при аналогичных условиях.

На рис. 6 представлены расчетные осциллограммы изменения частоты вращения АДВД и амплитуды колебаний по оси  $Y$  при торможении путем конденсаторного противовключения с емкостью конденсаторов  $C1=C2=C3=560$  мкФ. Из осциллограмм видно, что при заданной емкости конденсаторов время торможения составляет 4,5 с, а амплитуда колебаний системы достигает 13 мм. Также наблюдается кратковременное застревание ротора АДВД на околорезонансной частоте. На рис. 7 представлены экспериментальные осциллограммы изменения частоты вращения АДВД и амплитуды колебаний при аналогичных условиях.

На рис. 8 представлены расчетные осциллограммы изменения частоты вращения АДВД и амплитуды колебаний по оси  $Y$  при торможении путем конденсаторного противовключения с емкостью конденсаторов  $C1=C2=C3=82$  мкФ. Из осциллограмм видно, что при заданной емкости конденсаторов время торможения составляет 5,2 с, а амплитуда колебаний системы достигает 13 мм. Также наблюдается кратковременное застревание ротора АДВД на околорезонансной частоте. На рис. 9 представлены экспериментальные осциллограммы изменения частоты вращения АДВД и амплитуды колебаний при аналогичных условиях.

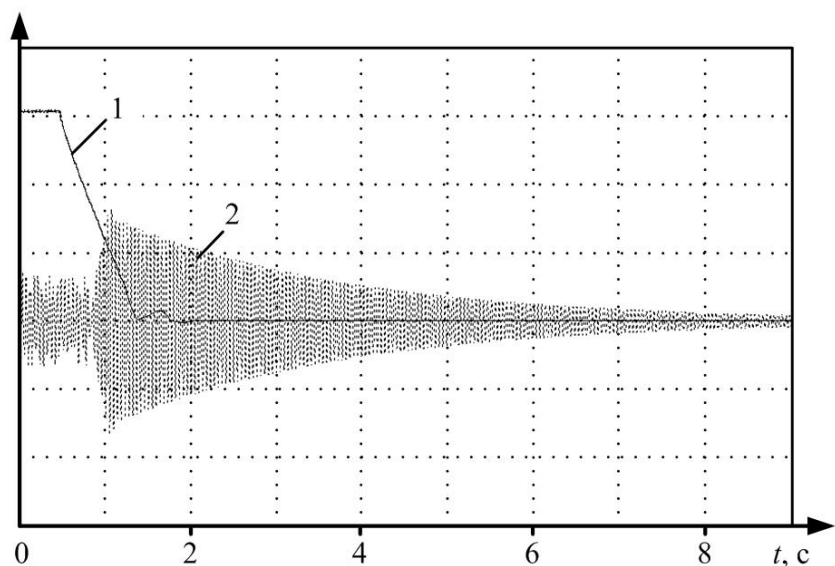


Рис. 5. Экспериментальные осциллограммы изменения частоты вращения и амплитуды колебаний системы: 1 – частота вращения (100 рад/с/дел); 2 – вибросмещение (5 мм/дел)

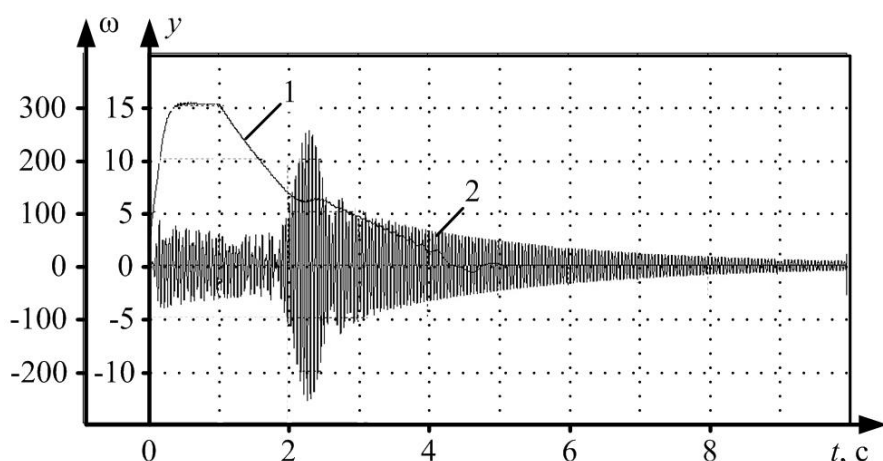


Рис. 6. Расчетные осциллограммы изменения частоты вращения и амплитуды колебаний системы по оси  $Y$  при торможении путем конденсаторного противовключения при  $C1=C2=C3=560$  мкФ: 1 – частота вращения (рад/с); 2 – вибросмещение (мм)

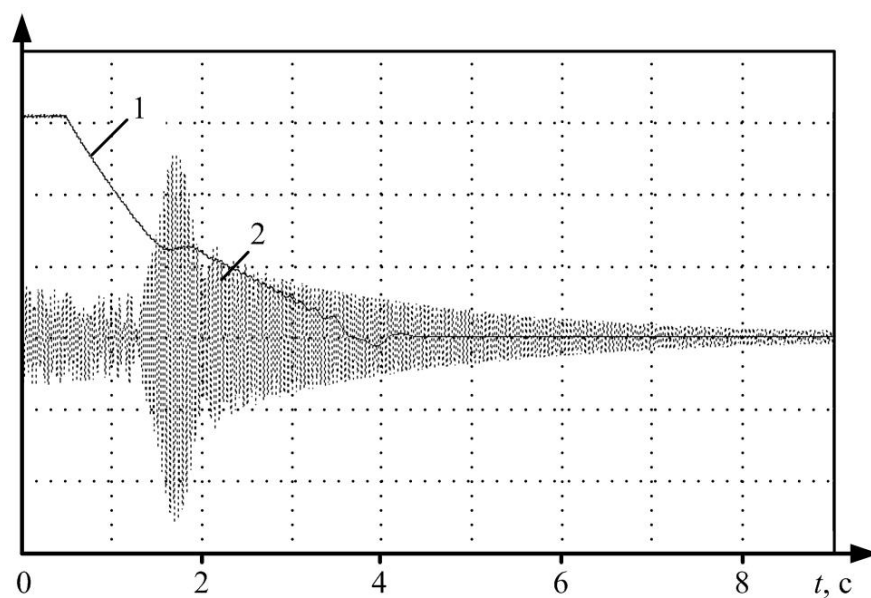


Рис. 7. Экспериментальные осциллограммы изменения частоты вращения и амплитуды колебаний системы: 1 – частота вращения (100 рад/с/дел); 2 – вибросмещение (5 мм/дел)

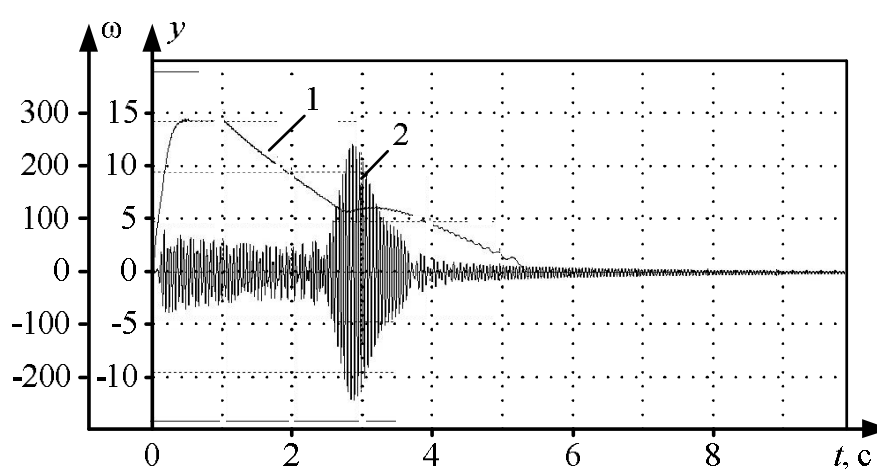


Рис. 8. Расчетные осциллограммы изменения частоты вращения и амплитуды колебаний системы по оси  $Y$  при торможении путем конденсаторного противовключения при  $C1=C2=C3=82$  мкФ: 1 – частота вращения (рад/с); 2 – вибросмещение (мм)

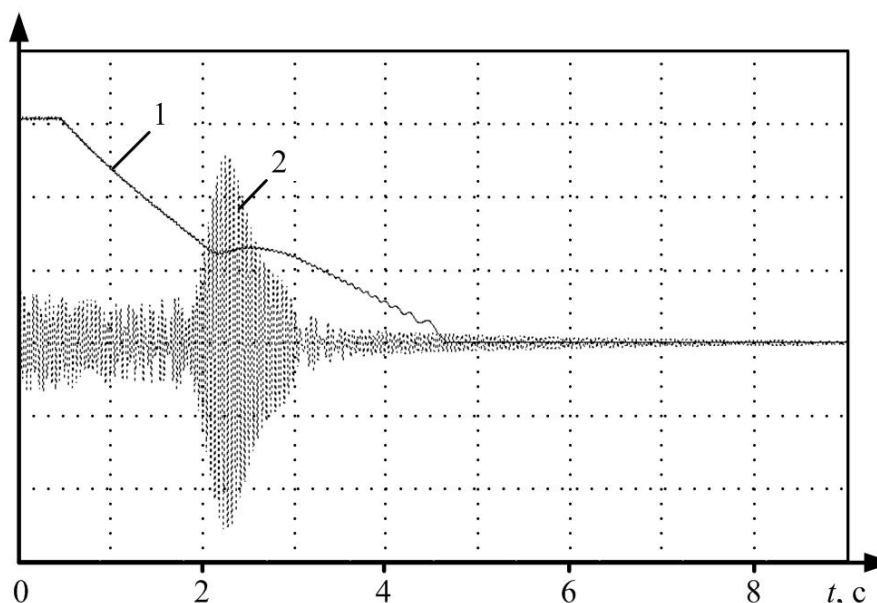


Рис. 9. Экспериментальные осциллограммы изменения частоты вращения и амплитуды колебаний системы: 1 – частота вращения (100 рад/с/дел); 2 – вибросмещение (5 мм/дел)

На рис. 10 представлены осциллограммы функций изменения амплитуды колебаний системы и времени торможения АДВД в зависимости от эквивалентной емкости конденсаторов. Из осциллограмм можно заключить, что при уменьшении или увеличении емкости конденсаторов от оптимально выбранного значения происходит увеличение амплитуды колебаний системы и времени торможения АДВД.

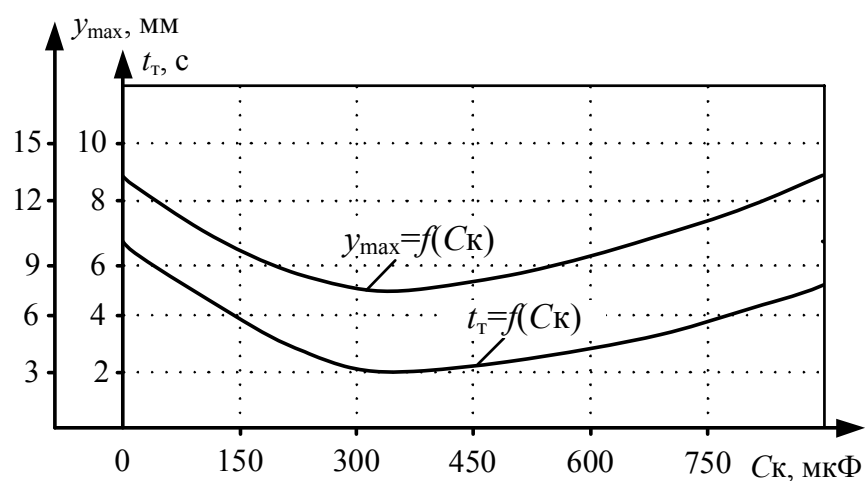


Рис. 10. Осциллограммы изменения амплитуды колебаний системы и времени торможения АДВД от значения эквивалентной емкости конденсаторов

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

##### 1. Установлено, что:

– на характер процесса выбега АДВД существенно влияет величина кинетической энергии, накопленная механической частью вибрационной системы;

– длительное нахождение рабочей точки электро-механической характеристики АДВД в области собственных частот колебаний вибрационной машины приводит к увеличению максимальных переходных амплитуд колебаний системы, негативно влияющих на конструктивную надежность электродвигателя в целом.

2. Пуск АДВД при заданных параметрах вибрационной системы не вызывает затруднений, так как происходит при малых диссипативных сопротивлениях.

3. Способ торможения конденсаторным противовключением позволяет существенно сократить время торможения и уменьшить амплитуду резонансных колебаний. При этом в рабочем режиме конденсаторы повышают коэффициент мощности АДВД.

4. Выбор оптимальных значений конденсаторов позволяет сократить время торможения АДВД и уменьшить в разы амплитуды колебаний при торможении конденсаторным противовключением, что способствует исключению неблагоприятных режимов работы.

5. Опытный образец рассматриваемого вибростенда с применением одноключевой схемы реверса АДВД с конденсаторно-тиристорным коммутатором был внедрен в августе 2018 года при развитии эксперимен-

тально-испытательной базы ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров. Результаты промышленных испытаний и успешный опыт эксплуатации подтвердили теоретические и расчетные данные.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Блехман И.И. Теория вибрационных процессов и устройств. Вибрационная механика и вибрационная техника. СПб.: Руда и Металлы, 2013. 640 с.
2. Шестаков В.М., Белокузов Е.В., Епишкин А.Е. Синтез законов управления режимами работы автоматизированных вибрационных установок // Электричество. 2013. №11. с. 31-35.
3. Jnoe J., Araki Y., Hirakawa M. The self-synchronization of mechanical vibrators of the resonance type vibrating machinery with multidegree of freedom. «Dyn. Multibody Syst. Symp., Munich, 1977», Berlin e. a., 1978. pp. 75–86.
4. Michalczyk J. Angular oscillations of vibratory machines of independent driving systems caused by a non-central direction of the exciting force operations. Arch. Min. Sci., Vol. 57, №1, Warszawa, 2012. pp. 169-177.
5. Гаврилов Е.Н. Динамические процессы зарезонансных вибрационных машин // Вестник Казанского технологического университета. 2013. №12 (16). С. 87–90.
6. Гаврилов Е.Н. Математическое описание одномассовой вибрационной транспортирующей машины // Вестник Казанского технологического университета. 2015. №1 (18). С. 339–343.
7. Дмитриев В.Н., Лунина Н.А., Дунаев Д.И. Математическое моделирование асинхронного вибрационного электропривода // Труды VIII Международной (XIX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2014 (г. Саранск, 7-9 октября 2014 г.). Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2014. Т1. С. 312-315.
8. Гаврилов Е.Н. Разработка и исследование асинхронного дебалансного электропривода зарезонансных вибрационных транспортирующих машин с пуско-тормозным конденсаторным устройством: дис ... канд. техн. наук. 05.09.03 / Гаврилов Евгений Николаевич. Ульяновск, 2012.
9. Дмитриев В.Н., Кислицын А.Л. Судовые электромеханические устройства ввода – вывода информации. М.: Энергоатомиздат, 2006. 253 с.
10. Пат. 2657010 Российская Федерация, МКП H02P3/20. Асинхронный электропривод / Д.И. Дунаев, С.Н. Жирнов, Р.Н. Шакиров; заявитель ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ». №2017111161; заяв. 03.04.2017; опубл. 08.06.2018.

Поступила в редакцию 18 сентября 2018 г.

#### INFORMATION IN ENGLISH

### STUDYING OF CONDENSING OPPOSITE CONNECTION IN THE BRAKING MODE OF AN ASYNCHRONOUS VIBRATION MOTOR

Anatoly L. Kislitsyn

Ph.D. (Engineering), Professor, Department of Electric drive and automation of industrial plants, Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russia. E-mail: alk37@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3023-388X>.

Dmitry I. Dunaev

Postgraduate Student, Department of Electric drive and automation of industrial plants, Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russia. E-mail: dunaeff.dima2015@yandex.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9626-3419>.

Sergei N. Zhirnov

Postgraduate Student, Department of Electric drive and automation of industrial plants, Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russia. E-mail: zjirnov1980@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5608-7393>.

Asynchronous vibrating motors are widely used in practice but they have a significant drawback, a sharp increase in the amplitude of oscillations during the passage of the resonance zone during the start-up and run-out, which negatively affects their operation. Many researchers solved this problem: the use of engines with a significant power reserve (30-70%) or capacitor braking. However, the power reserve degrades energy performance (efficiency and power factor in the operating mode) and capacitor braking is very limited and may not coincide with the resonance zone.

The purpose of the study is to examine and analyze the particular case in which the vibration of the rotor of a vibrating motor at a near resonance frequency occurs when the resonance zone travels by coasting in order to identify the method that makes it possible to exclude this phenomenon. To carry out the research, any serial vibration motor with passport characteristics can be applied. In the present work, the initial data for the study, the research group used the passport characteristics of the IV-105-2.2 serial vibrator with a single-key reverse circuit and the main parameters of the vibration system with the minimum values of dissipative resistances. A mathematical model of the considered vibration system and a vibration motor is developed under the generally accepted assumptions (without taking into account losses in steel, higher harmonics of the magnetic field with uniform air gap and supply voltage, which are a symmetric system of sinusoidal stresses) in the software environment of the MVTU 3.7.

A method for applying a single-key reverse circuit is proposed, which makes it possible to reduce oscillations in the resonance zone and to prevent a jamming of the rotor of the vibration motor at the near resonance frequency while passing through the resonance zone. Calculated oscillograms of transient processes were obtained. The correct application of the mathematical apparatus allows us to state that the results obtained coincide with the various serial vibrators which proves the effectiveness of using a single-key reverse circuit while increasing the reliability of vibrating machines and increasing the life of the electric drive.

**Keywords:** vibration machines, asynchronous vibrating motor, resonance, start-up, braking, amplitude of oscillations, capacitor counter-induction.

#### REFERENCES

1. Blekhman I.I. *Teoriya vibratsionnykh processov i ustroystv. Vibratsionnaya mekhanika i vibratsionnaya tekhnika* [Theory of vibration processes and devices. Vibration mechanics and vibration technology]. St-Petersburg, Ruda i Metally, 2013. 640 p. (In Russian)
2. Shestakov V.M., Belokuzov E.V., Epishkin A.E. Synthesis of the laws governing the operating modes of automated vibration units. *Ehlektrichestvo* [Electricity], 2013, no. 11, pp. 31-35. (In Russian)
3. Jnoue J., Y. Araki, M. Hirakawa. The self-synchronization of mechanical vibrators of the resonance type vibrating machinery with multidegree of freedom. "Dyn. Multi-body Syst. Symp., Munich, 1977", Berlin e. a., 1978, pp. 75-86.
4. Michalczyk J. Angular oscillations of vibratory machines of independent driving systems caused by a non-central direction of the exciting force operations. *Arch. Min. Sci.*, vol. 57, no. 1, Warszawa, 2012. pp. 169-177.
5. Gavrilov E.N. Dynamic processes of resonant vibration machines. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Kazan State University], 2013, no. 12 (16), pp. 87-90. (In Russian)
6. Gavrilov E.N. Mathematical description of a singlemass vibrating transporting machine. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Kazan State University], 2015. no. 1 (18), pp. 339-343. (In Russian)
7. Dmitriev V.N., Lunina N.A., Dunaev D.I. Mathematical modeling of an asynchronous vibrating electric drive. *Trudy VIII Mezhdunarodnoy (XIX Vserossiyskoy) konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu AEP-2014 (Saransk, 7-9 oktyabrya 2014 g.)* [Proceedings of the VIII International (XIX All-Russian) Conference on Automated Electric Drive AEP-2014 (Saransk, October 7-9, 2014)]. Saransk: Mordov Publishing House. Univ., 2014, Vol. 1, pp. 312-315. (In Russian)
8. Gavrilov E.N. *Razrabotka i issledovanie asinhronnogo debalansnogo ehlektropriroda zarezonansnykh vibratsionnykh transportiruyushchih mashin s pusko-tormoznym kondensatornym ustroystvom*. Kand. Diss. [Development and research of an asynchronous unbalanced electric drive of resonant vibrating transporting machines with a start-braking condenser device. Ph.D.Diss.]. Ulyanovsk, 2012.
9. Dmitriev V.N., Kislitsyn A.L. *Sudovye ehlektromekhanicheskie ustrojstva vvoda – vyvoda informatsii* [Ship electromechanical input-output devices]. Moscow: Energoatomizdat Publ., 2006. 253 p. (In Russian)
10. Dunaev D.I., Zhirnov S.N., Shakirov R.N. *Asinhronnyy elektropriwod* [Asynchronous electric drive]. Patent RF, no. 2756010, 2018.

Кислицын А.Л., Дунаев Д.И., Жирнов С.Н. Исследование конденсаторного противовключения в режиме торможения асинхронного вибродвигателя // Электротехнические системы и комплексы. 2018. № 4(41). С. 11-16. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-4\(41\)-11-16](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-4(41)-11-16)

Kislitsyn A.L., Dunaev D.I., Zhirnov S.N. Studying of Condensing Opposite Connection in the Braking Mode of an Asynchronous Vibration Motor. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2018, no. 4(41), pp. 11-16. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-4\(41\)-11-16](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-4(41)-11-16)



## ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ КОМБИНИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ НАГРУЗКИ В ФУНКЦИИ ПОЛОЖЕНИЯ РАБОЧЕГО ОРГАНА

На выбор системы управления электроприводом оказывают влияние разного рода дестабилизирующие факторы, обусловленные нелинейными характеристиками управляемых преобразователей и электрических машин, ограниченной точностью изготовления и конечной жесткостью элементов кинематических цепей, сложной природой технологических процессов, а также неполнотой априорной информации о параметрах и свойствах объекта управления. В этой связи в большинстве случаев нельзя добиться желаемых результатов, используя для построения систем управления сложными техническими объектами классические методы синтеза. В каждом конкретном случае требуется специальный подход, позволяющий избежать детального анализа целого спектра действующих на систему дестабилизирующих факторов, все многообразие которых можно условно разделить на параметрические (внутренние) и координатные (внешние) возмущения. Наиболее сложными электромеханическими системами являются многодвигательные технологически взаимосвязанные электроприводы. Такие системы применяются на предприятиях ряда отраслей промышленности (металлургической, горнодобывающей, строительной, полиграфической и др.) в виде транспортных установок, в которых электродвигатели механически связаны между собой через обрабатываемое изделие, или передачи за счет сил трения движущих моментов общему упругому тяговому органу. В первом случае к системе управления предъявляется требование обеспечения регулируемого натяжения ленты, во втором – приводы должны поддерживать оптимальные соотношения между набегающими и сбегающими ветвями тягового органа. В статье приведены результаты исследований систем оптимального управления позиционным электроприводом. В качестве базового устройства в комбинированной системе управления может быть применена многоканальная задающая модель, которая формирует задающие воздействия, изменяющиеся во времени пропорционально желаемому изменению управляемых координат, и компенсирует ошибку отслеживания. Если, кроме задающей модели, используется и блок наблюдения за соответствием действительного режима заданному, то система управления будет иметь две степени свободы и, следовательно, точность отработки заданного режима повысится.

**Ключевые слова:** электропривод, оптимизация, многодвигательный, двигатель, изменение нагрузки, момент.

### ВВЕДЕНИЕ

Последние годы характеризуются быстрым развитием силовых полупроводниковых преобразователей и микропроцессорной техники, что позволило применить отработанные методы теории регулирования для решения разнообразных задач управления электроприводом. Наиболее перспективными являются комбинированные системы управления, которые обеспечивают быстрое и точное регулирование. Алгоритмы функционирования таких систем можно получить, применив методы сведения ошибки к нулю, наблюдения за эквивалентным возмущением, управления с прямой передачей, а также метод управления со скользящим режимом.

### ОБЪЕКТ И ПРЕДМЕТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Современные системы электропривода циклического действия (приводы экскаваторов, подъемных машин, промышленных манипуляторов и других механизмов) строятся по принципу подчиненного регулирования координат. В большинстве случаев главным требованием к механизмам циклического действия является перемещение рабочего органа на заданное расстояние за минимальное время. За оптимальный режим работы многоприводной системы такого типа принимают режим, который обеспечивает равенство запасов тяговых возможностей. Оптимальные отношения тяговых усилий приводных барабанов должны быть обеспечены системой автоматического управления приводами на всем протяжении рабочего цикла.

### МЕТОДИКА РЕШЕНИЯ ПОСТАВЛЕННЫХ ЗАДАЧ

Оптимизация системы управления многодвигательным электроприводом состоит при изменении нагрузки в функции положения рабочего органа.

Разность натяжений в набегающей и сбегающей ветвях тягового органа ( $S_{нб} - S_{сб} = F_0$ ) в статически неуравновешенной системе вертикального подъемника зависит от положения концевых грузов и может меняться от максимального ( $F_{0,max}$ ) до минимального ( $F_{0,min}$ ) значений при максимальной протяженности пути  $H_m$ . Тогда для текущего перемещения  $x$  можно записать зависимость  $F_0 = f(x)$  в статическом режиме следующим образом:

$$F_0 = K_q Q + (H_m - 2x) q_t, \quad (1)$$

где  $q_t$  – составляющая усилия  $F_0$  при перемещении концевых грузов на 1 м, Н/м;  $K_q Q$  – приведенная нагрузка;  $H_m$  – максимальное заданное перемещение концевых грузов.

Из уравнения (1) следует, что в течение одной подъемной операции  $F_0$  не только изменяется в функции перемещения, но и будет изменять знак, если  $H_m q_t > K_q Q$ . Поэтому при построении системы управления нужно учитывать возможность перехода двигателя с двигательного режима в тормозной, т.е. система должна работать устойчиво и в области прерывистых токов.

Тяговые возможности привода определяются углами  $a_{10}$ ,  $a_{20}$ ,  $a_{30}$  обхвата приводных барабанов тяговым органом. Если эти углы связаны соотношениями  $a_{10} = K_1 a_{20}$ ,  $a_{10} = K_2 a_{30}$ , то в общем случае максимально возможное тяговое усилие  $F_0$ , развиваемое всеми двига-

телями, углы рабочего проскальзывания  $a_1, a_2, a_3$  и соотношения тяговых усилий отдельных двигателей  $F_1/F_0, F_2/F_0, F_3/F_0$  определяют из выражений:

$$\begin{cases} F_0 = S_{сб} \left[ e^{\mu a} 1^{\left(1 + \frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_2}\right)} - 1 \right]; \\ a_1 = \frac{K_1 K_2}{\mu (K_1 + K_2 + K_1 K_2)} \ln S_0; \\ a_2 = \frac{a_1}{K_1}; a_3 = \frac{a_1}{K_2}; \\ F_1/F_2 = \left( S_0 - S_0^{\frac{K_1}{a_0}} \right) / \left( S_0^{\frac{K_1}{a_0}} - 1 \right); \\ F_2/F_3 = \left( S_0^{\frac{K_1 K_2 + K_2}{a_0}} - S_0^{K_2/a_0} \right) / \left( S_0^{K_1/a_0} - 1 \right), \end{cases} \quad (2)$$

где  $\mu$  – коэффициент сцепления тягового органа с фетровой барабанов;  $K_0 = K_1 + K_2 + K_1 K_2$ ;  $S_0 = S_{нб}/S_{сб}$ .

При одинаковых углах обхвата ( $a_1=a_2=a_3$ ) оптимальное отношение тяговых усилий любых соседних барабанов определяется по формуле

$$F_i/F_{i+1} = S_0^{1/n},$$

где  $n$  – число приводных барабанов.

Отсчет приводных барабанов ведется от набегавшей ветви с усилием  $S_{нб}$ . При работе в оптимальном режиме отношения  $F_1, F_2, F_3$  к  $K_0$  определяется из выражений:

$$\begin{cases} F_1/F_0 = \left( S_0 - S_0^{(a_0 - K_1 K_2)/a_0} \right) / (S_0 - 1); \\ F_2/F_0 = \left( S_0^{(a_0 - K_1 K_2)/a_0} - S_0^{K_1/a_0} \right) / (S_0 - 1); \\ F_3/F_0 = \left( S_0^{K_1/a_0} - 1 \right) / (S_0 - 1). \end{cases} \quad (3)$$

Определим усилия  $F_1, F_2, F_3$  в период одного рабочего цикла без учета динамических составляющих при изменении  $F_0$  от  $+F_{0,max}$  до  $-F_{0,max}$ . Примем  $K_1 = K_2$  и в соответствии с приведенными зависимостями составим структурную схему алгоритма решения данной задачи на ЭВМ (рис. 1). Графики  $F_1, F_2, F_3$  приведены на рис. 2. Из графиков видно, что оптимальная нагрузка на средний привод составляет в любом положении концевых грузов примерно 1/3 от общего усилия  $F_0$  и является симметричной относительно осей координат. Нагрузки других двигателей в пределах одного цикла существенно меняются. Причем при положительном общем движущем моменте первый двигатель (со стороны набегавшей ветви) должен развивать наибольший момент, третий – наименьший.

При переходе в тормозной режим, обусловленный изменением знака  $F_0$ , происходит перераспределение нагрузок между первым и третьим двигателями и в отношении нагрузки они меняются местами: третий двигатель развивает максимальный тормозной момент, а первый – минимальный.

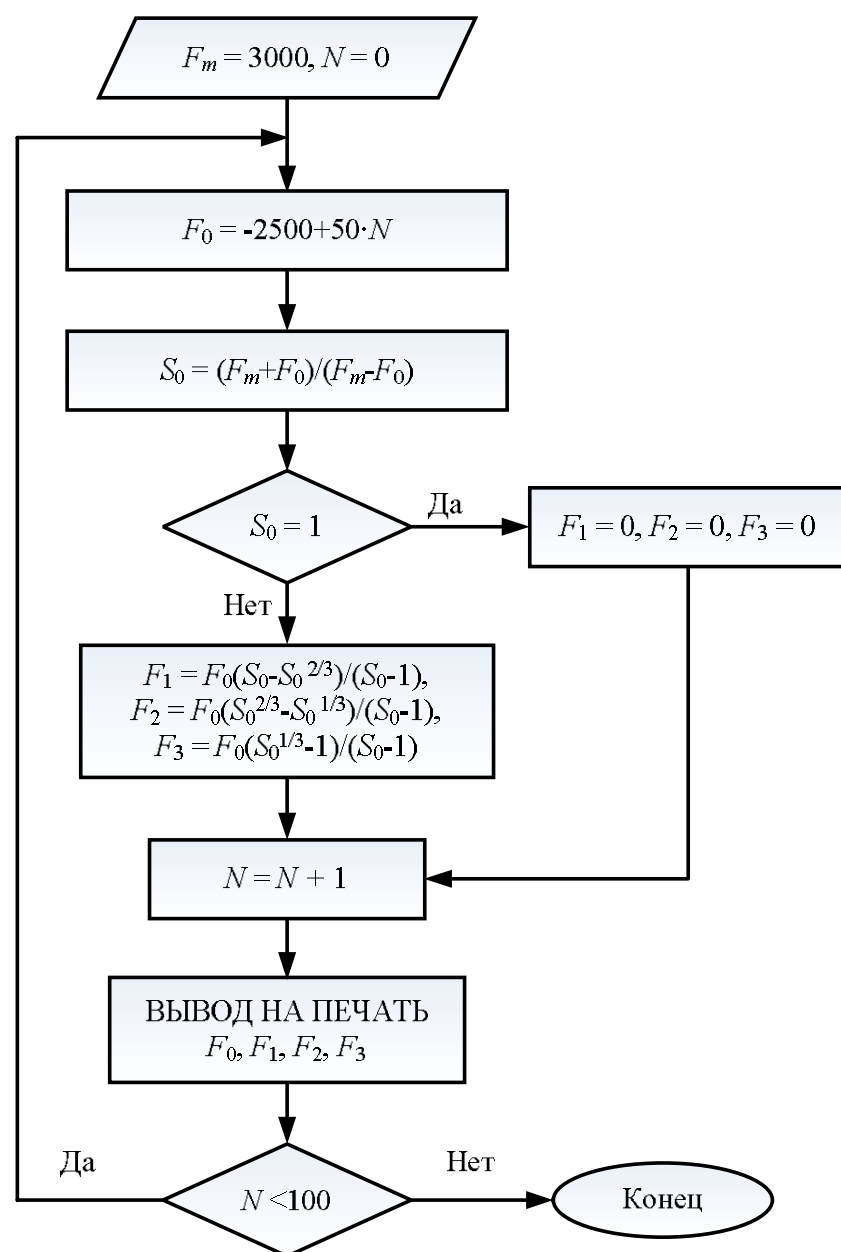


Рис. 1. Структурная схема алгоритма определения движущих усилий

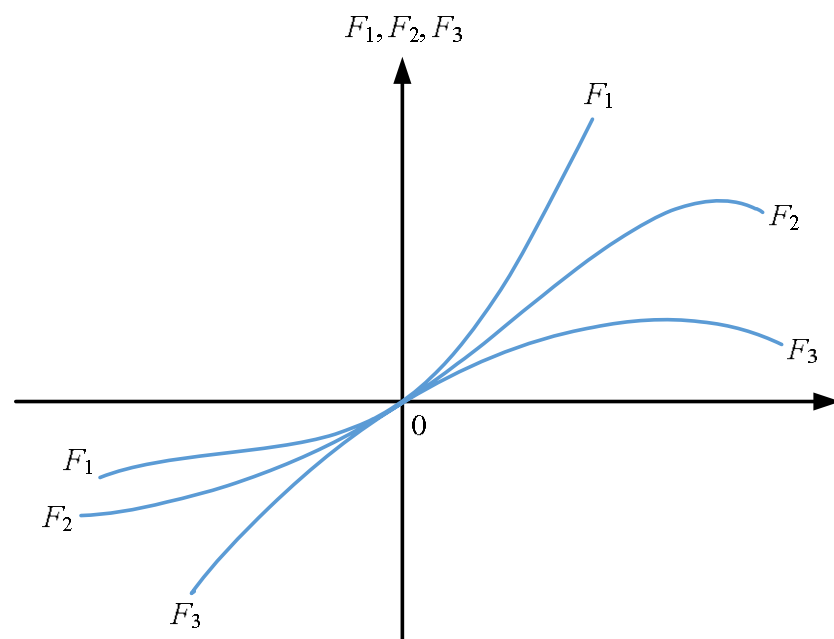


Рис. 2. Графики изменения движущих усилий в течение одного цикла

В соответствии с таким характером распределения общего требуемого движущего (тормозного) момента между отдельными двигателями должна строиться система управления приводом. Следует учитывать то обстоятельство, что практически во всех случаях работы реальных систем данного типа будет иметь место переход через зону прерывистых токов.

Графики изменения скорости и тока якорной цепи при знакопеременном статическом моменте, полученные на ЭВМ (см. рис. 2) по уравнениям (3) и структурной схеме алгоритма (рис. 1), показывают, что для достижения режима с заданным законом изменения скорости, кроме обеспечения устойчивого функциониро-



вания контура тока каждого из двигателей, привод должен иметь общий контур регулирования скорости с соответствующей задающей моделью (ЗМ).

Укрупненная функциональная схема управления многодвигательной системой привода представлена на рис. 3.

Динамика механической системы описывается уравнениями:

$$\begin{cases} R^{-2} J_0 \frac{dV_d}{dt} = (M_{д1} + M_{д2} + M_{д3}) \frac{I}{R_{п.ш}} - F_0; \\ X_d = \int V_d(t) dt, \end{cases} \quad (4)$$

где  $V_d$  – линейная скорость перемещения концевых грузов;  $X_d$  – пройденный путь;  $J_0$  – суммарный приведенный момент инерции всех движущихся звеньев, включая моменты, развиваемые отдельными двигателями;  $R_{п.ш}$  – радиус приводных шкивов; КРТ, КРТ2, КРТ3 – контуры регулирования тока двигателей, включая преобразовательные агрегаты и регуляторы тока (выбор параметров осуществляется для каждого двигателя индивидуально); ЗМ – задающая модель, формирующая управление сигналы  $U_{п.}$ ,  $U_{с.}$ ,  $U_{а.}$ , пропорциональные соответственно заданным диаграммам изменения положения концевых грузов  $X$ , скорости  $V$  и ускорения  $a$ ; РП – регулятор положения; БФЗТ – блок формирования сигналов  $U_{3.т1}$ ,  $U_{3.т2}$ ,  $U_{3.т3}$ , пропорциональных заданным значениям токов двигателей  $I_{я1}$ ,  $I_{я2}$ ,  $I_{я3}$ ;  $\Delta U_{п.}$  – сигнал ошибки по положению;  $U_{п.м}$  – сигнал, пропорциональный заданному перемещению  $X_m = H_m$ ; БФСН – блок формирования статических нагрузок  $F_0$ ,  $F_1$ ,  $F_2$ ,  $F_3$  по формулам (1) и (2).

Для построения общей структурной схемы системы управления нужно определить алгоритмическую структуру БФСН, используя зависимости (1) и (2).

Входной переменной является перемещение  $x_{п.}$ , выходными величинами – усилие  $F_0$  и отношения  $F_1/F_0$ ,  $F_2/F_0$ ,  $F_3/F_0$ . Такая схема представлена на рис. 4.

В процессе движения системы пройденный путь  $x_{п.}$  меняется от нуля до  $H_m$ . Соответственно, изменяются усилие  $F_0$  и отношение  $S_0$ . Построение БФСН должно осуществляться на базе микропроцессорной техники.

Для упрощения функциональных схем системы управления графики  $f_0 = F_1/F_0$ ;  $f_2 = F_2/F_0$  и  $f_3 = F_3/F_0$ , полученные по алгоритму определения  $F_1$ ,  $F_2$ ,  $F_3$ ,  $F_0$  (см. рис. 1), можно аппроксимировать отрезками прямых линий, как показано на рис. 5. Как следует из графиков, все кривые 1, 2, 3, соответствующие первому, второму и третьему двигателям, пересекают вертикальную ось при одинаковых коэффициентах  $f_i$ , равных  $f_1 = f_2 = f_3 = 1/3 \approx 0,33$ .

Это свидетельствует о том, что при малых нагрузках, близких к режиму холостого хода, двигатели должны развивать примерно одинаковые моменты. При увеличении нагрузки  $F_0$  крайний двигатель со стороны большего по абсолютной величине усилия, действующего на орган навивки ( $S_{нб}$  и  $S_{сб}$ ), в оптимальном режиме будет развивать наибольший момент, средний должен создавать момент, примерно равный  $1/3$  суммарного  $M_{дв.}$ , а момент третьего двигателя  $M_{д3}$  будет равен разности  $M_{д.} - M_{д1} - M_{д2}$ .

Если аппроксимировать графики на рис. 5 прямыми, показанными штриховыми линиями, то относительные нагрузки будут определяться из выражений:

$$\begin{cases} f_1 = 0,33 + 0,21f_0; \\ f_2 = 0,33; \\ f_3 = 0,33 - 0,21f_0, \end{cases} \quad (5)$$

где  $f_0 = F_0/|F_{0, \max}|$ ,  $F_{0, \max} = KQ + q_T H_{п.}$

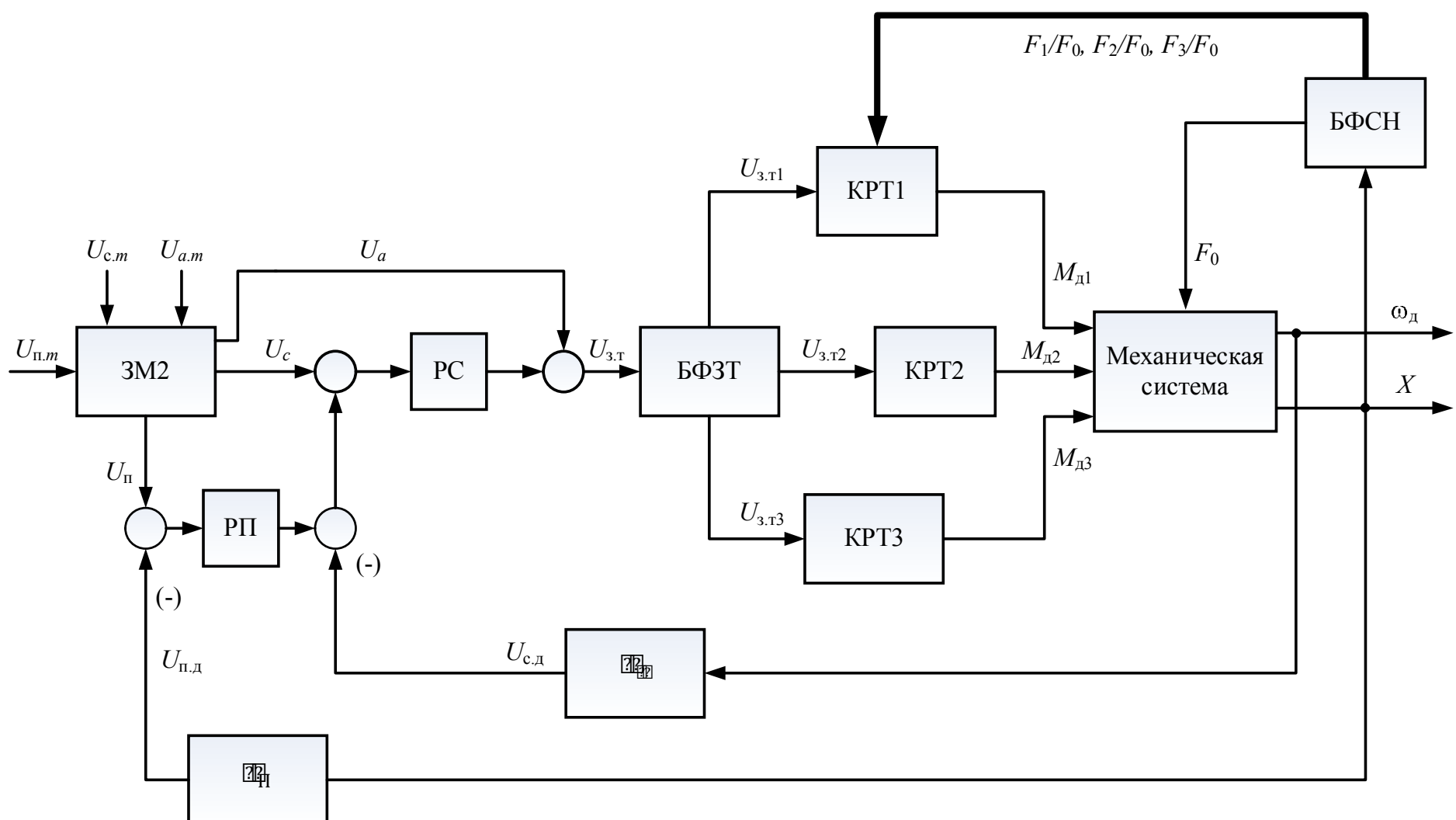


Рис. 3. Функциональная схема управления многодвигательным электроприводом

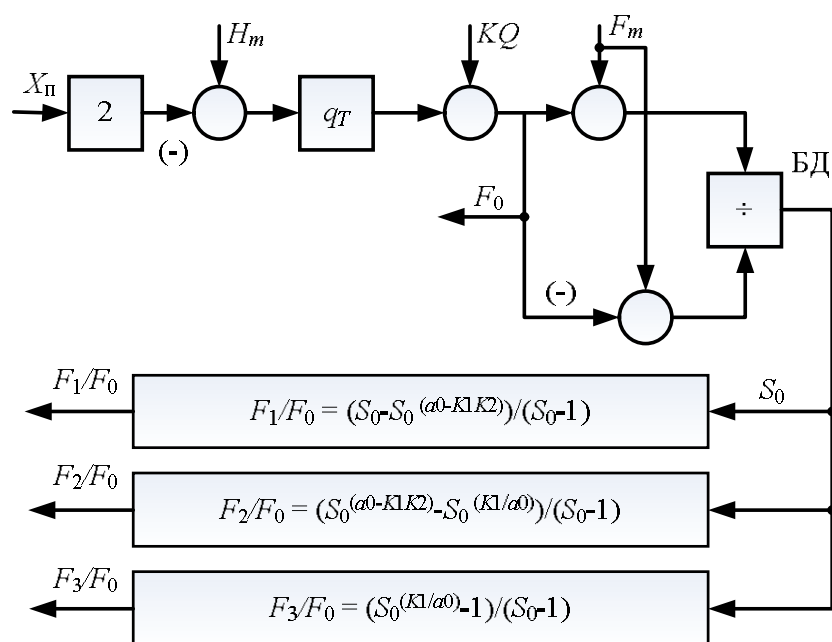


Рис. 4. Схема определения движущих усилий (в относительных единицах)

В результате такого представления зависимостей усилий  $F_1, F_2, F_3$  от общего тягового усилия  $F_0$  существенно упрощается структура БФСН, показанная на рис. 4.

Согласно формулам (5) при любом значении коэффициента  $f_0$  (при любом положении концевых грузов) сумма коэффициентов  $f_1, f_2, f_3$  равна единице, т.е. всегда привод передает требуемый суммарный момент  $M_d$ . Структурная схема БФСН, соответствующая аппроксимированным характеристикам  $f_i(F_0)$ , показана на рис. 6, из которого ясно, что для определения относительных нагрузок на двигателе достаточно по текущему перемещению  $x_{п}$ , приведенной нагрузке  $KQ$  и максимальному заданному перемещению концевых грузов  $H_{п}$  вычислить коэффициент  $f_0$ .

С помощью блоков перемножения БП1, БП2 и БП3 полный управляющий сигнал  $U_{3,Т}$ , включающий как статическую, так и динамическую составляющие, распределяется между контурами токов каждого из двигателей по оптимальному закону с помощью коэффициентов  $f_1$ . Так как коэффициенты  $K_{Т1}, K_{Т2}, K_{Т3}$  выбираются по отношению к максимальному полному сигналу, то в данной системе с ПИ-регуляторами тока всегда должен устанавливаться режим работы с требуемым (оптимальным) распределением движущего момента между двигателями. Переменная нагрузка двигателей должна учитываться при выборе номинальной мощности отдельных двигателей и определении полной потребляемой мощности привода.

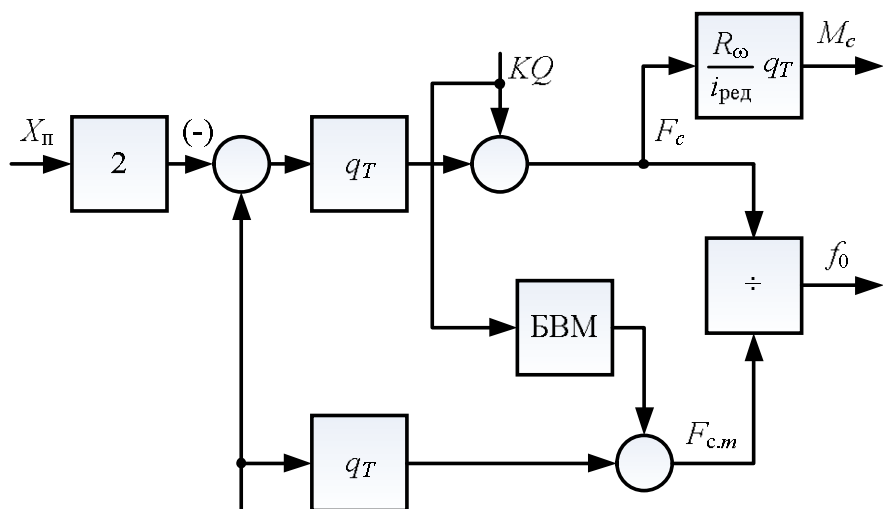


Рис. 5. Схема блока формирования статической нагрузки

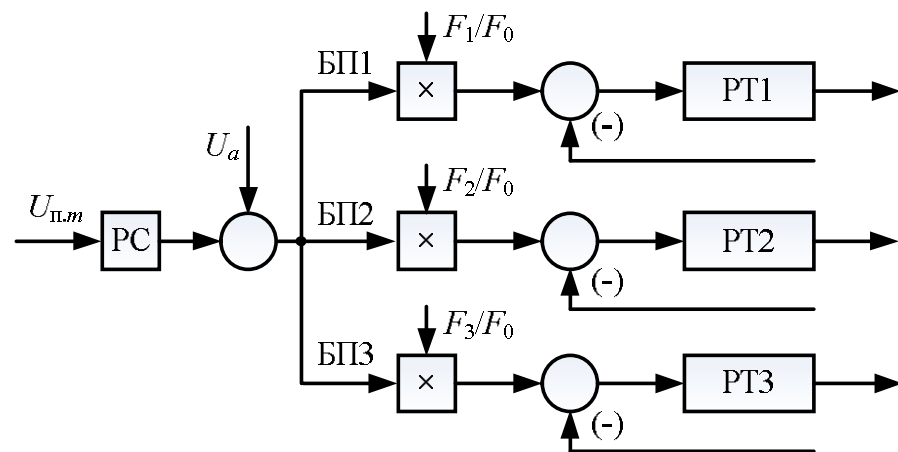


Рис. 6. Функциональная схема БФСН

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из изложенного выше ясно, что с помощью ЗМ, формирующей оптимальные задающие воздействия, пропорциональные желаемым диаграммам изменения управляемых переменных (скорости и ускорения), достигается оптимизация технологического процесса по режиму управления.

Комбинированная система подчиненного регулирования обеспечивает оптимизацию по переходными процессам (управляемые переменные практически без ошибок воспроизводят задающие воздействия). Третий критерий оптимальности состоит в оптимальном распределении нагрузки между двигателями согласно коэффициентам  $f_1, f_2, f_3$ . В рассмотренной системе в отличие от известных особое значение приобретает использование специального задающего воздействия по ускорению с блоками перемножения в прямых передачах. Такие системы относятся к классу комбинированных по управляющему воздействию. Полученные структурные схемы и алгоритмы функционирования как системы управления, так и ее отдельных блоков могут быть использованы при выборе типов неуравновешенных подъемных установок сверхглубоких шахт из двух и трех двигательных приводом.

Такие системы имеют установленную мощность привода, на 20-30% превышающую мощность привода статически уравновешенных систем подъема, но расход электроэнергии уменьшается на 7-10%.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шабо К.Я. Системы оптимального управления позиционным тиристорным электроприводом с многоканальной задающей моделью: учеб. пособие. Нерюнгри. Изд-во ТИ(ф) СВФУ, 2015. 56 с.
2. Чермалых В.М., Афанасьев Ю.А., Чермалых Т.В. Построение адаптивных систем позиционного управления электроприводами машин и установок // Изв. вузов. Горный журнал. 1992. № 10. С. 73-77.
3. Алтухов Е.И., Чермалых Т.В. Алгоритмическое обеспечение микропроцессорного управления машинами и установками циклического действия // Вестник Киевского политехн. ин-та. Горная электромеханика и автоматика. 1993. Вып. 2. С. 20-29.
4. Куо Б. Теория и проектирование цифровых систем управления. М.: Машиностроение, 1986. 448 с.
5. Диткин В.А., Прудников А.П. Справочник по операционному исчислению. М.: Высшая школа, 1965. 466 с.
6. Уткин В.И. Скользящие режимы в задачах оптимизации и управления. М.: Наука, 1981. 368 с.
7. Борцов Ю.А., Юнгер И.Б. Автоматические системы с разрывным управлением. Л.: Энергоатомиздат, 1986. 168 с.

8. Чермалых В.М., Родькин Д.И., Каневский В.В. Системы электропривода и автоматики рудничных стационарных машин и установок. М.: Недра, 1978. 398 с.
9. Липковский К.А., Чермалых Т.В. Адаптивная система управления промышленными установками с вентиля-

ми двигателями // Тез. докл. 1-й Украинской конференции по автоматическому управлению. 18-23 мая 1994. Ч.2. Киев, 1994. 428 с.

Поступила в редакцию 24 сентября 2018 г.

## INFORMATION IN ENGLISH

### OPTIMIZATION OF COMBINED ELECTRIC MOTOR DRIVE CONTROL WHEN LOAD CHANGES AS A FUNCTION OF THE POSITION OF THE WORKING ELEMENT

Kamil Ya. Shabo

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, the Department of Electric Drive and Industrial Automation, Ammosov North-Eastern Federal University, Technical Institute (branch), Neryungri, Russia. E-mail: kamilshabo@rambler.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5171-835X>.

The choice of the electric drive control system is provided by various destabilizing factors due to the nonlinear characteristics of the controlled converters and electric machines, limited manufacturing accuracy and final stiffness of the elements of the kinematic circuits, the complex nature of technological processes as well as incomplete a priori information about the parameters and properties of the control object. In this regard, in most cases it is impossible to achieve the desired results using classical synthesis methods to build control systems for complex technical objects. In each case, a special approach is required to avoid a detailed analysis of the whole spectrum of destabilizing factors acting on the system, all the variety of which can be divided into parametric (internal) and coordinate (external) disturbances. The most complex electromechanical systems are multi-motor technologically interconnected electric drives. Such systems are used at the enterprises of a number of industries (metallurgical, mining, construction, printing, etc.) in the form of transport units in which the electric motors are mechanically connected through the processed product or transmission due to the friction forces of the driving moments to the general elastic traction body. In the first case, the control system is required to ensure the adjustable tension of the belt, in the second one, the drives must maintain optimal relations between the oncoming and escaping branches of the traction body. The article presents the results of studies of optimal control systems of positional electric drive. As a basic device in the combined control system, a multi-channel master model can be used, which forms the master actions that change in time in proportion to the desired change in the controlled coordinates and compensates for the tracking error. If, in addition to the master model, the monitoring unit is used to monitor the compliance of the actual mode with the specified one, the control system will have two degrees of freedom and, therefore, the accuracy of the specified mode will increase.

**Keywords:** Electric drive, optimization, multi-motor, motor, load change, torque.

#### REFERENCES

1. Shabo K.Ya. Sistemy optimalnogo upravleniya pozitsionnym tiristornym elektroprivodom s mnogokanalnoy

- zadayushchey modelyu [Optimal control systems for positional thyristor electric drive with multichannel master model]: Textbook. Neryungri: Publishing center of TI (f) SVFU, 2015, 56 p. (In Russian)
2. Chermalykh V.M., Afanasyev Yu.A., Chermalykh T.V. Construction of adaptive systems for position control of electric drives of machines and installations // Izv. vuzov. Gornyi zhurnal [Bulletin of universities. Mining journal]. 1992, no. 10, pp. 73-77. (In Russian)
3. Altukhov E.I., Chermalykh T.V. Algorithmic support of microprocessor control of machines and installations of cyclic action. Vestnik Kievskogo politekhn. in-ta. Gorn. elektromekhanika i avtomatika [Bulletin of Kiev Polytechnic Institute. Mining electromechanics and automation]. 1993. Iss. 2, pp. 20-29.
4. Kuo B. Teoriya i proektirovanie tsifrovyykh system upravleniya [The theory and design of digital control systems]. Moscow: Mechanical Engineering, 1986. 448 p. (In Russian)
5. V.A. Ditkin, A.P. Prudnikov. Spravochnik po operatsionnomu ischisleniyu [Handbook of operational calculus]. Moscow: Higher School, 1965. 466 p. (In Russian)
6. Utkin V.I. Skolzyashchie rezhimy v zadachakh optimizatsii i upravleniya [Sliding modes in optimization and control tasks]. Moscow: Nauka, 1981. 368 p. (In Russian)
7. Bortsov Yu.A., Yunger I.B. Avtomaticheskie sistemy s razryvnym upravleniem [Automatic systems with discontinuous control]. Leningrad: Energoatomizdat, 1986. 168 p. (In Russian)
8. Chermalykh V.M., Rodkin D.I., Kanevsky V.V. Sistemy elektroprivoda i avtomatiki rudnichnykh statsionarnykh mashin i ustanovok [Systems of electric drive and automation of mine stationary machines and installations]. Moscow: Nedra, 1978. 398 p. (In Russian)
9. Lipkovskii K.A., Chermalykh T.V. Adaptive control system for industrial installations with valve motors. Tез. dokl. 1-i Ukrainskoy konferentsii po avtomaticheskomy upravleniyu. 18-23, maya 1994 [Abstracts of 1-st Ukrainian conference on automatic control. 18-23 May 1994]. Kiev, 1994. 428 p.

Шабo К.Я. Оптимизация системы комбинированного управления электроприводом при изменении нагрузки в функции положения рабочего органа // Электротехнические системы и комплексы. 2018. № 4(41). С. 17-21. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-4\(41\)-17-21](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-4(41)-17-21)

Shabo K.Ya. Optimization of Combined Electric Motor Drive Control when Load Changes as a Function of the Position of the Working Element. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2018, no. 4(41), pp. 17-21. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-4\(41\)-17-21](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-4(41)-17-21)



Гасияров В.Р.

Южно-Уральский государственный университет (НИУ)

## СОГЛАСОВАНИЕ СКОРОСТЕЙ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ И ГИДРАВЛИЧЕСКИХ НАЖИМНЫХ УСТРОЙСТВ ПРИ АВТОМАТИЧЕСКОМ КОНТРОЛЕ ПРОФИЛЯ РАСКАТА

Названы причины отклонений ширины раската при прокатке на толстолистовом стане. Показано, что эффективным способом улучшения формы листа в плане является прокатка с формированием двойного конического профиля на концах раската. Представлены режимы прокатки с автоматическим контролем профиля (ASC) как передовой технологии, применяемой на современных станах. Отмечены недостатки, основным из которых является несоответствие скорости выхода металла из валков и линейной скорости рольганга перед клетью при перемещении нажимных устройств (НУ). Другим недостатком является неудовлетворительная точность компенсации перекося зазора валков по сторонам прокатки, определяемая настройкой регулятора контроля выравнивания прокатки (RAC). Рассмотрены схема и принцип действия системы автоматического регулирования толщины (САРТ) реверсивной клетки стана 5000. Предложен способ управления, согласно которому осуществляется коррекция скорости валков пропорционально перемещению НУ. Показана схема реализации способа в структуре действующей САРТ. Обосновано применение пропорционально-дифференциального RAC-регулятора, даны рекомендации по его настройке. Представлены осциллограммы усилий прокатки и корректирующих сигналов на гидравлические НУ, подтверждено снижение перекося зазора валков. Рассмотрены осциллограммы координат НУ и скоростей электроприводов в режиме формирования обратного конического профиля на хвостовом участке раската для случаев проектной и рекомендуемой настройки RAC-регулятора. Сделаны выводы о снижении ошибки согласования зазоров со стороны электропривода и со стороны поста оператора. Даны рекомендации по практическому внедрению предложенных технических решений.

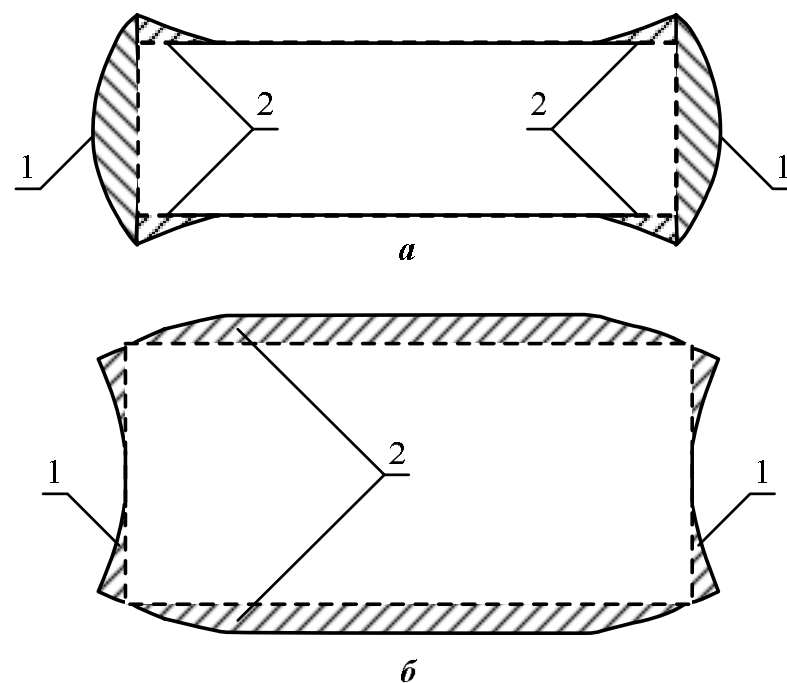
**Ключевые слова:** толстолистовой прокатный стан, профилированная прокатка, реверсивная клеть, система автоматического регулирования толщины, электропривод, скорость, коррекция, гидравлические нажимные устройства, зазор, RAC-регулятор, настройка, экспериментальные исследования, рекомендации.

### ВВЕДЕНИЕ

Технологический процесс прокатки на толстолистовых станах включает следующие операции: протяжку – прокатку сляба в продольном направлении за один либо несколько проходов с небольшими обжатиями с целью регулирования формы боковых граней, разбивку ширины – прокатку в поперечном направлении с целью формирования необходимой ширины листа и продольную чистовую прокатку. Уменьшение сечения на первых двух стадиях вследствие относительно большой толщины проката сопровождается значительным изменением его ширины (уширением). Это связано с тем, что при высоком очаге деформации имеет место деформация в поперечном относительно оси прокатки направлении. Это приводит к отклонению формы листа в плане (в проекции сверху) от прямоугольной и, как следствие, к увеличению боковой и торцевой обрезки.

Наибольшее уширение проявляется на переднем и заднем концах раската. Поэтому при дальнейшей прокатке на концах раската и по боковым кромкам образуются участки неправильной формы, показанные на **рис. 1**, вызывающие потери в обрезь до 5–7%. Распределение торцевой 1 и боковой 2 обрезки, выделенной штриховкой, зависит от соотношения суммарных обжатий при поперечной и продольной прокатке. По мере увеличения деформаций при поперечной прокатке количество концевой обрезки уменьшается.

Исследованию способов снижения потерь металла с обрезью и улучшению геометрической формы листов посвящены исследования многих авторов, в том числе [1–4]. В работе [5] выполнен анализ способов снижения расходного коэффициента за счет регулируемого изменения формы раската.



**Рис. 1. Форма листа в плане при продольной (а) и при поперечной (б) схемах прокатки на толстолистовом стане; 1 – торцевая обрезь, 2 – боковая обрезь**

К основным способам относятся: косая прокатка, изменение поперечного профиля сляба, предварительное обжатие вертикальными валками и др. Показано, что наиболее эффективным способом улучшения формы листа в плане является прокатка с профилированием широких граней раската горизонтальными валками (профилированная прокатка). Суть этого способа заключается в том, что в последнем пропуске при протяжке или разбивке ширины производят деформацию раската с переменным обжатием по длине с тем, чтобы скомпенсировать дальнейшее отклонение его формы от прямоугольной. В результате формируется двойной конический профиль толщины, получивший название «собачья кость». В направлении создания систем, обеспечивающих реализацию данного способа, следует отметить публикации специалистов SMS-Demag [6],



японских фирм Nippon Steel, Sumitomo Metal Corporation [7, 8] и др.

#### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для практической реализации способа профилированной прокатки применяются несколько технологий: MAS-прокатка, EGO-прокатка, Plan View Control (управление геометрией) [8–10]. Для обеспечения практически полной прямоугольности листа в плане на современных станах применяется автоматический контроль профиля (ASC), схемы которого показаны на **рис. 2**. Поскольку неровности краев встречаются на головном и хвостовом участках, а также на кромках листа, функция ASC применяется на разных этапах прокатки. Для воздействия на форму головной и хвостовой частей на повернутом листе применяется конический профиль, показанный на **рис. 2, а**. В свою очередь, форма кромки листа улучшается при использовании ASC после последнего калибровочного пропуска (**рис. 2, б**).

Функции формирования переменного профиля по длине раската обеспечиваются системой автоматического регулирования толщины, управляющей гидравлическими нажимными устройствами (ГНУ). Ниже этот процесс рассматривается на примере ГНУ и САРТ толстолистового стана 5000, рассмотренных в публикации [11]. В этом режиме задание на скорость перемещения ГНУ формируется в функции длины и, соответственно, скорости движения металла.

Регулирование зазора при прокатке профилированных участков приводит к изменению фактической скорости движения металла на входе в клеть и выходе из клетки. В результате возникают нарушения равенства секундных объемов металла на рольгангах и в очаге деформации, что приводит к нарушению скоростного режима прокатки.

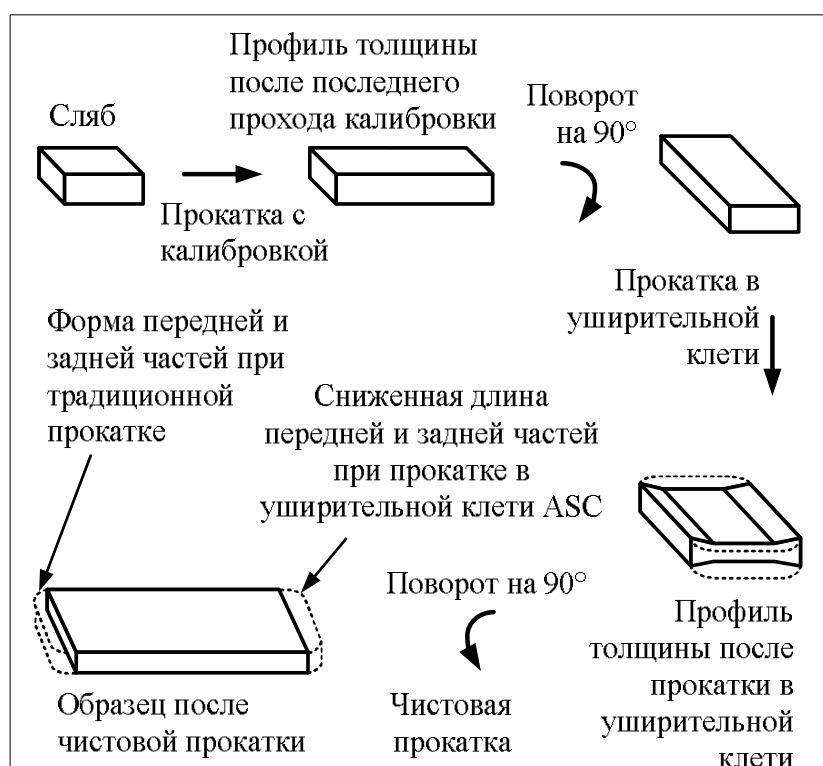
Кроме того, исследования показали, что на точность формирования переменной толщины по длине и, соответственно, на конечную форму листа оказывает влияние разность усилий, формируемых гидроцилин-

драми по сторонам прокатки (слева и справа по ходу движения металла). Это приводит к возникновению «перекоса» раствора валков и искажению профиля «собачья кость» (пояснения к терминам «зазор» и «раствор валков» даются ниже). Разница усилий прокатки обусловлена следующими факторами:

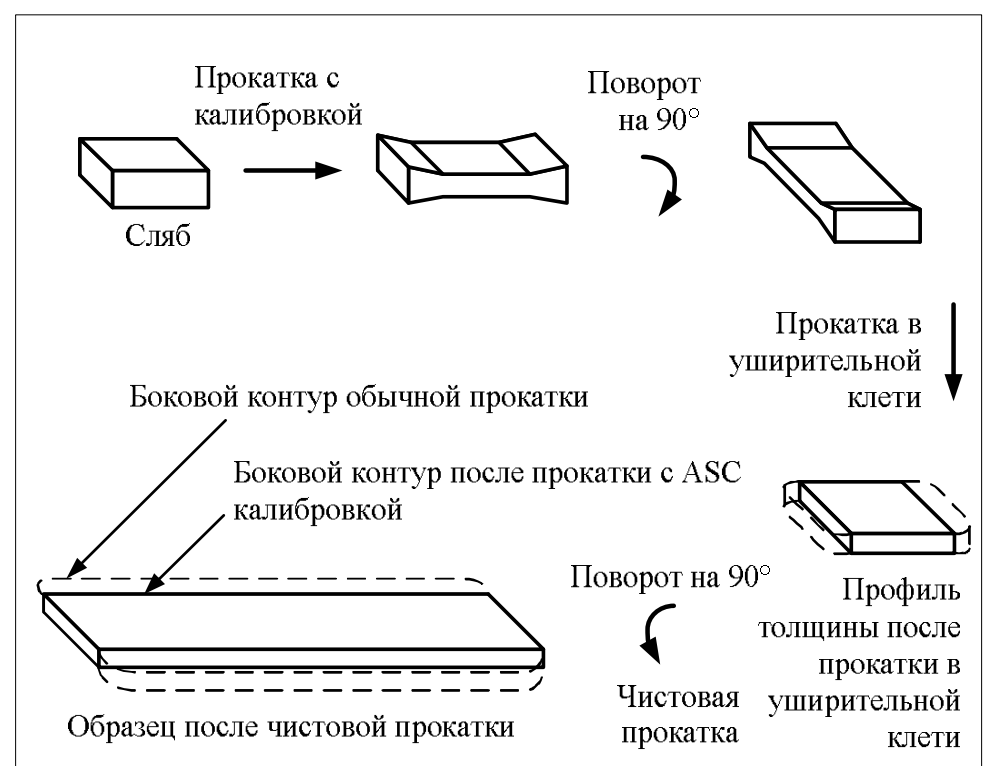
- разницей температур на стороне привода и стороне оператора;
- лист прокатывается не по центру стана;
- коробоватостью подката [12].

Перекас раствора валков приводит к увеличению разнотолщинности по ширине раската, а также появлению дефекта «серповидность» [12]. Эти показатели отрицательно сказываются на качестве конечной продукции, поэтому целесообразна разработка технических решений, направленных на устранение указанных недостатков.

Для компенсации перекаса раствора служит РАС-регулятор, который выравнивает растяжение клетки в случаях, когда усилия по сторонам различаются. Он поддерживает заданное усилие, воздействуя на гидравлические НУ. На вход регулятора последовательно подаются уровни усилий из таблицы, которая хранится в программном обеспечении АСУ ТП стана. Заполнение таблицы происходит автоматически при длинной калибровке (после перевалки валков) по специальной программе. Отклонения профиля от заданного и, соответственно, форма листа в плане зависят от точности согласования давлений в левом и правом гидроцилиндре, которая определяется настройкой РАС-регулятора. Ниже рассмотрены усовершенствования в структуре САРТ, обеспечивающие согласование скоростей валков и рольганга при перемещении НУ. Также представлены рекомендации по настройке РАС-регулятора, обеспечивающие повышение точности регулирования раствора по сторонам прокатки и, соответственно, компенсацию разнотолщинности по ширине раската.



а



б

Рис. 2. Схемы прокатки по технологии ASC

### Характеристика САРТ стана 5000

Принцип действия САРТ основан на известном уравнении Головина-Симса [13]. Он поясняется характеристиками, представленными на **рис. 3**. Поскольку во время прокатки невозможно измерить фактический раcтвор валков, он рассчитывается, по уравнению

$$h = S + g(F_w).$$

Таким образом, раcтвор валков  $h$  зависит от положения цилиндра  $S$  и растяжения клетки  $g$ , которое является функцией усилия прокатки  $F_w$ . Задачей САРТ является компенсация колебаний растяжений клетки, вызванных процессом прокатки, согласно уравнению

$$\Delta h = \Delta S + \Delta g(F_w).$$

Приращение толщины  $\Delta h$  при изменении зазора  $\Delta S_0$  зависит от коэффициентов (модулей) жесткости клетки  $M_G$  и полосы  $M_B$ :

$$\Delta h = \Delta S_0 \frac{M_G}{M_B + M_G}. \quad (1)$$

Схема системы вычисления сигнала толщины показана на **рис. 4**. Толщина раската определяется косвенным образом по сигналам от датчиков положения НУ, усилию прокатки и различных компенсаций (толщины масляной пленки в подшипниках, теплового расширения вала, износа валков и др.). Они показаны в виде сигналов, подаваемых на общий сумматор. Воздействие, формирующее сигнал на перемещение гидравлических НУ при профилированной прокатке, показано в виде сигнала ACS, который суммируется с сигналом коррекции зазора на головном и хвостовом участках и перечисленными компенсирующими воздействиями. Суммарный сигнал подается на вход регулятора положения ГНУ (на **рис. 4** не показан). Более подробно работа системы регулирования раcтвора валков и САРТ рассмотрена в [11].

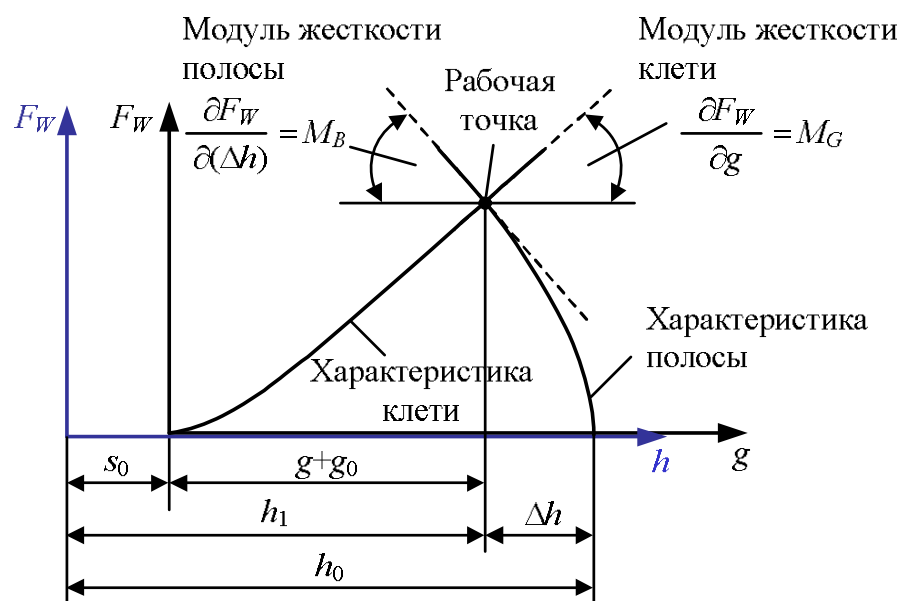


Рис. 3. Зависимость толщины на выходе клетки от величины зазора:

$h_0$  — толщина на входе;  $h_1$  — толщина на выходе;  
 $S_0$  — начальный зазор валков (без полосы)

Как отмечено выше, недостатком алгоритма управления прокаткой в проходах с профилированием является отсутствие коррекции скорости электроприводов валков при перемещении ГНУ. Необходимость такой коррекции вызвана тем, что на фактическую скорость металла помимо скорости вращения валков оказывают влияние отставание и опережение. Эти параметры определяются величиной межвалкового зазора и, соответственно, его изменением в процессе профилированной прокатки. При перемещении нажимных устройств возникает рассогласование реальной скорости металла и скорости роликов рольганга. Это приводит к возникновению ударов в электромеханических системах роликов, их разрушению и возникновению аварий. Кроме того, возрастает риск застревания раската при выходе на рольганг. Для устранения данных недостатков предложено осуществлять коррекцию скорости валков в проходах с автоматическим контролем профиля.

### Коррекция скорости валков при перемещении ГНУ

Величину коррекции скорости при изменении обжатия можно определить из уравнения равенства секундных объемов (масс) металла на входе и выходе клетки [14]:

$$h_0 \cdot v_0 = h_1 \cdot v_1,$$

где  $v_0, v_1$  — скорости металла на входе и выходе клетки.

С учетом выражения (1) приращение скорости металла на входе в клетку

$$\Delta v_0 = \frac{v_1}{h_0} \Delta S_0 \frac{M_G}{M_B + M_G}. \quad (2)$$

При реализации предложенного способа управления сигнал коррекции скорости электроприводов формируется звеньями, выделенными на **рис. 4** контуром. Регулирующий сигнал вычисляется по выражению (2) и подается в схему ограничения нагрузок электроприводов при захвате металла, реализованную в программе второго уровня АСУ ТП стана. Это обеспечивает пропорциональное регулирование скорости  $\Delta v_0$  при возникновении приращения зазора валков  $\Delta S_0$ . В результате осуществляется автоматическое согласование скорости металла на входе в клетку и линейной скорости роликов рольганга.

### Настройка РАС-регулятора

Структура РАС-регулятора показана на **рис. 5**. Целью регулирования является исключение перекоса раcтвора валков и искажения профиля раската. Для этого на вход регулятора подается нулевой сигнал, который сравнивается с фактическими величинами зазоров со стороны оператора (OS) и со стороны привода (DS).

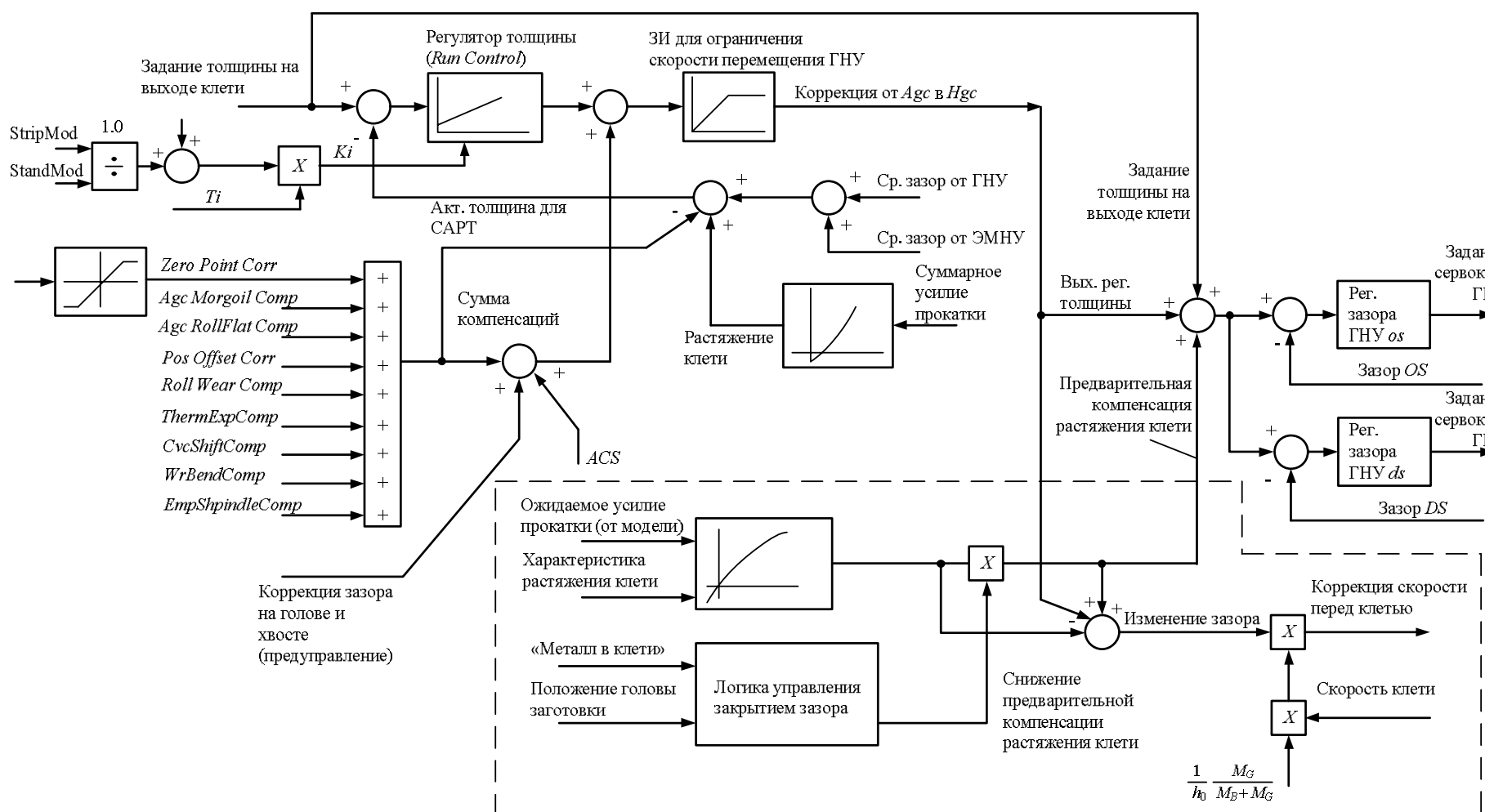


Рис. 4. Структурная схема расчета сигнала задания толщины в САПТ стана 5000

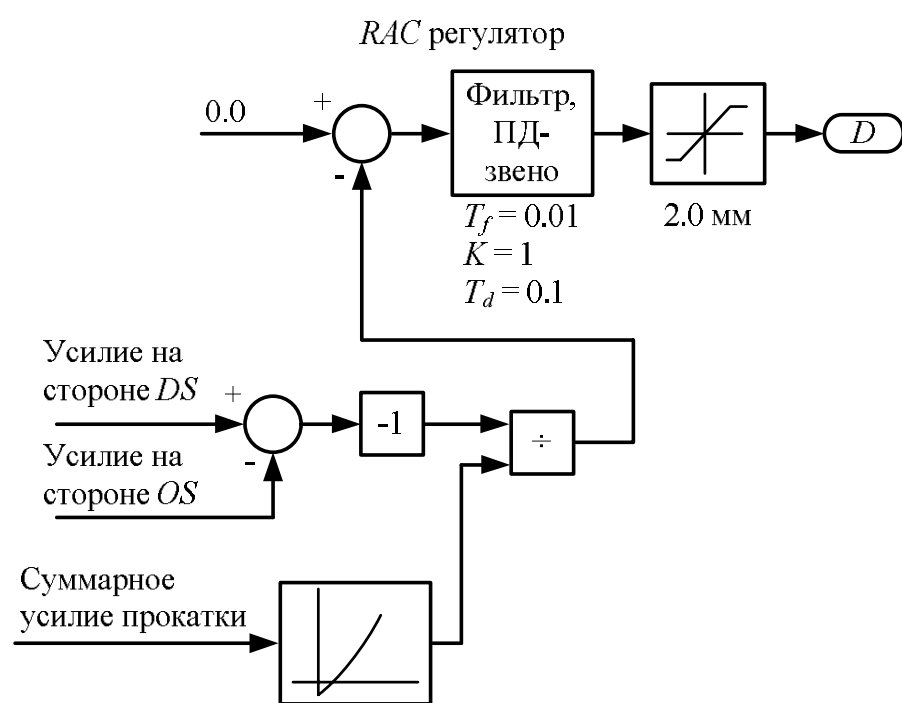


Рис. 5. Структурная схема RAC-регулятора:  
 $T_f$  – постоянная фильтра;  $T_d$  – постоянная регулятора;  
 $K$  – коэффициент усиления

По фактическим усилиям в гидроцилиндрах на входе регулятора формируется задание на разницу толщины по краям заготовки (зазоров со стороны OS и DS). Эта величина вычисляется путем деления измеренного давления на валки (усилия) на модуль упругости полосы (Level Modulus). Кривая зависимости модуля упругости от усилия хранится в виде таблицы в файле АСУ ТП. На выходе регулятора D формируется задание, которое подается на регуляторы положения ГНУ и компенсирует разнотолщинность. Ограничение на выходе регулятора устанавливается с целью исключения недопустимых перекосов зазора. При прокатке тонкого раската и значительных перекосах возникает опасность соприкосновения краев верхнего и нижнего валков. Установленное ограничение

находится в диапазоне от 0,7 до 2 мм и зависит от профиля проката.

При настройке системы было обосновано применение пропорционально-дифференциального RAC-регулятора, который, по существу, регулирует отфильтрованную производную входного сигнала [15]. Причиной выбора является то, что регуляторы такого типа обеспечивают формирование управляющего воздействия с учетом как ошибки, так и скорости ее изменения. Введение регулирования по производной увеличивает скорость реакции системы. Это приводит к снижению погрешностей в динамическом режиме, вызванном перемещением нажимных устройств.

Работа RAC-регулятора иллюстрируется осциллограммой (рис. 6). Зафиксированы сигналы, пропорциональные усилиям прокатки по сторонам клетки (окно 1), разность этих сигналов (окно 2), выходной сигнал регулятора (окно 3) и корректирующие сигналы на соответствующие нажимные устройства (окно 4).

В начале прокатки имелся перекося по заданию раствора ГНУ, около 0,2 мм. По ходу прокатки (позже момента времени ~14:29:41) усилия по сторонам (окно 1) начинают расходиться. Появляется разность усилий, вследствие чего сигнал (окно 2) снижается. Выходной сигнал (окно 3) изменяется в области отрицательных значений. Действие регулятора приводит к изменению перекося раствора, в данном случае он уменьшается. Та сторона, которая нагружена больше (здесь OS), т.е. больше растянута от усилия прокатки, под действием регулятора уменьшает свой зазор. Соответственно, на стороне, имеющей меньшее усилие, зазор увеличивается.

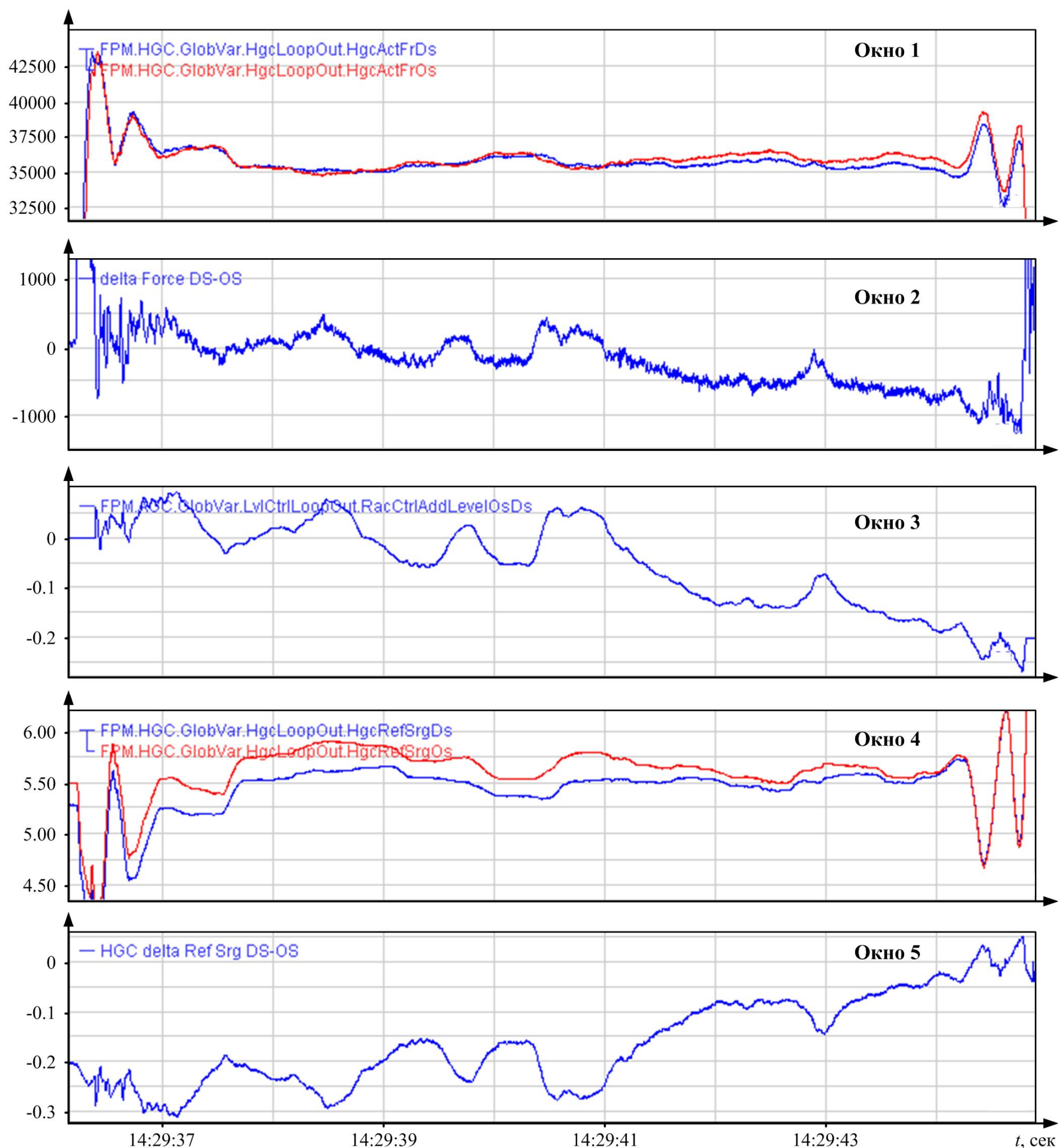


Рис. 6. Осциллограммы, поясняющие работу RAC-регулятора

#### РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

На рис. 7 представлены осциллограммы координат ГНУ и скоростей электроприводов, зафиксированные при прокатке в проходе с профилированием. Они получены при проектной настройке системы (рис. 7, а) и при настройке RAC-регулятора с учетом внесенных изменений (рис. 7, б). Как следует из графиков задания толщины и актуальной толщины (кривые 1, 2 на обоих рисунках), исследуется формирование конического профиля на хвостовом участке проката в режиме разведения валков. Решение исследовать данный режим, а не режим сведения валков, принято исходя из того, что на формирование конического профиля на голов-

ном участке накладывается режим изгиба переднего конца полосы (лыжеобразования). Это оказывает влияние на исследуемые переходные процессы и соответственно искажает анализируемую картину.

Формирование профиля переменной толщины обеспечивается перемещением гидравлических НУ вверх. Позиции НУ со стороны привода (кривые 3) и со стороны оператора (кривые 4) показаны в окне 2. В окне 3 приведено усилие прокатки, которое в установившемся режиме составляет около 25 МН, а к окончанию динамического процесса снижается до нуля. В окне 4 представлены осциллограммы заданных и актуальных скоростей главных электроприводов верхнего (ВГП) и нижнего (НГП) валков.



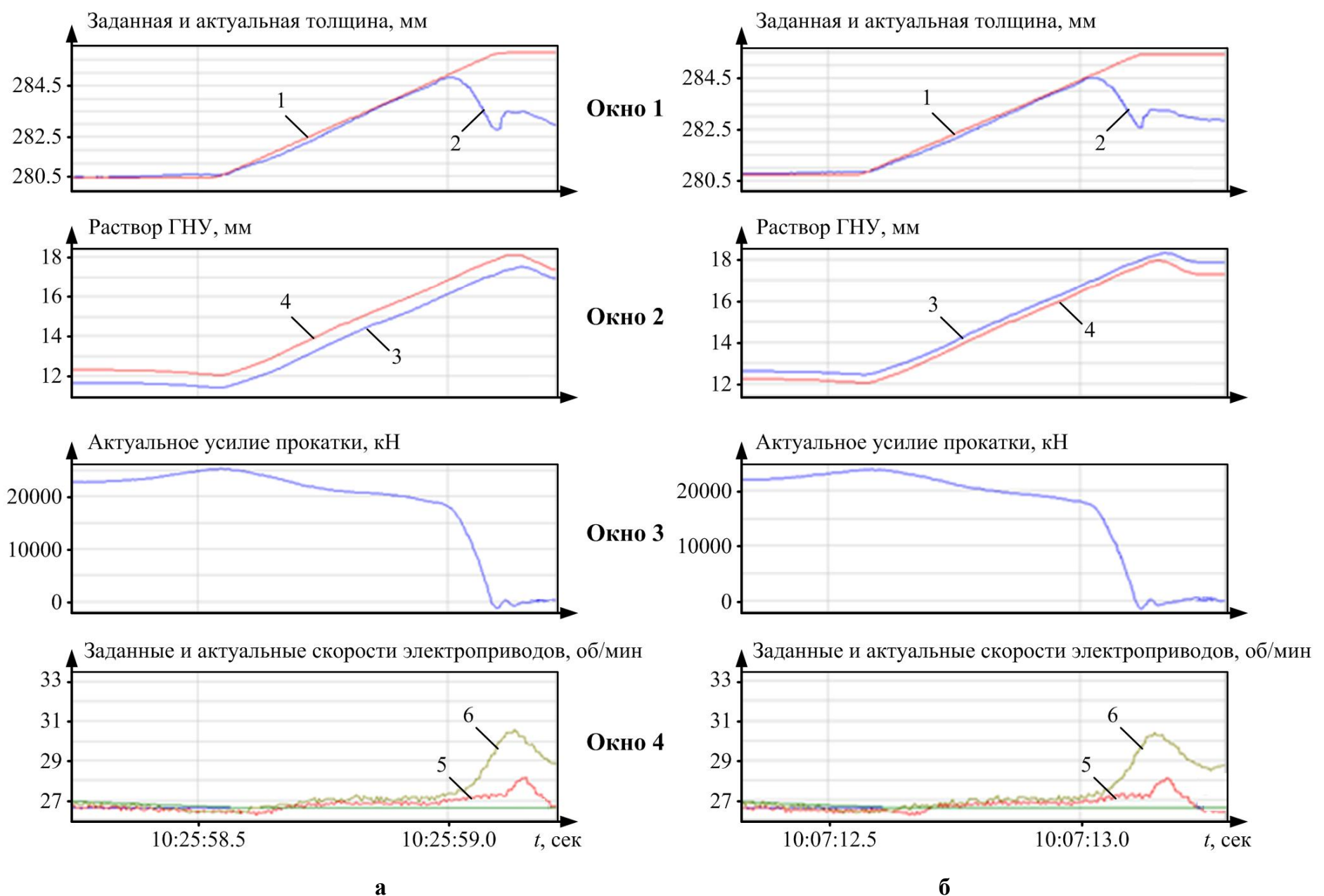


Рис. 7. Осциллограммы координат параметров прокатки в проходе с профилированием

Анализ трендов изменения зазора (окно 2 на рис. 7, а) и скоростей ВГП и НГП (окно 4) позволил выявить следующие недостатки проектной системы:

1. Возникает существенное различие позиций гидравлических НУ, расположенных со стороны привода и со стороны поста оператора. Разница между этими позициями в каждой точке на участке перемещения НУ составляет около 8,3% (1 мм относительно установившегося значения при прокатке, равного 12 мм). На других подобных осциллограммах «перекося» зазора достигает 12,5% или 1,5–2 мм. Это вызвано тем, что согласно проекту принята пропорциональная структура РАС-регулятора. При такой настройке возникает статическая ошибка регулирования положения НУ, что наглядно демонстрируется осциллограммами в установившемся режиме по окончании перемещения НУ. В режиме перемещения НУ дополнительно возникает динамическая ошибка регулирования (на осциллограммах не отслеживается).

2. Работа РАС-регулятора при проектной настройке рассчитана на обеспечение компенсации рассогласований в диапазоне нескольких процентов. При указанном отличии положений НУ более 12% регулятор «не справляется» с заданной функцией.

Преодоление этих недостатков обеспечивается работой РАС-регулятора при внесенных изменениях. Это подтверждают осциллограммы на рис. 6, б. При предложенных настройках (постоянных времени) и компенсации динамической ошибки рассогласование зазоров по сторонам DS и OS снижается примерно в 2 раза.

При этом рассогласование меняет знак: кривая 3 на рис. 7, б располагается выше кривой 4, в то время как на рис. 7, а расположение обратное. Очевидно, что произошла некоторая «перекомпенсация» перекося зазора.

Таким образом, представленный пример демонстрирует обоснованность выбора структуры и настроек РАС-регулятора. Кроме того, экспериментально подтверждена автоматическая коррекция скоростей электроприводов валков во время перемещения нажимных устройств. Однако в связи с тем, что величина обжатия при профилировании составляет менее 2% заданной толщины (на рис. 7 перемещение НУ составляет 5 мм при толщине раската ~285 мм), коррекцию скорости достаточно сложно подтвердить визуально.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанные алгоритмы обеспечивают автоматическое регулирование скорости валков и, соответственно, металла пропорционально перемещению гидравлических нажимных устройств в проходах с профилированием. Результаты экспериментальных исследований, выполненных на стане 5000, подтвердили удовлетворительную точность согласования скоростей металла на входе в клеть и роликов рольганга. Это обеспечивает снижение динамических нагрузок электромеханических систем рольганга.

Более точное согласование скорости перемещения нажимных устройств и линейной скорости металла обеспечивает повышение точности формирования профиля заготовки «собачья кость». Кроме того, за счет увеличения быстродействия РАС-регулятора

обеспечивается повышение точности регулирования межвалкового зазора по сторонам прокатки. За счет этого снижается разнотолщинность по ширине раската.

В целом, результаты исследований подтвердили эффективность внедрения разработанных алгоритмов согласования скоростей электроприводов и гидравлических нажимных устройств при автоматическом контроле профиля раската. Технический эффект заключается в снижении дефекта «серповидность», повышении точности формы раската в плане и, соответственно, улучшении «геометрии» готового листа.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Трайно А.И. Исследование и разработка ресурсосберегающих режимов производства листовой стали: автореф. дис. ... доктора техн. наук. – Москва: Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН. 2009. 51 с.
2. Руденко Е.А., Юрейко А.З. Исследование влияния локальных обжатий на горизонтальном прессе угловых участков торцов слябов на форму слябов в плане // Металлургия и обработка металлов. Донецк, 2007. <http://www.masters.donntu.org/2010/fmf/borzenkov/library/tez5.htm>
3. Ткаченко О.Ф., Руденко Е.А. Расчёт параметров формы раскатов в плане по проходам на стадиях черновой прокатки толстых листов. <http://masters.donntu.org/2016/fmf/tkachenko/library/article1.htm>
4. Шабалов И.П. Исследование формообразования раскатов на толстолистовом стане 2800// Производство проката. №8. 2004. С. 2-8.
5. Khramshin V.R., Khramshina E.A., Karandaev A.S., Gasiyarov V.R., Voronin S.S. Control Methods and Systems Providing Reduced Consumption Index at Rolled Product Manufacture at Plate Mill. Proceedings of the IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EIConRus). 2017. Pp. 1540-1544. DOI: 10.1109/EIConRus.2017.7910865.
6. Fascinating heavy plate //SMS-group – <https://www.sms-group.com/sms-group/downloads/download-detail/17549>.
7. Latest Plate Production Technology of Nippon Steel & Sumitomo Metal Corporation / Yuji Nomiyama, Takeo Yawata, Hirotsugu Yasui // Nippon Steel & Sumitomo metal technical report No.110. September 2015. P. 8-16.
8. Development of new plane view control technique in plate rolling (NCC-DBR) // Nippon Kokan Technical Report. 1983. No.39. P. 21-30.
9. Heavy plates with special process design to meet extreme customer requirements / Oswald W., Streisselberger A., Thul R., Nehrenberg M. -J., Kirsch J. // METEC Congr. 94: 2nd Eur. Continuous Cast. Conf. and 6 th Int. Roll. Conf., Dusseldorf, June 20-22, 1994: Proc. Vol. 2. Dusseldorf, 1994. P. 42-51.
10. New developments in improving shape control, yield and flexibility of heavy plate mills / Agrusti K., De Vito A., Liquori A.G., Paolicchi M. // METEC Congr. 94: 2nd Eur. Continuous Cast. Conf. and 6 th Int. Roll. Conf., Dusseldorf, June 20-22, 1994: Proc. Vol. 2.- Dusseldorf, 1994. P. 86-92.
11. Shubin A.G., Loginov B.M., Khramshin V.R., Evdokimov S.A., Karandaev A.S. System of Automated Control of Hydraulic Screw-down Mechanisms of Plate Mill Stand. Proceedings of 2015 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS). 2015. 6 p. DOI 10.1109/MEACS.2015.7414858.
12. ГОСТ 26877-91. Металлопродукция. Дата введения 01.07.92.
13. Тонкослябовые литейно-прокатные агрегаты для производства стальных полос / В.М. Салганик, И.Г. Гун, А.С. Карандаев, А.А. Радионов. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. 506 с.
14. Бычков, В.П. Электропривод и автоматизация металлургического производства. М.: Высшая школа, 1977. 391 с.
15. Справочник по проектированию электропривода, силовых и осветительных приборов / под ред. Я.М. Большама, В.И. Круповича, М.Л. Самовера М.: Энергия, 1975. 728 с.

Поступила в редакцию 27 сентября 2018 г.

#### INFORMATION IN ENGLISH

### COORDINATION OF VELOCITIES OF ELECTRIC DRIVES AND HYDRAULIC SCREW-DOWN STRUCTURES IN AUTOMATIC CONTROL OF TRANSFER BAR CROSS-SECTION

Vadim R. Gasiyarov

Ph.D. (Engineering), Head of the Department of Mechatronics and Automation, South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia. E-mail: [gasiyarovvr@gmail.com](mailto:gasiyarovvr@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9635-4716>.

The main causes of deviation in the width of a transfer bar at a plate mill are listed in the paper. It was shown that one of the effective ways to improve the sheet shape is to form a double conical profile at the ends of the transfer bar during rolling. The authors introduced the modes of rolling with automatic profile control as an advance technology applied at modern rolling mills. One of the disadvantages noted in the paper is the discrepancy between the speed of the metal leaving the rolls and the linear speed of the rolling table before the roll stand in the process of moving the screw-down structures. Another disadvantage is low accuracy of the skew compensation of the roll gap along the rolling sides, which is determined by the setting of the aligning control of rolling. The authors examined the mechanism and the operating principle of the system of automatic strip thickness control of the convertible stand of the plate mill 5000. A method of control is suggested, which adjusts the speed of rolls in proportion to the displacement of the screw-down structures. The mechanism implementing this method in the structure of the operating system of the automatic strip thickness control is shown

in the paper. The authors justified application of the proportional-differential RAC control and give some recommendations on its setting. Oscillograph records of rolling forces and correction signals on hydraulic screw-down structures are given and the decrease in the skew of the roll gap is confirmed. The research group considered the oscillograph records of screw-down structure coordinates and the velocity of electric drives in the process of forming inverted conic profile at the tail part of the transfer bar for the cases of design and recommended setting of the RAC control device. A conclusion was made about the decrease in the matching error of the gap at the side of the electric drive and at the side of the control pulpit. A number of recommendations on practical implementation of the suggested technical solutions are given.

**Keywords:** plate mill, grooved rolling, convertible stand, system of automatic thickness control, electric drive, adjustment, hydraulic screw-down structures, gap, RAC control device, setting, experimental studies, recommendations.



REFERENCES

1. Trayno A.I. *Issledovanie i razrabotka resursosberegayushchikh rezhimov proizvodstva listovoy stali. Avtoref. Diss. Doktora tekhn. nauk.* [Examination and development of resource-saving modes of sheet steel production. Abstract of D.Sc. Diss.]. Moscow: A.A. Baikov Institute of metallurgy and material science of the RAS. 2009. 51 p.
2. Rudenko E.A., Yureyko A.Z. Influence of local reductions of corner sections of slab ends on a horizontal press on the slab shape. *Metallurgiya i obrabotka metallov* [Metallurgy and metal treatment]. Donetsk, 2007. <http://www.masters.donntu.org/2010/fmf/borzenkov/library/tez5.htm> (In Russian)
3. Tkachenko O.F., Rudenko E.A. *Raschet parametrov formy raskatov v plane po prokhodam na stadiyakh chernovoy prokatki tolstykh listov* [Calculation of transfer bar shape parameters along the passes at the stage of roughing rolling of plates]. <http://masters.donntu.org/2016/fmf/tkachenko/library/article1.htm> (In Russian)
4. Shabalov I.P. Investigation of transfer bar shape forming on the plate mill 2800// *Proizvodstvo prokata* [Rolled stock production]. 2004, no. 8, pp. 2-8. (In Russian)
5. Khramshin V.R., Khramshina E.A., Karandaev A.S., Gasiyarov V.R., Voronin S.S. Control Methods and Systems Providing Reduced Consumption Index at Rolled Product Manufacture at Plate Mill. Proceedings of the IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EIConRus). 2017. P. 1540-1544. DOI: 10.1109/EIConRus.2017.7910865.
6. Fascinating heavy plate //SMS-group – <https://www.sms-group.com/sms-group/downloads/download-detail/17549>.
7. Nomiyama Yuji, Yazawa Takeo, Yasui Hirotugu. Latest Plate Production Technology of Nippon Steel & Sumitomo Metal Corporation. Nippon Steel & Sumitomo metal technical report. No. 110, September 2015, pp. 8-16.
8. Development of new plane view control technique in plate rolling (NCC-DBR). Nippon Kokan Technical Report. 1983, no. 39, pp. 21-30.
9. Oswald W., Streisselberger A., Thul R., Nehrenberg M.-J., Kirsch J. Heavy plates with special process design to meet extreme customer requirements. METEC Congr. 94: 2nd Eur. Continuous Cast. Conf. and 6 th Int. Roll. Conf., Dusseldorf, June 20-22, 1994: Proc. Vol. 2. Dusseldorf, 1994, pp. 42-51.
10. Agrusti K., De Vito A., Liquory A.G., Paolicchi M. New developments in improving shape control, yield and flexibility of heavy plate mills. METEC Congr. 94: 2nd Eur. Continuous Cast. Conf. and 6 th Int. Roll. Conf., Dusseldorf, June 20-22, 1994: Proc. Vol. 2. Dusseldorf, 1994, pp. 86-92.
11. Shubin A.G., Loginov B.M., Khramshin V.R., Evdokimov S.A., Karandaev A.S. System of Automated Control of Hydraulic Screw-down Mechanisms of Plate Mill Stand. Proceedings of 2015 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS). 2015. 6 p. DOI 10.1109/MEACS.2015.7414858.
12. GOST 26877-91. Metal products. Effective as of 01.07.92. (In Russian)
13. Salganik V.M., Gun I.G., Karandaev A.S., Radionov A.A. *Tonkoslyabovye liteino-prokatnye agregaty dlya proizvodstva stalnykh polos* [Thin slab casting-rolling machines for steel strip production]. Moscow: N.E. Bauman MGTU, 2003. 506 p. (In Russian)
14. Bychkov V.P. *Elektroprivod i avtomatizatsiya metallurgicheskogo proizvodstva* [Electric drive and automation of metallurgy]. Moscow: High School, 1977. 391 p. (In Russian)
15. *Spravochnik po proektirovaniyu elektroprivoda, silovykh i osvetitelnykh priborov* [Reference book on design of electric drive, power and illuminating equipment]. Under the editorship of Ya.M. Bolsham, V.I. Krupovich, M.L. Samover.M.: Energy, 1975. 728 p. (In Russian)

Гасияров В.Р. Согласование скоростей электроприводов и гидравлических нажимных устройств при автоматическом контроле профиля раската // *Электротехнические системы и комплексы*. 2018. № 4(41). С. 22-29. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-4\(41\)-22-29](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-4(41)-22-29)

Gasiyarov V.R. Coordination of Velocities of Electric Drives and Hydraulic Screw-down Structures in Automatic Control of Transfer Bar Cross-section. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2018, no. 4(41), pp. 22-29. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-4\(41\)-22-29](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-4(41)-22-29)

Коржов А.В.<sup>1</sup>, Кирпичникова И.М.<sup>1</sup>, Бухтояров В.Ф.<sup>1</sup>, Круглов Г.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Южно-Уральский государственный университет (НИУ)

<sup>2</sup> Южно-Уральский государственный аграрный университет

## ИССЛЕДОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ СИЛОВОГО ТРЁХЖИЛЬНОГО КАБЕЛЯ 6(10) кВ В РАБОЧИХ И АВАРИЙНЫХ РЕЖИМАХ С ПОЗИЦИИ ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТИ

В работе представлены результаты исследований изменения характера нагрузки в кабельных линиях 6(10) кВ, питающих промышленный и коммунально-бытовой сектор. По результатам данных исследований оценено время и участки кабельной сети, где ожидается максимальное значение индукции магнитного поля вблизи кабельных трасс. Для оценки влияния магнитного поля с позиций электромагнитной совместимости и безопасности была разработана методика экспериментального исследования и компьютерная модель трёхжильного кабеля в программе ANSYS EM (Maxwell). Исследование распределения магнитного поля проведено в рабочих и аварийных режимах работы кабеля с учётом установленных графиков нагрузки в рабочих режимах и принятых уставок релейной защиты в режимах коротких замыканий. Оценены допустимые расстояния до трасс кабельных линий в рабочих и аварийных режимах работы по критерию электромагнитной совместимости.

**Ключевые слова:** кабельные линии, график нагрузки, магнитное поле, режимы работы, охрана труда (электроэнергетика).

### ВВЕДЕНИЕ

Рост нагрузок в городской кабельной распределительной сети, увеличение плотности кабельных линий, внедрение микропроцессорных устройств релейной защиты и автоматики приводят к необходимости оценки их электромагнитной совместимости. Несмотря на то, что в настоящее время известны работы по оценке влияния магнитного поля (МП) кабеля по критериям электромагнитной совместимости [1], оптимальной конфигурации прокладки с позиции снижения их магнитного поля [2, 3], работы по снижению уровня магнитного поля за счёт разработки экранов [4–6], остаётся необходимость проведения данной оценки с учётом: характера нагрузки КЛ, вероятных токов короткого замыкания (КЗ) и принятых уставок релейной защиты и автоматики (РЗА) [7].

Целью данных исследований была поставлена оценка распределения магнитного поля на примере трёхжильных силовых кабелей с учётом характера нагрузки в рабочих режимах и выбранных уставок РЗА в режимах коротких замыканий для сопоставления с действующими нормативными документами.

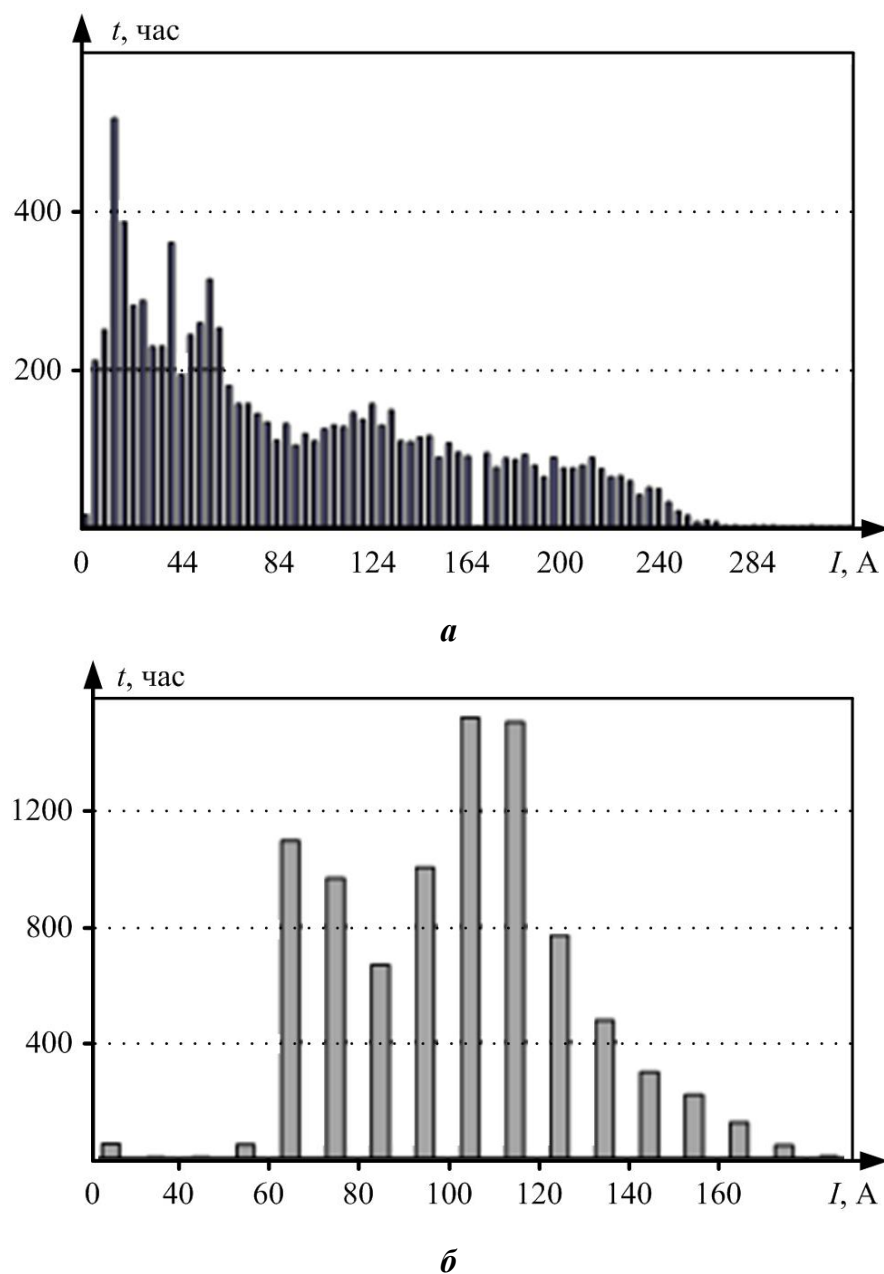
### МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Методика исследования включала три этапа.

**Этап № 1.** На примере кабельных линий, эксплуатируемых в коммунальных сетях г. Нефтекамска, было исследовано колебание нагрузки в течение суток и года на примере фидера 6 кВ, питающего коммунально-бытовую нагрузку города и фидера, питающего промышленные предприятия. Примеры графиков изменения токовой нагрузки в течение года и за характерные сутки приведены на **рис. 1, 2**.

Построение годовых и суточных графиков нагрузки позволяет определить количество часов в году и в течение суток, когда кабельная линия несёт наиболь-

шую нагрузку. В данное время ожидается наибольшая величина МП, что может негативно влиять как на микропроцессорные устройства, так и на человека. В **табл. 1** представлен анализ для двух рассматриваемых фидеров.



**Рис. 1. Годовые графики нагрузок: а – фидер №1, питающий промышленное предприятие; б – фидер №2, питающий коммунально-бытовую нагрузку**



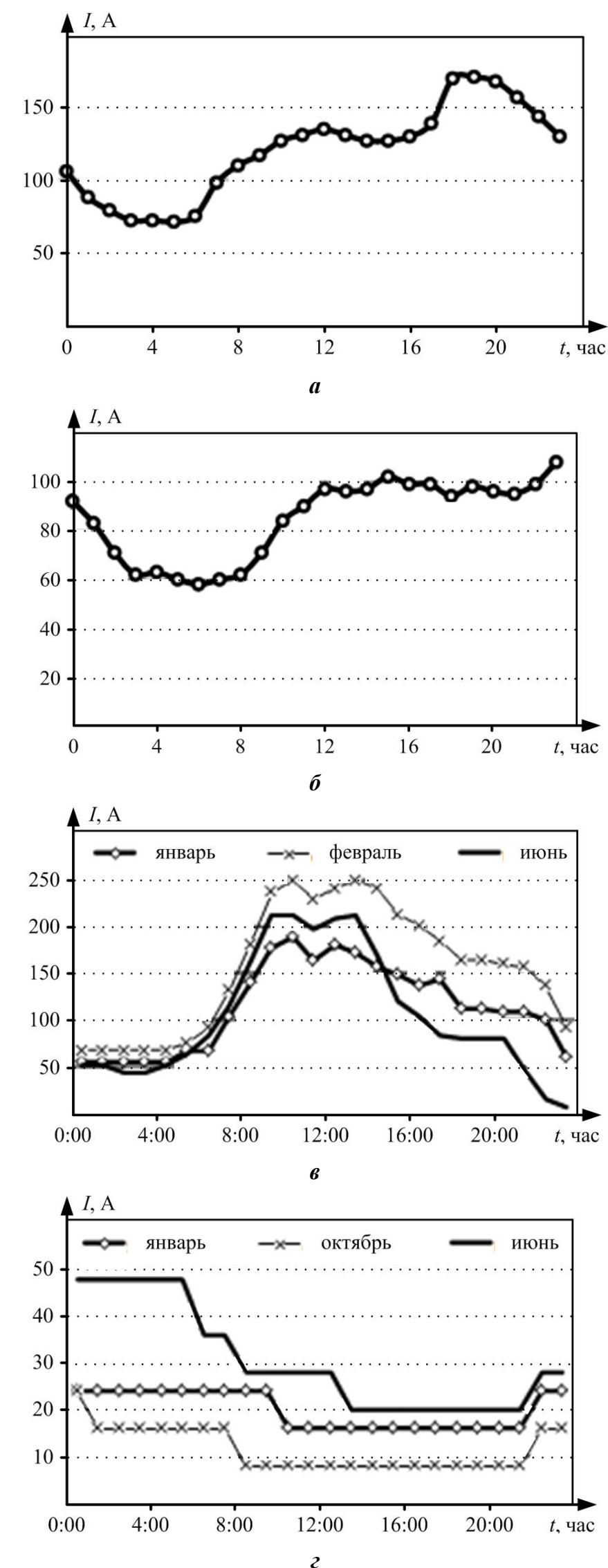


Рис. 2. Суточные графики нагрузок: а – фидер, питающий коммунально-бытовую нагрузку, рабочий день – январь; б – фидер, питающий коммунально-бытовую нагрузку, выходной день – июнь; в – фидер, питающий промышленную нагрузку (двухсменный график работы), рабочие дни; г – фидер, питающий промышленную нагрузку (двухсменный график работы), выходные дни

Длительно допустимый ток принят по сечению головного кабеля согласно [7]: для кабеля ААШВ 6 кВ с сечением жил  $240 \text{ мм}^2$  в 390 А; для кабеля

с сечением жил  $185 \text{ мм}^2$  в 340 А; для кабеля с сечением жил  $150 \text{ мм}^2$  в 300 А.

По результатам анализа коммунально-бытовой нагрузки можно отметить, что для данных кабельных сетей характерны следующие моменты: 1) нагрузка в выходные и рабочие дни одинакова с небольшим ростом зимой; 2) токи КЗ ниже из-за большей длины и применения, как правило, меньшей мощности трансформаторных подстанций (ТП 400, 630 кВА), чем для промышленности; 3) отсутствие высоковольтной двигательной нагрузки; 4) ниже уставки РЗиА по току и времени – для токовой отсечки (ТО) и максимальной токовой защиты (МТЗ); 5) ниже требуемое сечение кабельных линий по условиям термической стойкости и невозгорания  $120\text{--}150 \text{ мм}^2$  [8, 9].

По результатам анализа промышленной нагрузки можно отметить, что для данных кабельных сетей характерны следующие моменты: 1) колебания нагрузки зависят от сменности работы, как правило, выше в первую смену, ниже во вторую из-за останова некоторых технологических линий и прекращения работы административного персонала; 2) токи КЗ выше, так как питающие подстанции расположены вблизи заводов, питающие КЛ короче, применяются, как правило, ТП 630 и 1000 кВА; 3) присутствует большое количество низковольтных и высоковольтных двигателей; 4) уставки ТО и МТЗ выше по току и времени для возможности отстройки от пусковых токов электрических двигателей; 5) в связи с этим выше и сечение по условиям термической стойкости и невозгорания  $185\text{--}240 \text{ мм}^2$  [8, 9].

**Этап № 2.** На втором этапе был проведён анализ ожидаемых токов КЗ и времени существования данных режимов, определяемых уставками РЗиА. На рис. 3 представлен типовой участок схемы городской распределительной сети 6 кВ. Сводные результаты анализа принятых уставок РЗиА на примере коммунальных сетей г. Нефтекамска представлены в табл. 2.

Результаты расчёта уставок РЗиА для других характерных фидеров на примере схемы города Нефтекамска показывают существенный разброс по току и времени срабатывания, что также существенно влияет на условия выбора сечения кабеля по условиям невозгорания. Примеры расчёта уставок по времени МТЗ на вводах 6 кВ и тока трёхфазного КЗ для других трёх фидеров показали следующие результаты: №1 – 3,4 с/13143 А; №2 – 2,9 с/9189 А; №3 – 3,5 с/25968 А. Существенный разброс по току и времени срабатывания РЗиА обусловлен величиной токов КЗ на шинах 6(10) кВ подстанции, длиной питающих и отходящих линий и характером нагрузки.

**Этап № 3.** На третьем этапе было проведено математическое моделирование в программном комплексе ANSYS Maxwell. Были проанализированы рабочие режимы работы кабелей и режимы КЗ. Данный анализ также необходим для оценки ресурсных показателей работы КЛ [10, 11]. Оценка корректности результатов моделирования проводилась путем сопоставления с экспериментальными замерами распределения МП с применением анализатора Narda EFA-300 вблизи действующих и опытных кабельных линий (рис. 4).

Таблица 1

Анализ графиков нагрузок

| Продолжительность нагрузки в течение года и суток | Нагрузка менее 30% от длительно допустимого тока (%) / время существования данной нагрузки (час) | Нагрузка от 30 до 60% от длительно допустимого тока (%) / время существования данной нагрузки (час) | Нагрузка от 60 до 90% от длительно допустимого тока (%) / время существования данной нагрузки (час) | Нагрузка более 90% от длительно допустимого тока (%) / время существования данной нагрузки (час) |
|---------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Фидер №1 (год)                                    | 70/6132                                                                                          | 28,7/2514                                                                                           | 1/87                                                                                                | 0,3/27                                                                                           |
| Фидер №2 (год)                                    | 61/5344                                                                                          | 39/3416                                                                                             | 0                                                                                                   | 0                                                                                                |
| Фидер бытовая нагрузка (январь сутки)             | 29/7                                                                                             | 71/17                                                                                               | 0                                                                                                   | 0                                                                                                |
| Фидер бытовая нагрузка (июнь сутки)               | 92/22                                                                                            | 8/2                                                                                                 | 0                                                                                                   | 0                                                                                                |
| Фидер промышленная нагрузка (рабочий день сутки)  | 33/8                                                                                             | 66/16                                                                                               | 1                                                                                                   | 0                                                                                                |
| Фидер промышленная нагрузка (выходной день сутки) | 100/24                                                                                           | 0                                                                                                   | 0                                                                                                   | 0                                                                                                |

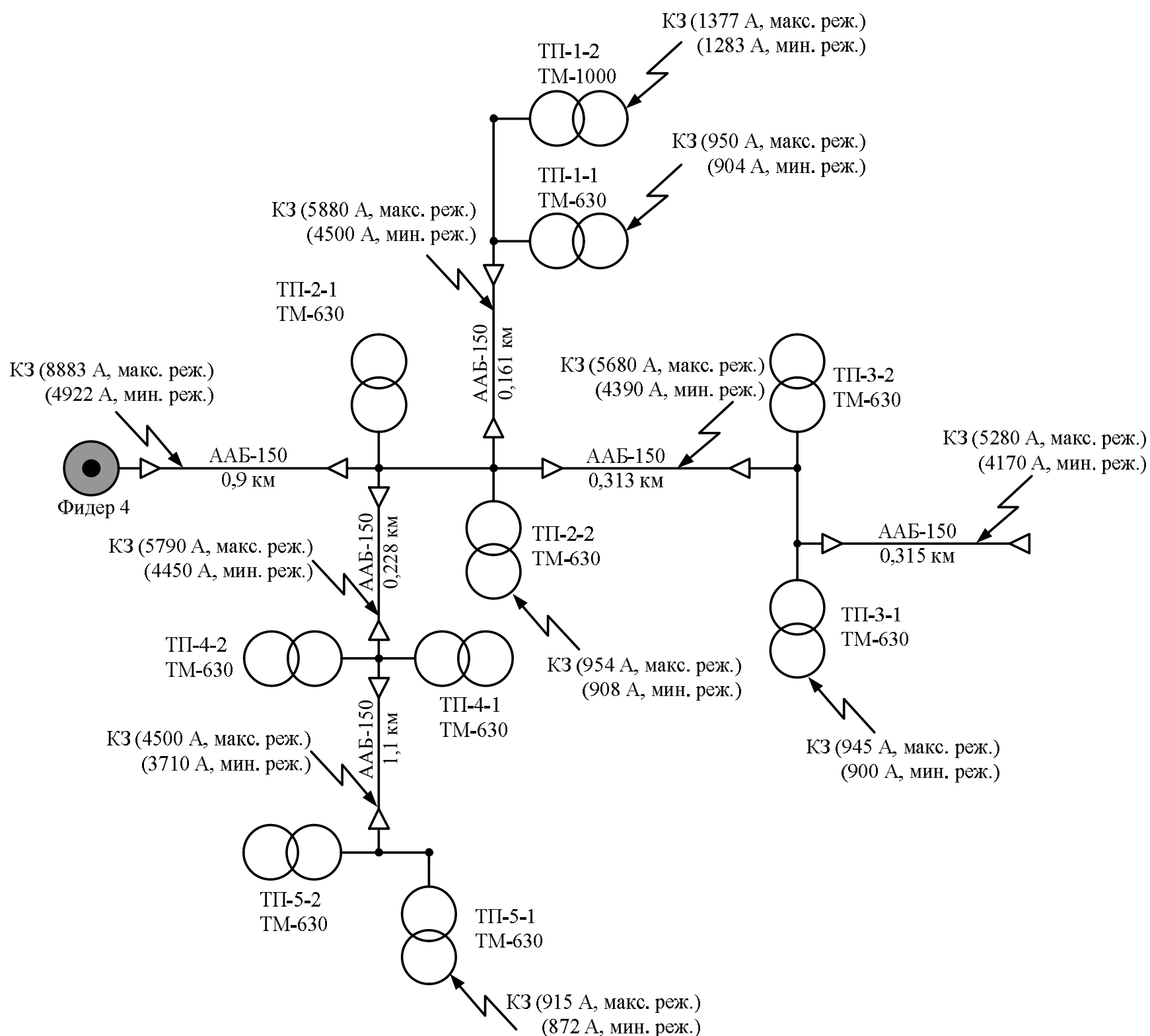


Рис. 3. Участок кабельной сети (на примере г. Нефтекамска)

Таблица 2

Расчётные уставки релейной защиты (согласно схеме на рис. 3)

| Фидер | Уставка по току срабатывания МТЗ, А | Уставка по времени срабатывания МТЗ, с | Уставка по току срабатывания ТО, А | Уставка по времени срабатывания ТО, с |
|-------|-------------------------------------|----------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------|
| №1    | 1500                                | 1                                      | 3400                               | 0                                     |
| №2    | 450                                 | 1                                      | 1620                               | 0                                     |

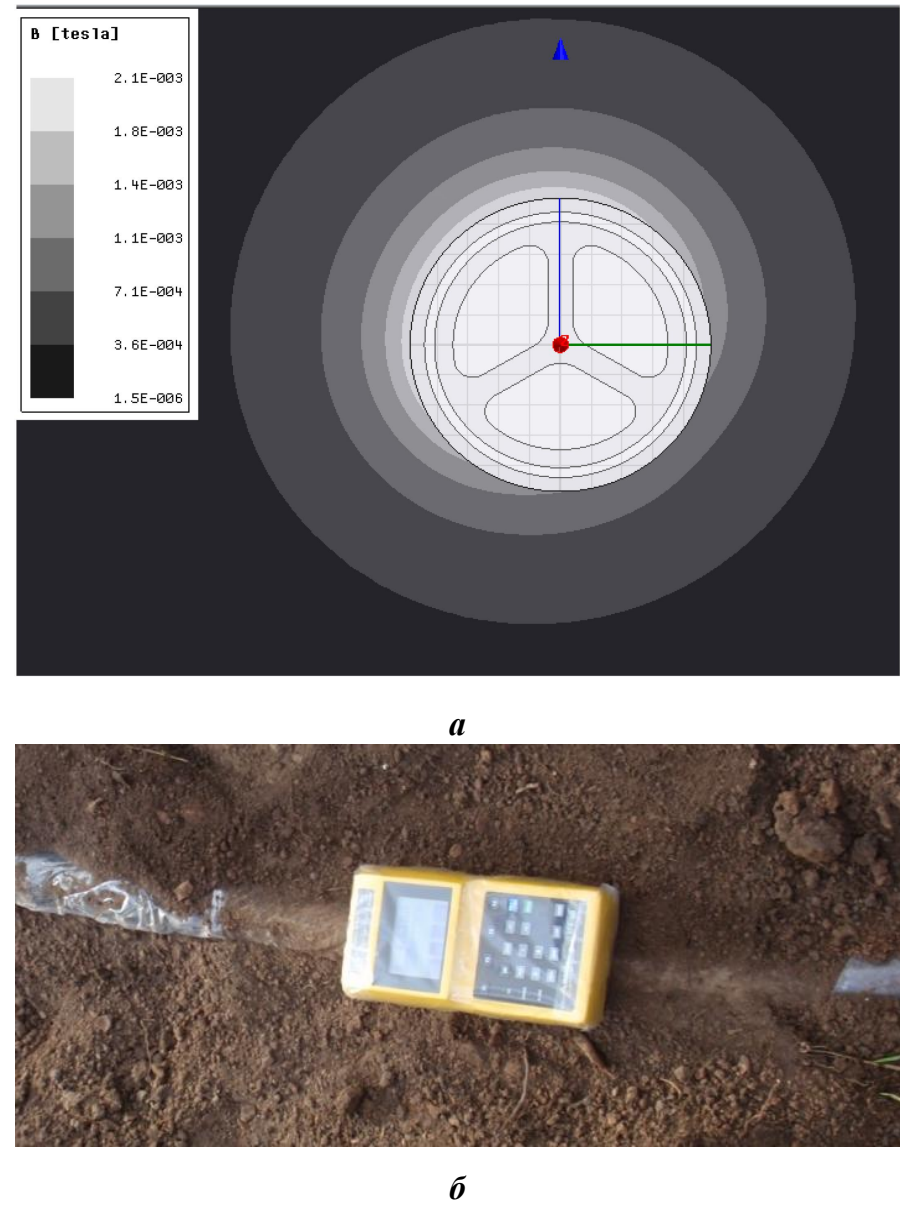


Рис. 4. Исследование распределения МП трёхжильного кабеля: а – картина распределения МП кабеля сечением жил 240 мм<sup>2</sup> в модели (рабочий режим 390 А); б – экспериментальная оценка на КЛ

Сводные результаты расчётного значения индукции магнитного поля представлены в табл. 3. В соответствии с нормативными документами для неэлектро-технического персонала допустимый уровень МП в жилых, общественных помещениях и зонах отдыха установлен в 10 мкТл. Согласно требованиям по ЭМС по ГОСТ Р 50649-94 (МЭК 1000-4-9-93 при испытаниях на устойчивость к импульсному магнитному полю по 3-й степени жёсткости испытаний испытываемое устройство должно выдерживать напряжённость 100 А/м. Согласно ГОСТ Р 50648-94 (МЭК 1000-4-8-93) устойчивость к магнитному полю промышленной частоты по 3-й степени жёсткости испытаний для непрерывного МП составляет 10 А/м.

Оценивая уровни МП в рабочих режимах можно отметить, что превышение ПДУ по МП, согласно действующим нормативным материалам, можно ожидать в течение не более ≈40 % (3500) часов в год и на расстоянии от кабеля менее ≈30 см (табл. 3).

В режиме КЗ превышение ПДУ по МП наблюдается на поверхности грунта с учётом минимальной глубины прокладки кабеля на 0,7 м.

Уровни магнитных полей выше в промышленной зоне, так как на заводах внутри цехов зачастую применяется укладка кабелей 6(10) кВ до внутрицеховых трансформаторных подстанций на лотках по стенам, что негативно сказывается на работающем персонале и электронной аппаратуре, где как раз должны соблюдаться повышенные требования по ЭМС.

Таблица 3

Результаты оценки напряжённости магнитного поля (А/м) и сопоставления с нормативами по электромагнитной совместимости

| Параметры режима                                       |                                     | Расстояние от поверхности кабеля, перпендикулярное к поверхности одной из жил, см |      |     |     |     |     |
|--------------------------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------|-----|-----|-----|-----|
|                                                        |                                     | 0                                                                                 | 10   | 20  | 30  | 40  | 70  |
| Рабочий режим:<br>длительно<br>допустимый ток<br>390 А | Напряжённость магнитного поля (А/м) | 1600                                                                              | 60   | 19  | 9   | 5   | 2   |
|                                                        | Превышение ПДУ для населения        | да                                                                                | да   | да  | нет | нет | нет |
|                                                        | Превышение ПДУ по ГОСТ Р 50648-94   | да                                                                                | да   | да  | нет | нет | нет |
| Режим КЗ:<br>ток 9000 А                                | Напряжённость магнитного поля (А/м) | 37000                                                                             | 1388 | 427 | 205 | 120 | 41  |
|                                                        | Превышение ПДУ для населения        | да                                                                                | да   | да  | да  | да  | да  |
|                                                        | Превышение ПДУ по ГОСТ Р 50649-94   | да                                                                                | да   | да  | да  | да  | нет |



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведена экспериментальная оценка графиков нагрузки кабельных линий, питающих промышленные и коммунально-бытовую нагрузку. Оценено время существования наиболее опасного, с позиций электромагнитной совместимости, режима их работы.

2. Оценено распределение магнитного поля в режимах номинальной нагрузки и режимах коротких замыканий. Показано, что наблюдается превышение ПДУ в режиме номинальной нагрузки для расстояний менее  $\approx 30$  см, а в режиме короткого замыкания данное расстояние может превышать 0,7 м (минимальная глубина прокладки КЛ в грунте).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ippolito, M.G. Attenuation of low frequency magnetic fields produced by HV underground power cables / M.G. Ippolito, A. Puccio, G. Ala, S. Ganci // IEEE Conference Publications in 50th International Universities Power Engineering Conference (UPEC). 2015. P. 1–5. DOI: 10.1109/UPEC.2015.7339774.
2. Hernández Jiménez, V.J. Optimal geometric configurations for mitigation of magnetic fields of underground power lines / V.J. Hernández Jiménez, E.D. Castronuovo // IEEE Conference Publications. 2015 IEEE Eindhoven PowerTech. 2015. P. 1–6. DOI: 10.1109/PTC.2015.7232457.
3. Karady, G.G. The feasibility of magnetic field reduction by phase relationship optimization in cable systems / G.G. Karady, C.V. Nunez, R. Raghavan // IEEE Transactions on Power Delivery. 1998. Vol. 13 (2). P. 647–654. DOI: 10.1109/61.660956.
4. Del-Pino-López, J.C. Magnetic field shielding optimization in underground power cable duct banks / J.C. Del-Pino-López, P. Cruz-Romero, L. Serrano-Iribarnegaray, J. Martínez-Román // Electric Power Syst. Res. 2014. 114. P. 21–27. DOI: 10.1016/j.epsr.2014.04.001.
5. Machado V.M. Magnetic Field Mitigation Shielding of Underground Power Cables / V.M. Machado // IEEE Trans. Magn. 2012. 48 (2). P. 707–710. DOI: 10.1109/TMAG.2011.2174775.
6. Грешняков Г.В. Комплексная оценка технических и эксплуатационных характеристик XLPE – кабельных систем среднего и высокого напряжения: дис. ... доктора техн. наук / Г.В. Грешняков. Санкт-Петербург, 2018. 236 с.
7. Правила устройства электроустановок (ПУЭ). 7-е изд. СПб.: УВЦИЗ, 2005.
8. Коржов А.В., Сидоров А.И., Коржова О.В. Выбор уставок релейной защиты и автоматики в кабельных сетях 6–10 кВ с учётом теплового режима изоляции // Промышленная энергетика. 2009. № 6. С. 2–9.
9. Коржов А.В. Методика выбора уставок релейной защиты и зонное автоматическое повторное включение в кабельной сети 6(10) кВ для ресурсосбережения изоляции и улучшения условий труда / А.В. Коржов // Промышленная энергетика. 2013. № 2. С. 10–16.
10. Korzhov, A.V. The effect of the operating regime of 6(10) kV power cables on parameters of partial discharges in insulation / A.V. Korzhov, A.A. Kozin // Russian Electrical Engineering. 2013. Vol. 84, No. 10. pp. 586–590. DOI: 10.3103/S1068371213100088.
11. Korzhov A.V., Sapozhnikov S.B., Ignatova A.V. Variation of dissipative properties of 6(10) kV cable insulation as a supplementary diagnostic criterion // In Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). IEEE Conference. 2017. DOI: 10.1109/ICIEAM.2017.8076257.

Поступила в редакцию 10 октября 2018 г.

INFORMATION IN ENGLISH

SAFETY-RELATED RESEARCH OF A 6 (10) kV POWER TRIPLE-CORE CABLE MAGNETIC FIELD DISTRIBUTION IN OPERATIONAL AND EMERGENCY MODES

Anton V. Korzhov

D.Sc. (Eng.), Assistant Professor, Electric Grids, Networks and Supply Systems Department, South-Ural State University, Chelyabinsk, Russia. E-mail: korzhovav@susu.ru.

Irina M. Kirpichnikova

D.Sc. (Eng.), Professor, Head of the Electric Grids, Networks and Supply Systems Department, South-Ural State University, Chelyabinsk, Russia. E-mail: kirpichnikovaim@susu.ru.

Vasiliy F. Bukhtoyarov

D.Sc. (Eng.), Professor, Life Safety Department, South-Ural State University, Chelyabinsk, Russia. E-mail: bukhtoyarovvf@susu.ru.

Gennadiy A. Kruglov

D.Sc. (Eng.), Professor, Electricity Supply and Process Automation Department, South Ural State Agrarian University, Chelyabinsk, Russia. E-mail: bgd-susu@mail.ru.

The paper presents the results of studies of changes in the nature of the load in cable lines of 6 (10) kV, feeding the industrial and household sector. Based on the results of these studies, the paper estimates the time and sections of the cable network where the maximum value of the magnetic field induction near the cable routes is expected. To assess the influence of the magnetic field from the standpoint of electromagnetic compatibility and safety, a technique of experimental research and a computer model of a three-core cable in the ANSYS EM (Maxwell) program were developed. The

study of the distribution of the magnetic field was carried out in the operational and emergency modes of cable operation, taking into account the established load schedules in the operating modes and the adopted relay protection settings in the short-circuit modes. The paper also estimates the allowable distances to cable lines in operational and emergency modes according to the electromagnetic compatibility criterion.

**Keywords:** cable lines, load diagram, magnetic field, operating modes, labor protection (electric power industry).



## REFERENCES

1. Ippolito M.G., Puccio A., Ala G., Ganci S. Attenuation of low frequency magnetic fields produced by HV underground power cables. *IEEE Conference Publications in 50th International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, 2015, pp. 1–5. DOI: 10.1109/UPEC.2015.7339774.
2. Hernández Jiménez V.J., Castronuovo E.D. Optimal geometric configurations for mitigation of magnetic fields of underground power lines. *IEEE Conference Publications*, 2015 IEEE Eindhoven PowerTech, 2015, pp. 1–6. DOI: 10.1109/PTC.2015.7232457.
3. Karady G.G., Nunez C.V., Raghavan R. The feasibility of magnetic field reduction by phase relationship optimization in cable systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1998, vol. 13 (2), pp. 647–654. DOI: 10.1109/61.660956.
4. Del-Pino-López J.C., Cruz-Romero P., Serrano-Iribarnegaray L., Martínez-Román J. Magnetic field shielding optimization in underground power cable duct banks. *Electric Power Syst. Res*, 2014, vol. 114, pp. 21–27. DOI: 10.1016/j.epsr.2014.04.001.
5. Machado V.M. Magnetic Field Mitigation Shielding of Underground Power Cables. *IEEE Trans. Magn*, 2012, vol. 48 (2), pp. 707–710. DOI: 10.1109/TMAG.2011.2174775
6. Greshnyakov G.V. *Kompleksnaya otsenka tekhnicheskikh i ekspluatatsionnykh kharakteristik XLPE – kabel'nykh sistem srednego i vysokogo napryazheniya: dis. ... doktora tekhn. nauk* [A Comprehensive Assessment of the Technical and Operational Characteristics of XLPE - Medium and High Voltage Cable Systems: Dis. ... Doctor tech. Sciences]. St. Petersburg, 2018. 236 p.
7. *Pravila ustroystva elektroustanovok (PUE)* [Electrical Installation Rules]. 7th edition, St. Petersburg, UVSIZ Publ., 2005.
8. Korzhov A.V., Sidorov A.I., Korzhova O.V. [Selection of Relay Protection and Automation Settings in Cable Networks of 6-10 kV, Taking into Account the Thermal Isolation Mode]. *Promyshlennaya energetika* [Industrial Energy], 2009, no. 6, pp. 2–9.
9. Korzhov A.V. [The method of selecting the settings of relay protection and zone automatic reclosing in the cable network of 6 (10) kV for resource-saving insulation and improving working conditions]. *Promyshlennaya energetika* [Industrial Energy], 2013, no. 2, pp. 10–16.
10. Korzhov A.V., Kozin A.A. The effect of the operating regime of 6(10)-kV power cables on parameters of partial discharges in insulation. *Russian Electrical Engineering*, 2013, vol. 84, no. 10, pp. 586–590. DOI: 10.3103/S1068371213100088.
11. Korzhov A.V., Sapozhnikov S.B., Ignatova A.V. Variation of dissipative properties of 6(10) kV cable insulation as a supplementary diagnostic criterion. Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), IEEE Conference, 2017. DOI: 10.1109/ICIEAM.2017.8076257.

Коржов А.В., Кирпичникова И.М., Бухтояров В.Ф., Круглов Г.А. Исследования распределения магнитного поля силового трёхжильного кабеля 6(10) кВ в рабочих и аварийных режимах с позиции электробезопасности / О.В. Газизова, А.А. Аллаяров, Ю.Н. Кондрашова, Н.Т. Патшин // Электротехнические системы и комплексы. 2018. № 4(41). С. 30-35. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-4\(41\)-30-35](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-4(41)-30-35)

Korzhov A.V., Kirpichnikova I.M., Bukhtoyarov V.F., Kruglov G.A. Safety-related Research of a 6 (10) kV Power Triple-core Cable Magnetic Field Distribution in Operational and Emergency Modes. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2018, no.4(41), pp. 30-35. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-4\(41\)-30-35](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-4(41)-30-35)

Григорьев Н.П., Давыдов Ю.А., Парфианович А.П., Трофимович П.Н.

Дальневосточный государственный университет путей сообщения

## СНИЖЕНИЕ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В СИСТЕМЕ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Статья посвящена проблеме снижения потерь электрической энергии в системе тягового электроснабжения переменного тока. Стратегические программы развития железных дорог России предусматривают внедрение информационных технологий. Информационные технологии обеспечивают новые подходы к методам оценки работы системы тягового электроснабжения. Для цифровых технологий в системе тягового электроснабжения предложены формулы расчета потерь мощности и электрической энергии. На основе методов теоретических основ электротехники и теории электроснабжения тяговых нагрузок переменного тока 25 кВ получены новые формулы расчета потерь мощности в трансформаторах. Потери мощности в стали определены с учетом несимметрии напряжения обмоток. Потери в меди силовых трансформаторов тяговых подстанций определяются с учетом несимметрии тока обмоток трансформатора. Несимметрия тока учитывается фазными токами обмоток. Исходными данными для расчета приняты дискретные значения прогнозных мгновенных схем тока тяговой и мощности районных нагрузок. Прогнозные значения мгновенных схем определяются по результатам мониторинга и статистического анализа. Расчет потерь мощности в силовых трансформаторах тяговых подстанций определяется при одном и двух в работе трансформаторах. Расчет потерь электрической энергии предложено определять на основе результатов потерь мощности мгновенных схем. Количество трансформаторов в работе выбирается по минимальным потерям электрической энергии.

**Ключевые слова:** силовой трансформатор, тяговая подстанция, переменный ток, потери мощности, потери электрической энергии.

### ВВЕДЕНИЕ

Энергоемкость перевозочного процесса системы тягового электроснабжения необходимо минимизировать [1]. Решение такой задачи возможно при системном анализе на основе мониторинга технических показателей работы системы тягового электроснабжения [2] и синтезе схем питания тяговых нагрузок с минимальным расходом электроэнергии на тягу поездов [3].

Перспективная система тягового электроснабжения предусматривает широкое применение информационных технологий для повышения эффективности работы. Одной из задач в принятии рациональных решений при выборе схем питания тяговых нагрузок является переход от исходных данных в виде интегральных показателей к анализу мгновенных схем. Таким образом, расчет может быть выполнен с учетом дисперсии исходных данных. Примером получения показателей работы тяговых подстанций переменного тока в виде последовательности дискретных значений мгновенных схем является автоматизированная система мониторинга тяговых подстанций [4]. Следовательно, разработка алгоритмов и формул для расчета технико-экономических показателей по прогнозным мгновенным схемам работы является актуальной задачей.

Снижение потерь электрической энергии предложено выполнять выбором нормальных схем питания тяговых нагрузок, которые предусматривают определение числа в работе силовых трансформаторов [5] по минимальным потерям электрической энергии.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБСУЖДЕНИЯ

Применяемые формулы для расчета потерь электрической энергии в силовых трансформаторах тяговых подстанций (далее тяговых трансформаторах) не

обеспечивают учет несимметричных тяговых нагрузок и напряжения обмоток. Потери мощности мгновенной схемы при  $n$  однотипных тяговых трансформаторах  $\Delta P_n$  при номинальной мощности тягового трансформатора  $S_{ном}$ , кВА, и мощности нагрузки трансформатора  $S_H$ , кВА, принято определять по формуле [1]

$$\Delta P_n = n \Delta P_{xx} + \frac{\Delta P_k}{n S_{ном}^2} S_H^2, \quad (1)$$

где  $\Delta P_{xx}$  – потери холостого хода силового трансформатора, кВт;  $\Delta P_k$  – потери короткого замыкания, кВт.

При заводских испытаниях  $\Delta P_{xx}$  определяют при следующих условиях [7]. Опыт холостого хода выполняется при испытательном симметричном напряжении с допустимым отклонением. Как известно, мощность потерь холостого хода состоит из потерь в стали и изоляции [8].

Действительное напряжение обмоток тяговых трансформаторов в системах тягового электроснабжения, как правило, не соответствует напряжениям испытания силовых трансформаторов. Следовательно, действительные потери мощности в магнитопроводе, стальных элементах трансформатора, диэлектрические потери в изоляции при отсутствии нагрузок тяговых и районных обмоток далее (потери в стали) будут отличаться от  $\Delta P_{xx}$ , определенных при заводских испытаниях.

Потери электроэнергии в кВт·ч в стали силового трансформатора предложено [9] определять по формуле

$$\Delta W_x = \Delta P_{xx} \sum_{i=1}^m T_{pi} \left( \frac{U_i}{U_{ном}} \right)^2, \quad (2)$$

где  $T_{pi}$  – время работы трансформатора при  $i$ -м действительном напряжении, ч;  $m$  – число значений действительного напряжения;  $U_i$  – напряжение обмотки при  $i$ -м значении напряжения, кВ;  $U_{ном}$  – номинальное напряжение обмотки трансформатора, кВ.

Действительные потери мощности в стали  $\Delta P_{ст}$  при симметричном напряжении обмоток и не соответствующем номинальному напряжению определим по формуле

$$\Delta P_{ст} = \Delta P_{xx} \left( \frac{U}{U_{ном}} \right)^2, \quad (3)$$

где  $\Delta P_{xx}$  – потери холостого хода, кВт.

Потери мощности в стали при симметричной системе векторов напряжения обмоток высшего напряжения можно определить по следующей формуле:

$$\Delta P_{ст} = \Delta P_{xx} K_U, \quad (4)$$

где  $\Delta P_{xx}$  – номинальные потери холостого хода, кВт;  $K_U$  – коэффициент, учитывающий несоответствие действительного и номинального напряжения обмоток высшего напряжения.

Для тяговых подстанций переменного тока характерны несимметричные напряжения обмоток высшего, тягового и районного напряжения. Следовательно, определение действительных потерь мощности в стали по формуле (3), полученной из формулы (2), не дает точного результата.

В системе тягового электроснабжения переменного тока обмотки тяговых трансформаторов высшего напряжения соединены по схеме «звезда», а обмотки для питания тяговых нагрузок – по схеме треугольника. При такой схеме соединения сумма напряжений обмоток всегда будет равна нулю (следовательно, будет равно нулю напряжение нулевой последовательности) [10].

Для расчета потерь в стали при симметричных составляющих несимметричную систему векторов напряжения обмоток высшего напряжения получим в виде симметричных систем напряжений прямой и обратной последовательности.

Вектор напряжения фазы  $A$  прямой  $\dot{U}_{A(I)}$  и обратной  $\dot{U}_{A(II)}$  последовательности определим по формулам:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{A(I)} &= \frac{1}{3}(\dot{U}_A + a\dot{U}_B + a^2\dot{U}_C), \\ \dot{U}_{A(II)} &= \frac{1}{3}(\dot{U}_A + a^2\dot{U}_B + a\dot{U}_C), \end{aligned} \quad (5)$$

где  $a = e^{j120^\circ}$ ,  $a^2 = e^{j240^\circ}$  – оператор поворота.

Действительные потери мощности в стали  $\Delta P_{ст}$  при несимметричной системе напряжения получим в виде суммы потерь от напряжения прямой  $U_{(I)}$  и обратной  $U_{(II)}$  последовательности:

$$\Delta P_{ст} = \Delta P_{ст(I)} + \Delta P_{ст(II)}, \quad (6)$$

где  $\Delta P_{ст(I)} = \Delta P_{xx} (U_{(I)} / U_{ном})^2$  – потери мощности от напряжения прямой последовательности;  $\Delta P_{ст(II)} = \Delta P_{xx} (U_{(II)} / U_{ном})^2$  – потери мощности от напряжения обратной последовательности.

Обозначив  $(U_{(I)} / U_{ном})^2$  равным  $K_1$  и  $(U_{(II)} / U_{ном})^2$  равным  $K_2$ , получим формулу для расчета действительных потерь мощности в стали для несимметричного напряжения обмоток тягового трансформатора:

$$\Delta P_{ст} = \Delta P_{xx} (K_1 + K_2), \quad (7)$$

где  $K_2 = \alpha_U^2$ ;  $\alpha_U$  – коэффициент несимметрии напряжения.

Отношение действительных потерь в стали к потерям холостого хода в процентах получим по формуле

$$\Delta P'_{ст} = (\Delta P_{ст} / \Delta P_{xx}) 100\%. \quad (8)$$

Подставив формулу (7) в формулу (8), получим коэффициент приращения потерь мощности в стали при отклонении действительных векторов напряжения обмоток от номинальных:

$$\Delta P'_{ст} = (K_1 + K_2) 100\%. \quad (9)$$

Определим  $K_1$  для ряда значений отношения напряжения прямой последовательности к номинальному. Полученные результаты приведены в **табл. 1**.

Определим  $K_2$  для ряда значений отношения напряжения обратной последовательности к номинальному напряжению. Полученные результаты приведены в **табл. 2**.

Расчет действительных потерь мощности в стали тяговых трансформаторов подстанций переменного тока при выборе числа трансформаторов в работе предложено определять по паспортным данным  $\Delta P_{xx}$  для конкретных трансформаторов с учетом действительного напряжения обмоток тяговых трансформаторов для мгновенных схем.

Потери мощности в меди тяговых трансформаторов определим на активных сопротивлениях обмоток высшего, тягового и районного напряжения для каждой фазы по токам плеч питания тяговых нагрузок и мощности районных нагрузок (**рис. 1**).

Нагрузочные потери мощности в обмотках высшего напряжения  $\Delta P_B$  определим по формуле

$$\Delta P_B = (I_{AX}^2 + I_{BY}^2 + I_{CZ}^2) R_B \cdot 10^{-3}, \quad (10)$$

где  $I_{AX}$ ,  $I_{BY}$ ,  $I_{CZ}$  – модуль токов обмоток высшего напряжения  $AX$ ,  $BY$  и  $CZ$  соответственно, А;  $R_B$  – активное сопротивление обмоток высшего напряжения, Ом.

Модуль токов обмоток  $AX$ ,  $BY$  и  $CZ$  высшего напряжения трансформатора определим по формулам:

$$\begin{aligned} I_{AX} &= |\dot{I}_{ax} + \underline{D}_{AX} \dot{I}_p|, \\ I_{BY} &= |\dot{I}_{by} + \underline{D}_{BY} \dot{I}_p|, \\ I_{CZ} &= |\dot{I}_{cz} + \underline{D}_{CZ} \dot{I}_p|, \end{aligned} \quad (11)$$

где  $\dot{I}_{ax}$ ,  $\dot{I}_{by}$ ,  $\dot{I}_{cz}$  – токи тяговых обмоток;  $\underline{D}_{AX}$ ,  $\underline{D}_{BY}$ ,  $\underline{D}_{CZ}$  – операторы поворота токов обмоток  $a_p x_p$ ,  $b_p y_p$  и  $c_p z_p$  районных нагрузок соответственно;  $\dot{I}_p$  – ток районной нагрузки.

**Таблица 1**  
Коэффициент приращения потерь холостого хода от напряжения прямой последовательности

| $\frac{U_{(I)}}{U_{ном}}$ | 0,85 | 0,90 | 0,95 | 1,00 | 1,05 | 1,10 | 1,15 |
|---------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| $K_1, \%$                 | 72   | 81   | 90   | 100  | 110  | 121  | 132  |

Таблица 2

Коэффициент приращения потерь холостого хода от напряжения обратной последовательности

| $\alpha_U$ | 0,04 | 0,08 | 0,12 | 0,16 | 0,2  | 0,24 |
|------------|------|------|------|------|------|------|
| $K_2, \%$  | 0,16 | 0,64 | 1,44 | 2,56 | 4,00 | 5,76 |

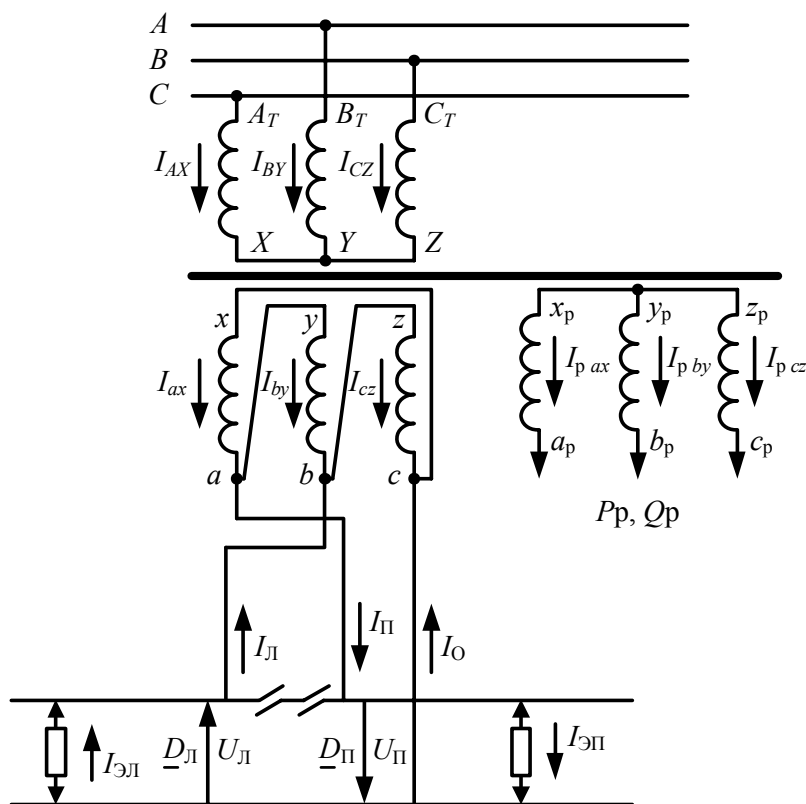


Рис. 1. Схема присоединения тягового трансформатора к ЛЭП и тяговой сети,

$I_{ЭЛ}, I_{ЭП}$  – токи поездов соответственно левого и правого плеча;  $D_L, D_P$  – операторы поворота напряжения левого и правого плеча питания в фазных координатах;  $U_L$  – напряжение левого плеча;  $U_P$  – напряжение правого плеча;  $I_L$  – ток левого плеча;  $I_P$  – ток правого плеча;  $I_O$  – ток фидера обратного тока

Токи тяговых обмоток  $ax, by$  и  $cz$  определим по токам плеч и операторам поворота напряжения плеч питания:

$$\begin{aligned} i_{ax} &= \frac{2}{3} D_P i_P - \frac{1}{3} D_L i_L, \\ i_{by} &= -\frac{1}{3} D_P i_P - \frac{1}{3} D_L i_L, \\ i_{cz} &= -\frac{1}{3} D_P i_P + \frac{2}{3} D_L i_L. \end{aligned} \quad (12)$$

Ток районной нагрузки определим по формуле

$$i_p = \frac{\sqrt{P_p^2 + Q_p^2}}{\sqrt{3} U_p} e^{j \left( \arctg \frac{Q_p}{P_p} \right)}. \quad (13)$$

Потери мощности в обмотках тягового напряжения  $\Delta P_T$  определим по формуле

$$\Delta P_T = (I_{ax}^2 + I_{by}^2 + I_{cz}^2) R_T \cdot 10^{-3}, \quad (14)$$

где  $I_{ax}, I_{by}, I_{cz}$  – модуль токов тяговых обмоток трансформатора, А;  $R_T$  – активное сопротивление тяговых обмоток, Ом.

Потери мощности в обмотках районного напряжения  $\Delta P_p$  определим по формуле

$$\Delta P_p = \frac{P_p^2 + Q_p^2}{U_p^2} R_p \cdot 10^{-3}, \quad (15)$$

где  $P_p, Q_p$  – активная и реактивная мощности районных нагрузок, кВт и квар соответственно;  $U_p$  – линейное напряжение районных нагрузок, кВ;  $R_p$  – активное сопротивление обмоток районной нагрузки, Ом.

Для мгновенной схемы  $i$  при одном включенном в работу трансформаторе потери мощности определим по формуле

$$\begin{aligned} \Delta P_{1i} &= \Delta P_{xx} (K_{1i} + K_{2i}) + \\ &+ \left[ (I_{AXi}^2 + I_{BYi}^2 + I_{CZi}^2) R_B + \right. \\ &\left. + (I_{axi}^2 + I_{byi}^2 + I_{czi}^2) R_T + \frac{P_{Pi}^2 + Q_{Pi}^2}{U_{Pi}^2} R_P \right] \cdot 10^{-3}. \end{aligned} \quad (16)$$

Для мгновенной схемы  $i$  при двух включенных в работу силовых трансформаторах потери мощности определим по формуле

$$\begin{aligned} \Delta P_{2i} &= 2 \Delta P_{xx} (K_{1i} + K_{2i}) + \\ &+ \frac{1}{2} \left[ (I_{AXi}^2 + I_{BYi}^2 + I_{CZi}^2) R_B + \right. \\ &\left. + (I_{axi}^2 + I_{byi}^2 + I_{czi}^2) R_T + \frac{P_{Pi}^2 + Q_{Pi}^2}{U_{Pi}^2} R_P \right] \cdot 10^{-3}. \end{aligned} \quad (17)$$

Для интервала времени, содержащего  $m$  прогнозных мгновенных схем при интервале квантования токов плеч питания тяговых и мощности районных нагрузок  $\Delta t$ , определим потери электрической энергии при одном и двух в работе тяговых трансформаторов по формулам

$$\Delta W_1 = \left( \sum_{i=1}^m \Delta P_{1i} \right) \Delta t, \quad (18)$$

$$\Delta W_2 = \left( \sum_{i=1}^m \Delta P_{2i} \right) \Delta t. \quad (19)$$

Выбор одного или двух в работе тяговых трансформаторов на перспективный период времени выполняется по минимальным прогнозным потерям электрической энергии.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Получены формулы расчета потерь мощности в стали силовых трансформаторов тяговых подстанций переменного тока с учетом действительного несимметричного напряжения обмоток.

2. Потери электрической энергии в меди силовых трансформаторов предложено определять по значениям мгновенных схем токов плеч питания тяговых и мощности районных нагрузок.

3. Предложена методика выбора числа силовых трансформаторов в работе на расчетный период по потерям электрической энергии при несимметричных нагрузках и напряжениях.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Энергетическая стратегия холдинга «Российские железные дороги» на период до 2015 года и на перспективу до 2030 года : утв. распоряжением ОАО «РЖД» № 2718 р от 15 декабря 2011 г.



2. Пат. 2478049 Российская Федерация, МПК<sup>6</sup> В60М 3/00. Система электроснабжения электрифицированных железных дорог переменного тока / Н.П. Григорьев, А.А. Крикун; заявитель и патентообладатель ДВГУПС. № 2011129592; заявл. 15.07.2011; опубл. 27.03.2013.
3. Власенко С.А., Григорьев Н.П., Парфианович А.П. Повышение энергоэффективности работы электрифицированных железных дорог переменного тока 25 кВ выбором нормальных схем питания тяговых нагрузок // Электрификация, развитие электроэнергетической инфраструктуры и электрического подвижного состава скоростного и высокоскоростного железнодорожного транспорта: материалы VII междунар. симп. «Элтранс-2015», 7–9 окт. 2015 г., Санкт-Петербург. СПб: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2017. С. 88–92.
4. Автоматизированная система мониторинга тяговых подстанций / В.Н. Ли, Ф.А. Протасов, Е.Ю. Тряпкин, А.В. Гуляев, М.Ю. Кейно // Автоматизация в промышленности. 2013. №11. С. 22–25.
5. Повышение энергоэффективности системы тягового электроснабжения переменного тока 25 кВ / Григорьев Н.П., Клыков М.С., Парфианович А.П., Шестухина В.И. // Электротехника. 2016. № 2. С. 58–60.
6. Идельчик В.И. Электрические системы и сети. М: Энергоатомиздат, 1989. 592 с.
7. ГОСТ 3484.1-88 (СТ СЭВ 1070-78). Трансформаторы силовые. Методы электромагнитных испытаний (с Изменением №1). Дата введения 1990-01-01.
8. Тихомиров П.М. Расчет трансформаторов: учеб. пособие для вузов. 5-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1986. 528 с.
9. Приказ Министерства энергетики РФ от 30 декабря 2008 г. №326 «Об организации в Министерстве энергетики Российской Федерации работы по утверждению нормативов технологических потерь электроэнергии при ее передаче по электрическим сетям».
10. Марквардт К.Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог: учеб. для вузов ж.-д. трансп. Изд. 4-е, перераб. и доп. М.: Транспорт, 1982. 528 с.

Поступила в редакцию 27 сентября 2018 г.

## INFORMATION IN ENGLISH

### REDUCTION OF ELECTRIC ENERGY LOSSES OF TRACTION POWER SUPPLY SYSTEM OF ALTERNATING CURRENT (AC)

Nikolai P. Grigoriev

Ph.D. (Eng.), Professor, the Department of Electric Power Supply, Far East State Transport University, Khabarovsk, Russia. E-mail: 0101gnp@mail.ru.

Iurii A. Davydov

D. Sc. (Eng.), Professor, Rector, Far East State Transport University, Khabarovsk, Russia. E-mail: rector@festu.khv.ru.

Arseniy P. Parfianovich

Postgraduate Student, the Department of Electric Power Supply, Far East State Transport University, Khabarovsk, Russia.

Polina N. Trofimovich

Senior Lecturer, the Department of Electrical Engineering, Electronics and Electromechanics, Far East State Transport University, Khabarovsk, Russia. E-mail: eteem3@festu.khv.ru.

The article is devoted to the problem of reduction of electric energy losses of traction power supply system of alternating current (AC). The Strategic Development Programs of Russian Railways (RZD) provide for introduction of information technology. Information technology requires new approaches to estimation methods of traction power supply system operation. The formulas are offered to calculate power and electric energy losses within the traction power supply system, which make use of digital technology to ensure its proper operation. Proceeding from the methods of theoretical fundamentals of electrical engineering and theory of power supply of 25 kV AC traction loads new calculation formulas to determine power losses of transformers are obtained. Iron power losses are determined taking into account asymmetry of winding voltage. Coil power losses of power transformers of traction substations are determined taking into account asymmetry of current of transformer windings. Current asymmetry is represented by phase currents of windings. As initial data the research group takes discrete values of expected instantaneous current values of traction loads at a certain time interval as well as load values, the capacity of the given district traction power supply system is able to cope with. Expected instantaneous current values of traction loads are determined by the results of monitoring and statistical analysis. Calculation of power losses in power transformers of traction substations is performed both for one and two

transformers in operation respectively. Electric energy losses are to be calculated considering power losses caused by occurrence of instantaneous current values of traction loads. The number of the transformers in operation is to be chosen for the minimum electric energy losses.

**Keywords:** power transformer, traction substation, alternating current, power loss, loss of electrical energy.

#### REFERENCES

1. *Energeticheskaya strategiya kholdinga "Rossiiskie zheleznye dorogi" na period do 2015 g. i na perspektivu do 2030 goda: utv. rasporyazheniem OAO "RZD" № 2718 r ot 15 dekabrya 2011 g.* [Energy Strategy of the holding company "Russian Railways" for the time period of up to 2015 and for successive period of up to 2030: appr. by the order of JSC "RZD"], no. 2718, December 15, 2011. (In Russian)
2. Grigoryev N.P., Krikun A.A. *Sistema elektrosnabzheniya elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog peremennogo toka* [Power supply system of alternating current electrified railways]. Patent RF, no. 2478049, 2011. (In Russian)
3. Vlasenko S.A., Grigoryev N.P., Parfianovich A.P. Increasing power efficiency of 25 kV AC electrified railways by means of normal feed circuits of traction loads. *Elektrifikatsiya, razvitie elektroenergeticheskoi infrastruktury i elektricheskogo podvizhnogo sostava skorostnogo i vysoko-*

- skorostnogo zheleznodorozhnogo transporta. Materialy VII mezhdunar. symp.* [Electrification, development of power engineering infrastructure and electric rolling stock for express and high-speed railway transport. Proceedings of the VIIth International Symposium "Eltrans-2015"]. St. Petersburg: St. Petersburg State Transport University, 2012, pp. 88–92. (In Russian)
4. Li V.N., Protasov F.A., Tryapkin E. Yu., Gulyaev A.V., Keino M. Yu. Automated monitoring system for traction substations. *Avtomatizatsiya v promyshlennosti* [Automation in industry], 2013, no. 11, pp. 22–25. (In Russian)
  5. Grigoryev N.P., Klykov M.C., Parfianovich A.P., Shestukhina V.I. Increasing power efficiency of 25 kV AC traction power supply. *Elektrotehnika* [Electrical engineering], 2016, no.2, pp. 58–60. (In Russian)
  6. Idelchik V.I. *Elektricheskie sistemy i seti* [Electric systems and networks]. Moscow: Energoatomizdat, 1989. 592 p. (In Russian)
  7. GOST 3484.1-88 (ST SEV1070-78). Power transformers. Methods of electromagnetic tests (with Modification 1). Date of introduction 01.01.1900. (In Russian)
  8. Tikhomirov P.M. *Raschet transformatorov* [Calculation of transformers]. Moscow: Energoatomizdat, 1986. 528 p. (In Russian)
  9. *Prikaz Ministerstva RF ot 30 dekabrya 2008 g. N 326 "Ob organizatsii v Ministerstve energetiki Rossiiskoi Federatsii raboty po utverzhdeniyu normativov tekhnologicheskikh poter elektroenergii pri eyo peredache po elektricheskim setyam"* [Order of Energy Ministry of the Russian Federation of December 30, 2008, no. 326 "On setting and approving the standards for technological losses of electric power during its transmission through electric networks"]. (In Russian)
  10. Markvardt K.G. *Elektrosnabzhenie elektrifitsirovannykh zheleznikh dorog* [Power supply of electrified railways]. Moscow: Transport, 1982. 528 p. (In Russian)

Григорьев Н.П., Давыдов Ю.А., Парфианович А.П., Трофимович П.Н. Снижение потерь электрической энергии в системе тягового электроснабжения переменного тока // Электротехнические системы и комплексы. 2018. № 4(41). С. 36-40. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-4\(41\)-36-40](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-4(41)-36-40)

Grigoriev N.P., Davydov Iu.A., Parfianovich A.P., Trofimovich P.N. Reduction of Electric Energy Losses of Traction Power Supply System of Alternating Current (AC). *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2018, no. 4(41), pp. 36-40. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-4\(41\)-36-40](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-4(41)-36-40)

## ИССЛЕДОВАНИЕ БАЗОВЫХ АЛГОРИТМОВ МОДУЛЯЦИИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВУХУРОВНЕВЫМ ИНВЕРТОРОМ

С целью выявления наилучшего алгоритма управления выполнены исследования влияния модуляционных алгоритмов управления на энергетические характеристики двухуровневого автономного инвертора преобразователя частоты. Исследования выполнялись методами математического и имитационного моделирования. Составлялись уравнения математического описания с учетом ряда общепринятых допущений. Составлялась эквивалентная схема двухуровневого автономного инвертора. Производились сравнения алгоритмов широтно-импульсной модуляции с несущими сигналами различной формы и частоты. Применялись три различные формы несущего сигнала: треугольная, пилообразная с задним фронтом и пилообразная с передним фронтом. Исследования проводились на частотах 3000, 6000 и 9000 Гц. Были сделаны выводы об идентичности спектрального состава переднего и заднего фронта пилообразного сигнала, также отмечено, что при треугольной форме сигнала часть гармоник, присутствовавших при пилообразной форме, удаляется, то есть треугольная форма обеспечивает лучший результат работы автономного инвертора. Также при увеличении частоты несущего сигнала было отмечено, что пакеты импульсов появляются на разных номерах гармоник, смещаются, а значения амплитуды и коэффициента искажения уменьшаются, то есть лучшие показатели были получены при максимальной исследуемой частоте. При исследовании напряжения на выходе дросселей при разной частоте несущего сигнала было отмечено, что при большем значении частоты пульсации выходного напряжения уменьшаются. Дроссели не устраняют гармоники, а лишь уменьшают их амплитуду. На основании результатов сделаны выводы, что алгоритм с треугольным несущим сигналом и максимальной частотой обеспечивает лучший гармонический состав выходного напряжения преобразователя частоты.

**Ключевые слова:** электропривод, преобразователь частоты, имитационная модель, автономный инвертор, широтно-импульсная модуляция.

### ВВЕДЕНИЕ

В современных электроприводах для плавного регулирования электромагнитных и механических переменных электропривода применяются преобразователи частоты. Схема типового преобразователя частоты представлена на **рис. 1**. На выходе преобразователя частоты устанавливается 2-уровневый автономный инвертор (АИ). Для управления 2-уровневым АИ используется модуляционная система управления, которая входит в состав системы управления электроприводом, от алгоритмов которой зависят энергетические характеристики преобразователя частоты (ПЧ) и электропривода в целом. Наибольшее распространение получили алгоритмы синусоидальной ШИМ, модификация которых может выполняться изменением формы несущего сигнала. Исследование данной тематики позволяет сформулировать рекомендации по выбору формы и частоты несущего сигнала.

Для управления транзисторами 2-уровневого АИ система ШИМ формирует коммутационные функции, которые являются управляющими сигналами. Для формирования коммутационных функций используется два сигнала:

- управляющий;
- несущий.

От формы и параметров несущего сигнала зависят энергетические характеристики автономного инвертора, а именно:

- форма напряжения;

- спектральный состав напряжения;
- коэффициент искажения.

Используя треугольный и пилообразный сигналы и изменяя их частоту, проводим исследования с использованием MatLab Simulink посредством имитационного и математического моделирования.

### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДВУХУРОВНЕВОГО АВТОНОМНОГО ИНВЕРТОРА

Для имитационного моделирования работы двухуровневого АИ с возможностью исследования характеристик различных алгоритмов управления необходимо решить следующие задачи: принять допущения; составить эквивалентную схему; составить математическое описание АИ; выполнить синтез алгоритма ШИМ; составить структурную схему математического описания и системы управления; реализовать имитационную модель с использованием программы MatLab; провести исследование и анализ энергетических характеристик.

При составлении уравнений математической модели двухуровневого АИ используются общепринятые допущения об идеальности полупроводниковых ключей, а также выполняется переход к эквивалентной схеме. Эквивалентная схема двухуровневого АИ представлена на **рис. 2**. На **рис. 2** приняты следующие обозначения:  $K_1, K_2, K_3, K_4, K_5, K_6$  – идеальные ключи инвертора;  $U_{dc}$  – эквивалентный источник напряжения;  $S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6$  – коммутационные функции ключей;  $U_A, U_B, U_C$  – фазные напряжения;  $U_{AB}, U_{BC}, U_{CA}$  – линейные напряжения;  $Z_{э\text{кв}}$  – эквивалентная нагрузка.

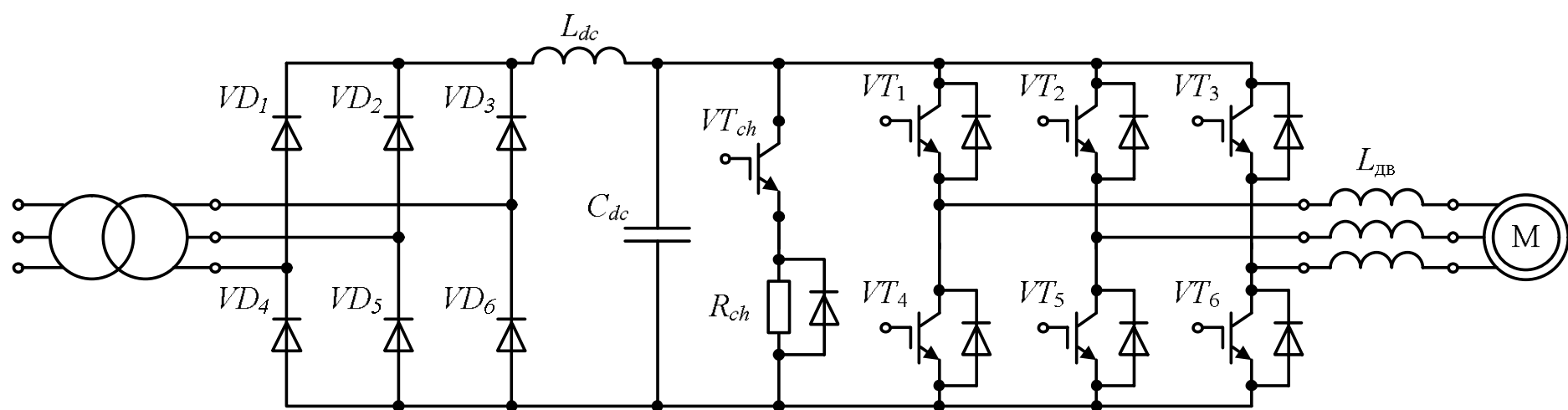


Рис. 1. Схема типового преобразователя частоты

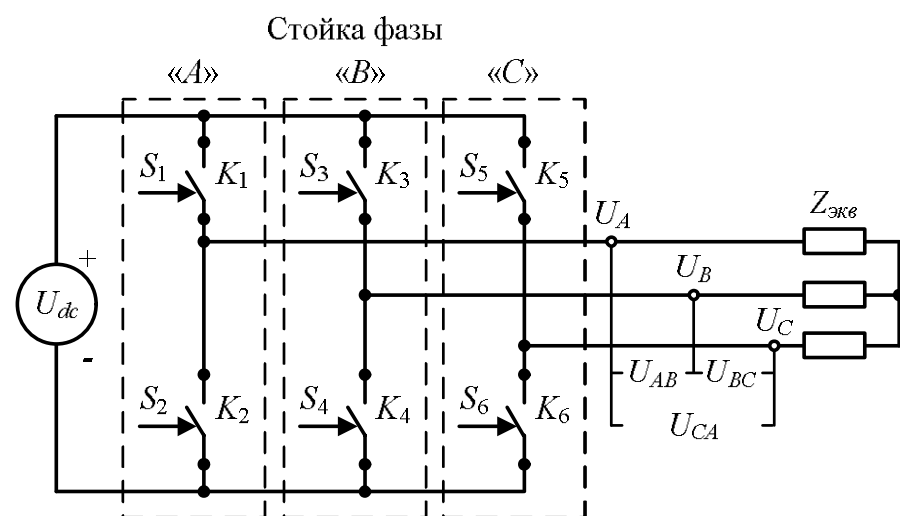


Рис. 2. Эквивалентная схема двухуровневого автономного инвертора

Математическую модель моторных дросселей можно представить в следующем виде:

$$\begin{cases} \frac{dU_{sA}}{dt} = \frac{R_{dr}}{L_{dr}}(U_{iA} - U_{sA}), \\ \frac{dU_{sB}}{dt} = \frac{R_{dr}}{L_{dr}}(U_{iB} - U_{sB}), \\ \frac{dU_{sC}}{dt} = \frac{R_{dr}}{L_{dr}}(U_{iC} - U_{sC}), \end{cases} \quad (1)$$

где  $R_{dr}$  и  $L_{dr}$  – сопротивление и индуктивность обмотки дросселя.

Фазное напряжение на выходе 2-уровневого АИ выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} U_{iA} = U_{dc} \left( +\frac{2}{3}S_A - \frac{1}{3}S_B - \frac{1}{3}S_C \right) \\ U_{iB} = U_{dc} \left( -\frac{1}{3}S_A + \frac{2}{3}S_B - \frac{1}{3}S_C \right), \\ U_{iC} = U_{dc} \left( -\frac{1}{3}S_A - \frac{1}{3}S_B + \frac{2}{3}S_C \right) \end{cases} \quad (2)$$

где  $U_{dc}$  – напряжения на конденсаторах звена постоянного тока (входное напряжение инвертора);  $U_{iA}$ ,  $U_{iB}$ ,  $U_{iC}$  – напряжения выходных фаз (выходное напряжение инвертора).

Уравнения для описания стоек 2-уровневого АИ имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} S_A &= 1, \text{ если } S_1 = 1, S_2 = 0, \\ S_A &= 0, \text{ если } S_1 = 0, S_2 = 1, \\ S_B &= 1, \text{ если } S_3 = 1, S_4 = 0, \\ S_B &= 0, \text{ если } S_3 = 0, S_4 = 1, \\ S_C &= 1, \text{ если } S_5 = 1, S_6 = 0, \\ S_C &= 0, \text{ если } S_5 = 0, S_6 = 1, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6$  – модуляционные функции транзисторов;  $S_A, S_B, S_C$  – модуляционные функции стоек АИ.

Закон управления состоянием стойки транзисторов АИ (закон формирования коммутационной функции) выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} \text{если } U_{sA}^* > U_{set} &\Rightarrow S_A = 1, \\ \text{если } U_{sA}^* < U_{set} &\Rightarrow S_A = 0, \\ \text{если } U_{sB}^* > U_{set} &\Rightarrow S_B = 1, \\ \text{если } U_{sB}^* < U_{set} &\Rightarrow S_B = 0, \\ \text{если } U_{sC}^* > U_{set} &\Rightarrow S_C = 1, \\ \text{если } U_{sC}^* < U_{set} &\Rightarrow S_C = 0. \end{aligned} \quad (4)$$

#### ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ДВУХУРОВНЕВОГО АВТОНОМНОГО ИНВЕРТОРА

Имитационная модель двухуровневого АИ, реализованная в MatLab на основе уравнений (1) – (4), представлена на **рис. 3**. Модель двухуровневого автономного инвертора с возможностью исследования влияния следующих факторов, таких как частота и форма несущего сигнала, различных алгоритмов и анализа характеристик инвертора включает в себя: ШИМ, инвертор, дроссели.

Для управления 2-уровневыми АИ могут использоваться три типа сигналов:

- треугольный (**рис. 4, а**);
- пилообразный с передним фронтом (**рис. 4, б**);
- пилообразный с задним фронтом (**рис. 4, в**).

На **рис. 5** представлены осциллограммы выходного напряжения автономного инвертора и моторных дросселей при частоте несущего сигнала 3000 Гц.



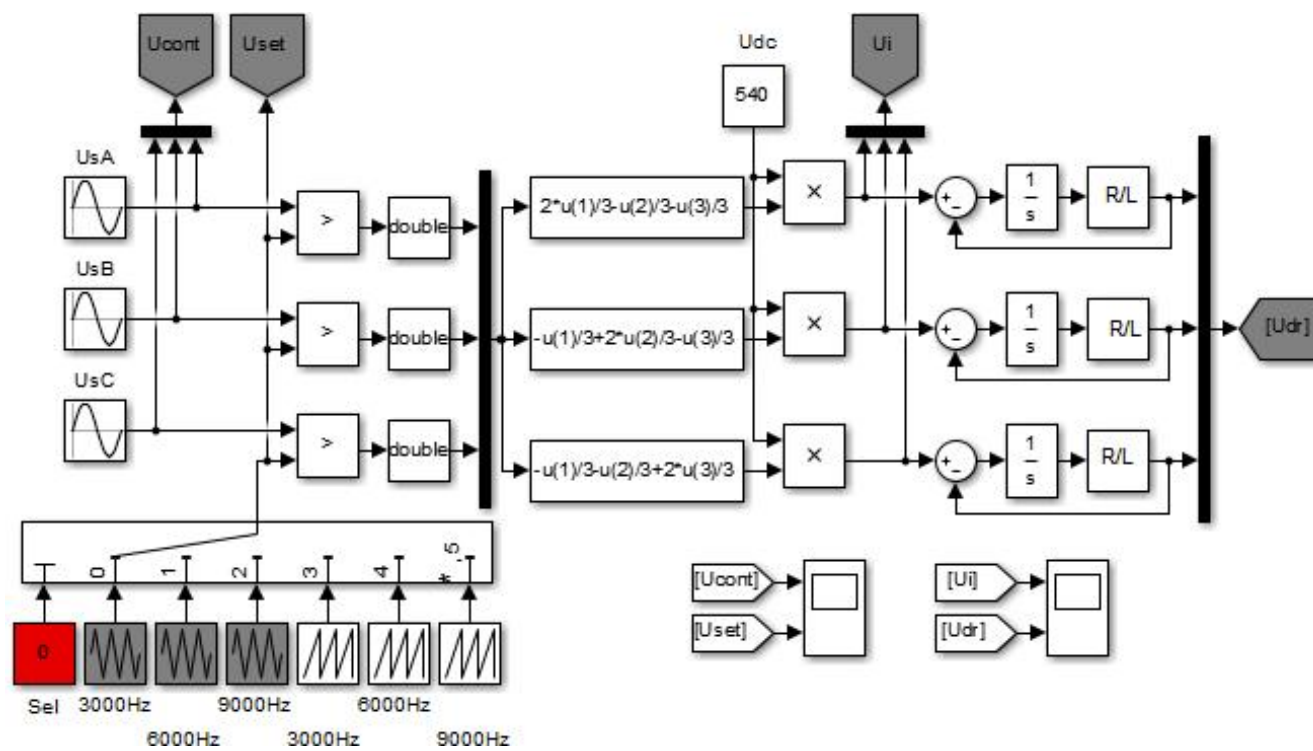


Рис. 3. Структурная схема математической модели двухуровневого АИ

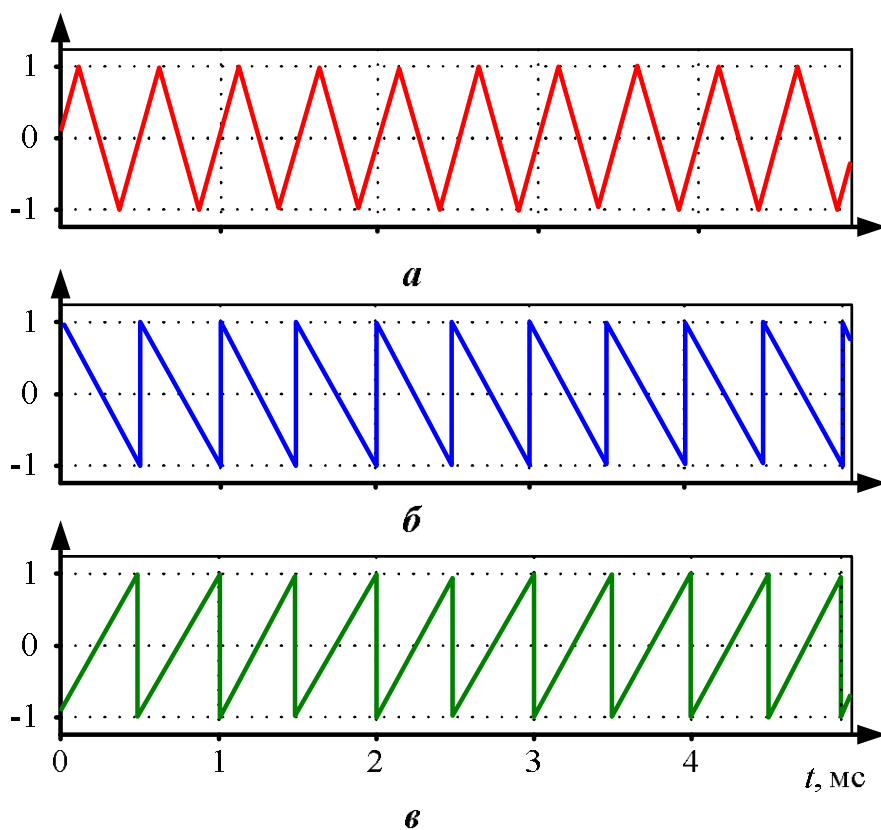


Рис. 4. Формы несущего сигнала

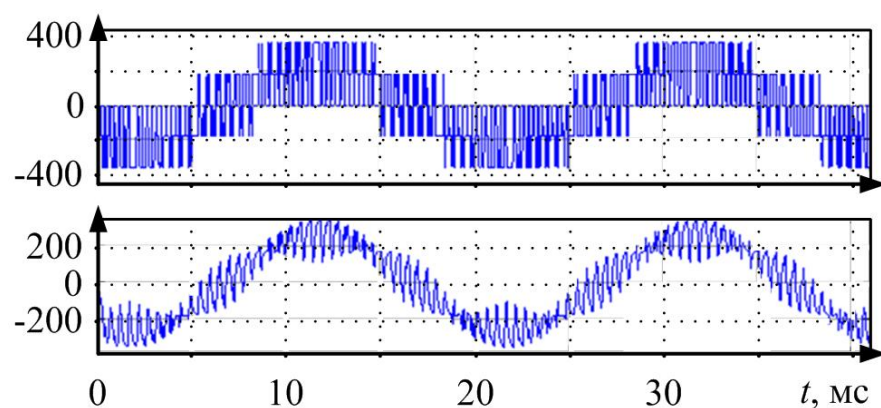


Рис. 5. Осциллограммы напряжений на выходе автономного инвертора и моторных дросселей

#### ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ДВУХУРОВНЕВОГО АВТОНОМНОГО ИНВЕРТОРА ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

При исследовании алгоритмов управления ПЧ рассматриваем влияние:

- формы несущего сигнала на характеристики АИ;
- частоты несущего сигнала на характеристики АИ;
- дросселей на гармонические составляющие напряжения АИ.

При имитационном моделировании выполняется построение осциллограмм напряжения на выходе

автономного инвертора и моторных дросселей, а также исследуется их спектральный состав.

1. Влияние формы несущего сигнала на характеристики преобразователя частоты.

На рис. 6 показан спектральный состав выходного напряжения при различных формах сигнала: треугольной (рис. 6, а), пилообразной с задним фронтом (рис. 6, б) и пилообразной с передним фронтом (рис. 6, в). Исследования проводились на частоте 3000 Гц.

На основании полученных результатов делаем вывод, что спектральный состав переднего фронта совпадает со спектральным составом заднего фронта. При пилообразной форме плотность спектрального состава выше, чем при треугольной.

2. Влияние частоты несущего сигнала на характеристики преобразователя частоты.

Так как в первой части исследования было выявлено, что наилучший гармонический состав выходного напряжения АИ обеспечивается при треугольной форме несущего сигнала, то влияние частоты несущего сигнала будем рассматривать только при этой форме.

На рис. 7 показан спектральный состав выходного напряжения при треугольной форме сигнала на разной частоте.

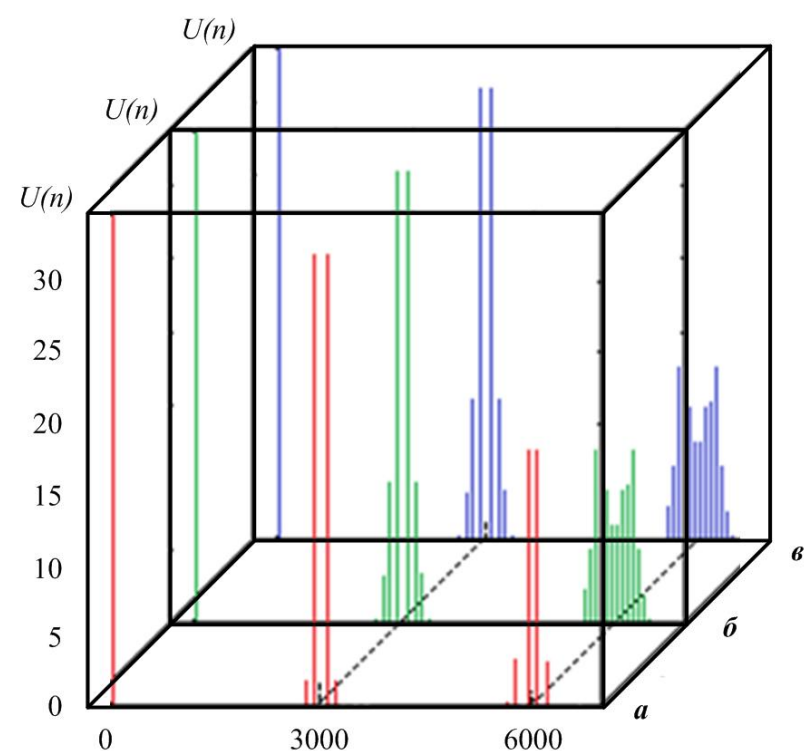


Рис. 6. Влияние формы несущего сигнала на гармонический состав выходного напряжения АИ

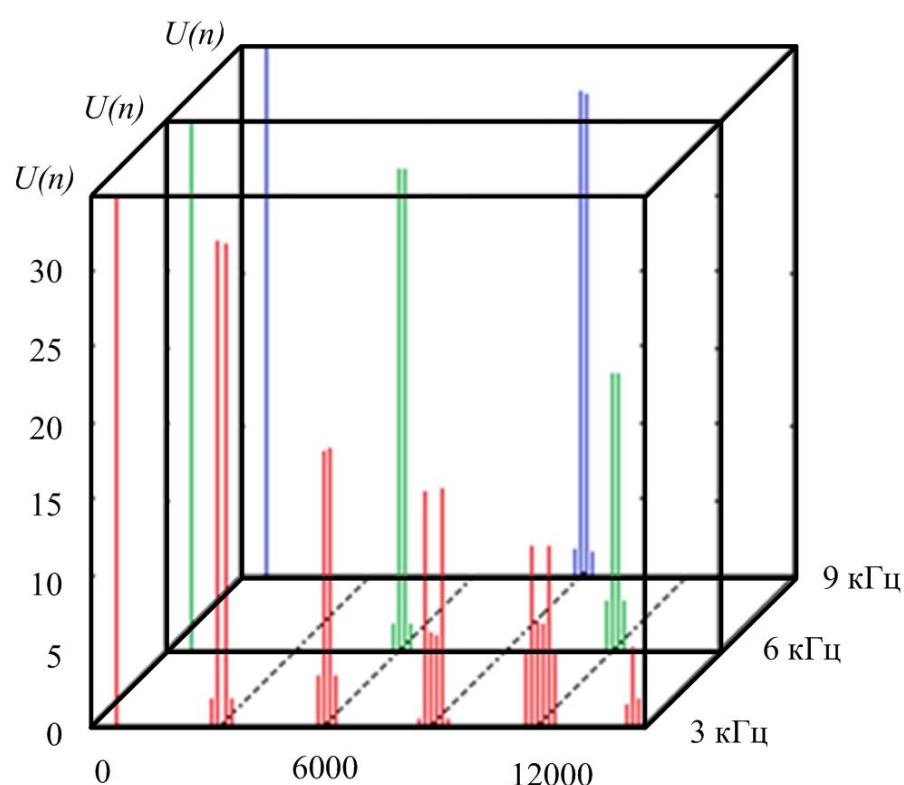


Рис. 7. Влияние частоты несущего сигнала на гармонический состав выходного напряжения АИ

На основании полученных результатов можно сделать вывод о том, что наилучшее регулирование обеспечивается при частоте 9 кГц. Пакеты импульсов формируются на частоте, кратной частоте несущего сигнала и при увеличении частоты смещаются в область высоких частот.

3. Влияние дросселей на гармонические составляющие напряжения.

На рис. 8 представлены осциллограммы напряжения на выходе моторных дросселей при различной частоте несущего сигнала.

На основании полученных результатов можно сделать вывод о том, что наилучшее регулирование обеспечивается при частоте 9 кГц. При увеличении частоты несущего сигнала количество гармонических составляющих остается прежним, уменьшается лишь их амплитуда.

На рис. 9 представлен график зависимости коэффициента нелинейных искажений от отношения сопротивления к индуктивности дросселей.

В табл. 1 приведены значения коэффициента искажения напряжения на выходе автономного инвертора.

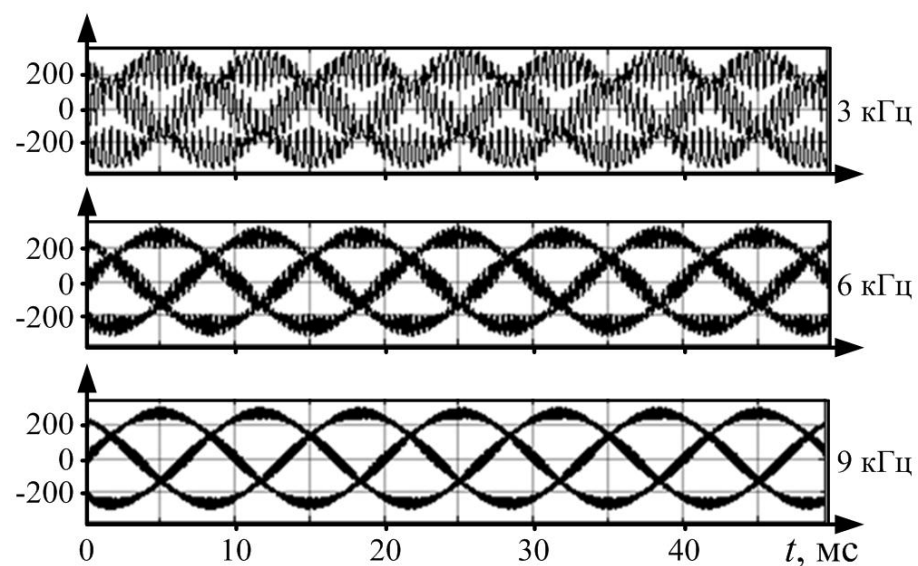


Рис. 8. Напряжение на выходе дросселей в зависимости от различной частоты несущего сигнала

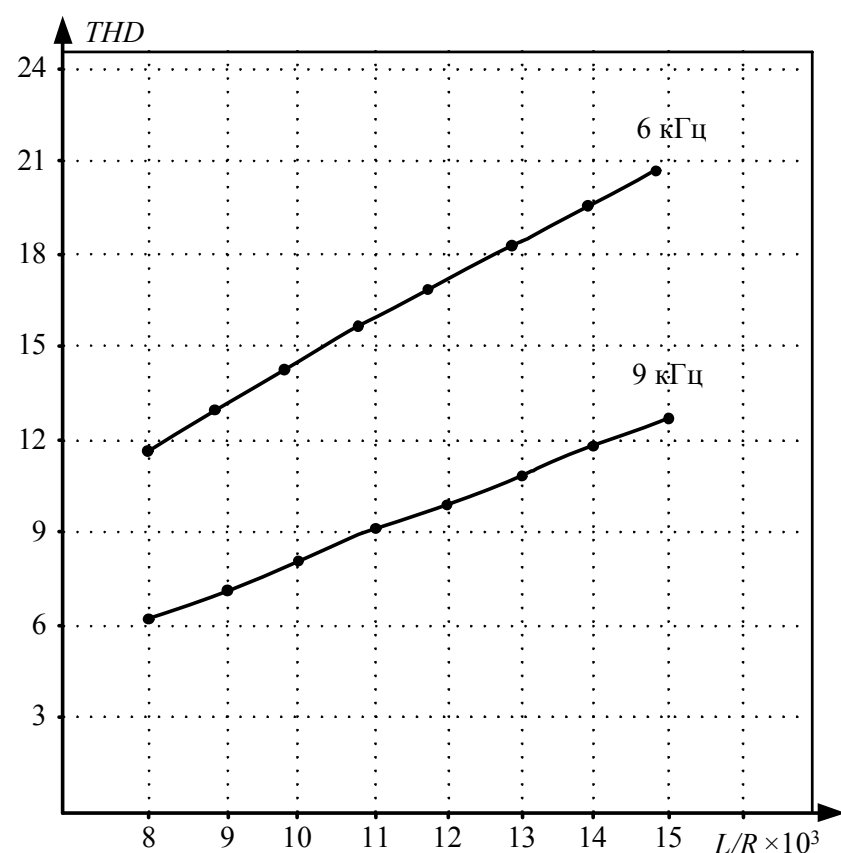


Рис. 9. Зависимость коэффициента нелинейных искажений (THD) от отношения сопротивления к индуктивности (добротности) дросселей

Таблица 1  
Значения коэффициента искажения напряжения на выходе автономного инвертора

| $R/L$              | 8000 | 9000 | 10000 | 11000 | 12000 | 13000 | 14000 | 15000 |
|--------------------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $THD_I$            | 68,9 | 68,9 | 68,9  | 68,9  | 68,9  | 68,9  | 68,9  | 68,9  |
| $THD_{dr}$ (9 кГц) | 6,1  | 6,8  | 7,6   | 8,3   | 9     | 9,8   | 10,5  | 11,2  |
| $THD_{dr}$ (6 кГц) | 11,9 | 13,4 | 14,7  | 16    | 17    | 18,6  | 19,8  | 21    |

В табл. 2–4 приведены значения амплитуд гармонических составляющих выходного напряжения автономного инвертора при разной частоте несущего сигнала: 3, 6 и 9 кГц соответственно.

Из них видно, что при увеличении частоты несущего сигнала гармонические составляющие выходного напряжения автономного инвертора сдвигаются в область высоких частот, при этом пакеты высших гармоник концентрируются около частот, кратных частоте несущего сигнала. Состав пакетов импульсов, находящихся около частоты, кратной несущей, также изменяется при изменении частоты несущего сигнала и становится наиболее благоприятным при ее повышении.

Таблица 2  
Амплитуда гармонических составляющих выходного напряжения автономного инвертора при частоте несущего сигнала 3 кГц

| $f$       | $f_1=3$ кГц |    |    |    | $f_2=6$ кГц |    |    |    | $f_3=9$ кГц |    |    |    |
|-----------|-------------|----|----|----|-------------|----|----|----|-------------|----|----|----|
|           | $n$         | T  | ПФ | 3Ф | $n$         | T  | ПФ | 3Ф | $n$         | T  | ПФ | 3Ф |
| 0         | 60          | —  | —  | —  | 120         | —  | —  | —  | 180         | —  | —  | —  |
| $\pm 50$  | 59/61       | —  | 18 | 18 | 119/121     | 18 | 7  | 7  | 179/181     | —  | 4  | 4  |
| $\pm 100$ | 58/62       | 32 | 31 | 31 | 118/122     | —  | 10 | 10 | 178/182     | 6  | 5  | 5  |
| $\pm 150$ | 57/63       | —  | —  | —  | 117/123     | —  | —  | —  | 177/183     | —  | —  | —  |
| $\pm 200$ | 56/64       | 2  | 10 | 10 | 116/124     | —  | 10 | 10 | 176/184     | 15 | 6  | 6  |
| $\pm 250$ | 55/65       | —  | 3  | 3  | 115/125     | 3  | 12 | 12 | 175/185     | —  | 3  | 3  |
| $\pm 300$ | 54/66       | —  | —  | —  | 114/126     | —  | —  | —  | 174/186     | —  | —  | —  |

Таблица 3

Амплитуда гармонических составляющих выходного напряжения автономного инвертора при частоте несущего сигнала 6 кГц

| $f$       | $f_1=3$ кГц |   |    |    | $f_2=6$ кГц |    |    |    | $f_3=9$ кГц |   |    |    |
|-----------|-------------|---|----|----|-------------|----|----|----|-------------|---|----|----|
|           | $n$         | Т | ПФ | ЗФ | $n$         | Т  | ПФ | ЗФ | $n$         | Т | ПФ | ЗФ |
| 0         | 60          | – | –  | –  | 120         | –  | –  | –  | 180         | – | –  | –  |
| $\pm 50$  | 59/61       | – | –  | –  | 119/121     | –  | 18 | 18 | 179/181     | – | –  | –  |
| $\pm 100$ | 58/62       | – | –  | –  | 118/122     | 32 | 31 | 31 | 178/182     | – | –  | –  |
| $\pm 150$ | 57/63       | – | –  | –  | 117/123     | –  | –  | –  | 177/183     | – | –  | –  |
| $\pm 200$ | 56/64       | – | –  | –  | 116/124     | 2  | 10 | 10 | 176/184     | – | –  | –  |
| $\pm 250$ | 55/65       | – | –  | –  | 115/125     | –  | 3  | 3  | 175/185     | – | –  | –  |
| $\pm 300$ | 54/66       | – | –  | –  | 114/126     | –  | –  | –  | 174/186     | – | –  | –  |

Таблица 4

Амплитуда гармонических составляющих выходного напряжения автономного инвертора при частоте несущего сигнала 9 кГц

| $f$       | $f_1=3$ кГц |   |    |    | $f_2=6$ кГц |   |    |    | $f_3=9$ кГц |    |    |    |
|-----------|-------------|---|----|----|-------------|---|----|----|-------------|----|----|----|
|           | $n$         | Т | ПФ | ЗФ | $n$         | Т | ПФ | ЗФ | $n$         | Т  | ПФ | ЗФ |
| 0         | 60          | – | –  | –  | 120         | – | –  | –  | 180         | –  | –  | –  |
| $\pm 50$  | 59/61       | – | –  | –  | 119/121     | – | –  | –  | 179/181     | –  | 18 | 18 |
| $\pm 100$ | 58/62       | – | –  | –  | 118/122     | – | –  | –  | 178/182     | 32 | 31 | 31 |
| $\pm 150$ | 57/63       | – | –  | –  | 117/123     | – | –  | –  | 177/183     | –  | –  | –  |
| $\pm 200$ | 56/64       | – | –  | –  | 116/124     | – | –  | –  | 176/184     | 2  | 10 | 10 |
| $\pm 250$ | 55/65       | – | –  | –  | 115/125     | – | –  | –  | 175/185     | –  | 3  | 3  |
| $\pm 300$ | 54/66       | – | –  | –  | 114/126     | – | –  | –  | 174/186     | –  | –  | –  |

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При исследовании влияния частоты и формы несущего сигнала на работу двухуровневого автономного инвертора преобразователя частоты можем сделать следующие выводы:

1. Вне зависимости от модификации алгоритма широтно-импульсного управления формирование выходного напряжения осуществляется в соответствии с заданием.

2. Форма несущего сигнала оказывает значительное влияние на гармонический состав выходного напряжения автономного инвертора.

3. Несущий сигнал пилообразной формы вне зависимости от фронта обеспечивает одинаковый гармонический состав выходного напряжения.

4. При использовании широтно-импульсной модуляции треугольного несущего сигнала гармонический состав выходного напряжения более благоприятен, чем при использовании пилообразного сигнала.

5. Частота несущего сигнала определяет частоту коммутации автономного инвертора, что, в свою очередь, определяет положение стационарных пакетов импульсов.

6. Пакеты импульсов напряжения формируются на частоте, кратной частоте несущего сигнала.

7. При увеличении частоты пакеты импульсов смещаются в область высоких частот.

8. Для согласования формы выходного напряжения автономного инвертора и нагрузки целесообразно и эффективно использовать моторные дроссели.

9. Наличие дросселей приводит к уменьшению амплитуды гармонических составляющих выходного напряжения при сохранении числа гармонических составляющих в спектре.

Таким образом, выбор способов модификации алгоритмов широтно-импульсного управления должен осуществляться комплексно. При выборе способов необходимо учитывать:

- форму несущего сигнала;
- частоту несущего сигнала;
- параметры дросселей.

Все эти параметры оказывают значительное влияние на энергетические характеристики преобразователей частоты и их совместимость с нагрузкой.

При практической реализации системы управления от правильности выбора зависят массогабаритные показатели дросселей и электропривода в целом, коэффициент полезного действия автономного инвертора двигателя и ПЧ в целом, требования к изоляции обмоток приводного двигателя, скорость их старения и срок службы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Браславский И.Я., Ишматов З.Ш., Поляков В.Н. Энергосберегающий асинхронный электропривод. М.: АСАДЕМА, 2004. 202 с.
- Ершов М.С., Яризов А.Д. Энергосберегающий электропривод технологических установок трубопроводного транспорта газа, нефти и нефтепродуктов: учеб. пособие. М.: ИЦ. РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2011. 247 с.
- Голландцев Ю. А. Вентильные индукторно-реактивные двигатели. СПб.: ГНЦ РФ-ЦНИИ «Электроприбор», 2003. 148 с.
- Ильинский Н.Ф., Москаленко В.В. Электропривод: энерго- и ресурсосбережение: учеб. пособие для студ. вузов - М.: Издательский центр «Академия», 2008. 208 с.
- Кузнецов В.А., Кузьмичев В.А. Вентильно-индукторные двигатели. М.: Изд-во МЭИ, 2003. 70 с.
- Лезнов Б. С., Энергосбережение и регулируемый привод в насосных и воздухоудных установках. М.: Энергоатомиздат, 2006. 306 с.
- Пронин М.В., Воронцов А.Г. Силовые полностью управляемые полупроводниковые преобразователи (моделирование и расчет) / под ред. Крутякова Е.А. СПб.: Электросила, 2003. 172 с.
- Пронин М.В., Воронцов А.Г. Электромеханотронные комплексы и их моделирование по взаимосвязанным подсистемам. СПб.: Ладога. 2017. 222 с.
- Электроприводы и системы с электрическими машинами и полупроводниковыми преобразователями (моделирование, расчет, применение) / М.В. Пронин, А.Г. Воронцов, П.Н. Калачиков, А.П. Емельянов / под редакцией Крутякова Е.А. Санкт-Петербург: ОАО «Силовые машины», ОАО «Электросила», 2004. 252 с.
- Зиновьев Г.С. Основы силовой электроники: учеб. пособие. Новосибирск: НГТУ, 2002.
- Гейст А.В. Многоуровневый инвертор напряжения с четвертой стойкой в составе системы генерирования электрической энергии переменного тока // Сб. науч. тр. НГТУ. 2007. №4(50).



12. Филатов В. Двух- и трехуровневые инверторы на IGBT // Силовая электроника. №4. 2012.
13. Heumann K. Trends in semiconductor devices and impact on power electronics and electric drives //International Confer-

ence «Power electronics motion control». Conference Publication. Vol. 2. Warsaw, 1994.

14. Barats E.I. Energy Efficiency in Motor Driven System. Berlin: Springer-Verlag, 2003. 550 p.

Поступила в редакцию 27 августа 2018 г.

## INFORMATION IN ENGLISH

### INVESTIGATION OF BASIC ALGORITHMS OF MODULATION OF THE TWO-LEVEL INVERTER CONTROL SYSTEM

Anatoliy E. Kozyaruk

D.Sc. (Engineering), Professor, Department of electric energy and electrical engineering, Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia, E-mail: kozjaruk\_ae@spmi.ru.

Bogdan Yu. Vasilev

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Department of electric energy and electrical engineering, Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia. E-mail: vasilev.bu@spmi.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4018-0507>.

Elena E. Sheludchenko

Master degree student, Department of electric energy and electrical engineering, Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia. E-mail: elenka.sheludchenko@mail.ru.

Vendzhizuva Mbueen

Student, Department of electric energy and electrical engineering, Saint-Petersburg Mining University. Saint-Petersburg, Russia. E-mail: Vmbuende@dmil.com

In order to identify the best control algorithm, studies were made based on the effect of modulation control algorithms on the energy characteristics of a two-level autonomous inverter of a frequency converter. The research was carried out using mathematical and simulation methods. The equations of mathematical description were formulated taking into account a number of generally accepted assumptions. An equivalent circuit of a two-level autonomous inverter, comparisons of the algorithms of pulse-width modulation with carrier signals of various shapes and frequencies were made. Three different forms of the carrier signal were used: triangular, sawtooth with a trailing edge and sawtooth with a leading edge. The studies were performed at frequencies of 3000, 6000 and 9000 Hz. The conclusions were made about the identity of the spectral composition of the leading and trailing edges of the sawtooth signal, it was also noted that with the triangular waveform the part of the harmonics present in the sawtooth form is removed, that is, the triangular shape provides the best result of the operation of the autonomous inverter. Also, when the frequency of the carrier signal was increased, it was noted that the pulse packets appeared on different harmonic numbers, shifted, and the magnitude and distortion coefficient decreased, that is, the best indicators were obtained at the maximum frequency under study. When examining the voltage at the output of the chokes at a different frequency of the carrier signal, it was noted that at a higher value the pulsation frequencies of the output voltage decrease. Chokes do not eliminate harmonics but only reduce their amplitude. On the basis on the obtained results, it is concluded that the algorithm with a triangular carrier signal and maximum frequency provides the best harmonic composition of the output voltage of the frequency converter.

**Keywords:** Electric drive, frequency converter, autonomous inverter, pulse width modulation.

#### REFERENCES

1. Braslavsky I.Ya., Ishmatov Z.Sh., Polyakov V.N. *Energoberegayuschiy asinkhronnyi elektroprivod* [Energy-saving asynchronous electric drive]. Moscow: ACADEMA, 2004. 202 p. (In Russian)

2. Ershov M.S., Yarizov A.D. *Energoberegayuschiy elektroprivod tekhnologicheskikh ustnovok truboprovodnogo transporta gaza, nefi i nefteproduktov* [Energy-saving electric drive of technological installations for pipeline transport of gas, oil and oil products]. Moscow: Publishing center of Gubkin oil and gas Institute. THEM. 2011. 247 p. (In Russian)
3. Hollandtsev Yu. A. *Ventilnye induktorno-reaktivnye dvigateli* [Ventilating inductor jet engines]. S.Peterburg: SSC RF - CRI "Electropribor", 2003. 148 p. (In Russian)
4. Ilyinskii N.F., Moskalenko V.V. *Elektroprivod: energo- i resursosberezhenie* [Power Drives: Energy and Resource Saving]. Moscow: Publishing Center "Akademiya", 2008. 208 p. (In Russian)
5. Kuznetsov V.A., Kuzmichev V.A. *Ventilno-induktornye dvigateli* [Gate-inductor motors]. Moscow: Izd. MPEI, 2003. 70 p. (In Russian)
6. Leznov B.S. *Energoberezhenie i reguliruemiyi privod v nasosnykh i vozdukhoduvnykh ustanovkakh* [Energy saving and adjustable drive in pumping and blowing plants] Moscow: Energo-atomizdat, 2006. 306 p. (In Russian)
7. Pronin M.V., Vorontsov A.G. *Silovye polnostyu upravlyaemye poluprovodnikovye preobrazovateli (modelirovanie i raschet)* [Power fully-controlled semiconductor converters (simulation and calculation)], under the editorship of Krutyakov E.A. St. Petersburg: Electrosila, 2003. 172 p. (In Russian)
8. Pronin M.V., Vorontsov A.G. *Elektromekhanotronnye komplekсы i ikh modelirovanie po vzaimosvyazannym podsistemam* [Electromechanotron complexes and their modeling based on interconnected subsystems]. St. Petersburg: Lado-ga. 2017. 222 p. (In Russian)
9. Pronin M.V., Vorontsov A.G., Kalachikov P.N., Emel-yanov A.P. *Elektroprivody i sistemy s elektricheskimi mashinami i poluprovodnikovymi preobrazovatelyami (modelirovanie, raschet, primeneniye)* [Electric drives and systems with electrical machines and semiconductor converters (simulation, calculation, application)]. Edited by Krutyakov E.A. Saint Petersburg: Power Machines Electrosila, 2004. 252 p. (In Russian)



10. Zinoviev G.S. *Osnovy silovoy elektroniki* [Fundamentals of power electronics]. Novosibirsk: NSTU, 2002. (In Russian)
11. A.V. Geist., Multilevel voltage inverter with a fourth rack in the system of generating electric power of alternating current. *Sbornik nauchnykh trudov NGTU* [Collection of scientific works of NSTU]. 2007, no. 4 (50). (In Russian)
12. Filatov V. Two- and three-level inverters on IGBT. *Silovaya elektronika* [Power electronics], 2012. no. 4. (In Russian)
13. Heumann K. Trends in semiconductor devices and impact on power electronics and electric drives. International Conference «Power electronics motion control». Conference Publication. Vol. 2. Warsaw, 1994.
14. E.I. Barats. Energy Efficiency in Motor Driven System. Berlin: Springer-Verlag, 2003. 550 p.

---

Козярук А.Е. Васильев Б.Ю., Шелудченко Е.Е., Мбун В. Исследование базовых алгоритмов модуляции системы управления двухуровневым инвертором // Электротехнические системы и комплексы. 2018. № 4(41). С. 41-47. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-4\(41\)-41-47](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-4(41)-41-47)

Kozyaruk A.E., Vasilev B.Yu., Sheludchenko E.E., Mbueen V. Investigation of Basic Algorithms of Modulation of the Two-level Inverter Control System. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2018, no. 4(41), pp. 41-47. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-4\(41\)-41-47](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-4(41)-41-47)

---

Валиуллин К.Р.

Оренбургский государственный университет

## ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ УЛИЧНОГО ОСВЕЩЕНИЯ

В статье предлагается использовать метод имитационного моделирования для анализа работы электротехнических систем уличного освещения в течение длительных промежутков времени. Предложены математические модели осветительной сети на основе итерационного метода расчета режима работы электрической сети и светотехнической части установки уличного освещения, основанная на точечном методе расчета освещенности. Предложенные модели реализованы в виде  $m$ -функций на языке MatLab и в виде функциональных блоков среды Simulink. Также реализованы алгоритмы управления системой уличного освещения, учитывающие изменение во времени естественной освещенности и интенсивности дорожного движения. Разработанная модель позволяет сравнивать между собой параметры режима электротехнических систем уличного освещения различной конфигурации, тем самым позволяя сравнивать между собой различные проектные решения и варианты модернизации. Кроме того, предложенная модель может быть использована для оценки энергосберегающего эффекта при различных алгоритмах управления режимом работы электротехнической системы уличного освещения.

**Ключевые слова:** имитационное моделирование, электротехническая система уличного освещения, MatLab, Simulink, уличное освещение.

## ВВЕДЕНИЕ

В составе электротехнической системы любого города можно выделить электротехнические системы уличного освещения (ЭС УО). В контексте данной работы под ЭС УО понимается совокупность источника питания, осветительной сети, установок уличного освещения с устройствами управления их режимом работы.

Также составляющей частью системы уличного освещения можно считать освещаемое пространство [1], так как его характеристики существенно влияют на выбор установок уличного освещения и требования к режиму их функционирования.

Стоит отметить, что системы уличного освещения являются достаточно энергоемкими. Например, по данным управления жилищно-коммунального хозяйства г. Оренбурга, затраты электроэнергии на нужды уличного освещения составляют порядка 10% от суммарных затрат электроэнергии на нужды ЖКХ. Для уменьшения энергопотребления ЭС УО в различных работах предлагаются следующие мероприятия: замена светильников на более энергоэффективные [2, 3], внедрение систем управления уличным освещением [4, 5], реконструкцию осветительных сетей [6].

Все вышеперечисленные мероприятия предполагают изменения компонентного состава существующих ЭС УО, что влечет за собой следующие сложности:

- высокая стоимость внесения изменений в ЭС УО. Реконструкция систем уличного освещения является крупнозатратным мероприятием, планирование которого должно осуществляться заранее. При недостаточной проработке проекта возможна ситуация, когда внесение изменений в ЭС УО приводит к ухудшению ее работы, но, так как денежные средства были потрачены, обратная замена не производится. В связи с этим необходим механизм проверки эффективности тех или иных изменений в ЭС УО;

- сложность апробации различных алгоритмов управления режимом работы ЭС УО. Внедрение авто-

матизированных систем управления уличным освещением (АСУ УО) является дорогостоящим мероприятием, но в то же время может обладать низкой эффективностью и высоким сроком окупаемости. При этом тестирование различных алгоритмов управления на реальном объекте может приводить к снижению комфорта жителей города. Также возможны случаи, при которых дорогостоящие АСУ УО оказываются неэффективными в данных условиях, а узнать об этом возможно только в процессе эксплуатации [7];

- зависимость функционирования ЭС УО от времени года. В связи с тем, что потребление энергии ЭС УО существенно зависит от продолжительности светового дня, а значит, и от времени года [8], достоверно оценить эффективность любых изменений можно только сравнивая годовые периоды эксплуатации;

- большой территориальный охват ЭС УО. Если для оценки энергопотребления ЭС УО можно использовать данные счетчиков электрической энергии, то оценка освещенности, создаваемой осветительными установками, требует большого количества измерений, производимых в течение большого промежутка времени, что является труднореализуемым.

В настоящий момент вышеперечисленные проблемы решаются, как правило, апробацией на небольшом участке улицы города. Этот метод даёт достоверные результаты, но требует существенных денежных и временных затрат, что затрудняет сравнение различных вариантов модернизации и выбор наиболее оптимального для данных условий.

В связи с этим для оценки эффективности внесения тех или иных изменений в ЭС УО и выбора наилучшего варианта развития автором предлагается использовать имитационное моделирование ЭС УО.

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Имитационным моделированием называется метод исследования, при котором реальный объект заменяется моделью, с достаточной точностью описывающей рассматриваемую систему. Имитационная модель является логико-математическим описанием рассматриваемого объекта, которое может быть использовано

для экспериментирования на ЭВМ с целью анализа и оценки функционирования объекта в различных режимах работы, при различных внешних воздействиях и любых сочетаниях свойств рассматриваемого объекта.

Для ЭС УО имитационное моделирование обладает следующими преимуществами:

- низкая стоимость;
- быстрота получения результата моделирования;
- возможность выбора наилучшего варианта модернизации, реконструкции ЭС УО;
- возможность оценки работы ЭС УО в динамике.

В существующих исследованиях рассмотрены вопросы моделирования процессов в отдельных компонентах систем уличного освещения: тепловых процессов в светодиодных светильниках [9], функционирования ЭС УО с питанием от солнечных панелей [10], процесса передачи управляющих сигналов [11], светораспределения светодиодных светильников [12]. Но при этом автору неизвестны работы, в которых рассмотрено имитационное моделирование функционирования всех компонентов ЭС УО. В связи с этим создание имитационной модели ЭС УО, учитывающей взаимосвязи всех ее элементов, является актуальной научной задачей. В качестве инструмента моделирования была выбрана среда Simulink математического пакета MatLab.

#### РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ЭС УО

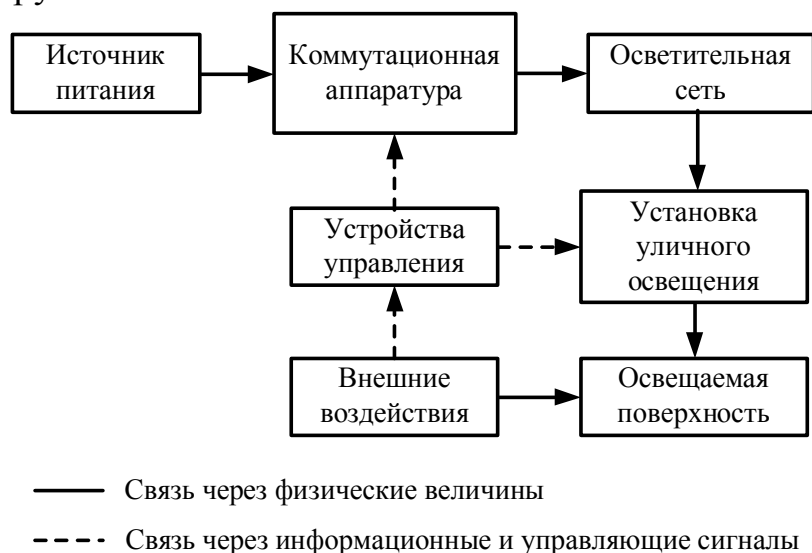
Как было отмечено ранее, в ЭС УО можно выделить следующие компоненты:

- источник питания;
- осветительная сеть;
- установки уличного освещения;
- устройства управления режимом работы ЭС УО;
- коммутационные устройства;
- освещаемые поверхности.

Логика взаимодействия между указанными компонентами представлена на **рис. 1**.

#### Источник питания

При моделировании источников питания электротехнических систем могут применяться два варианта моделей источников питания - с учетом и без учета внутреннего сопротивления источника. Модель, учитывающая внутреннее сопротивление источника питания является более точной, так как учитывает падение напряжения на самом источнике при высоких токах нагрузки.



**Рис. 1. Логика взаимодействия элементов имитационной модели**

Однако питание ЭС УО, как правило, осуществляется от шин трансформаторных подстанций 6(10)/0,4 кВ городских электрических сетей, причем осветительная нагрузка не является единственной для данной трансформаторной подстанции. В связи с этим необходимо учитывать в имитационной модели влияние прочей нагрузки источника питания либо учитывать его величиной напряжения на шинах 0,4 кВ трансформаторной подстанции таким образом, чтобы в величине этого напряжения было уже учтено падение напряжения на самом трансформаторе, вызванное нагрузкой, отличной от нагрузки ЭС УО.

Таким образом, наиболее целесообразно источник питания в имитационной модели представлять в виде идеального источника без внутреннего сопротивления, но при этом напряжение источника должно соответствовать напряжению на шинах 0,4 кВ питающей трансформаторной подстанции и учитывать падение напряжения на сопротивлении трансформатора от прочей подключенной нагрузки.

#### Осветительная сеть

Осветительные сети могут быть как однофазными, так и трехфазными.

При трехфазном исполнении установка уличного освещения (УУО) подключается к фазе *A*, следующая к фазе *B* и затем к фазе *C*. Далее такое чередование фаз сохраняется. Трехфазное исполнение осветительной сети позволяет увеличить ее протяженность, уменьшить расходы на отдельные проводники.

Так как в работе не рассматриваются быстропротекающие и аварийные процессы, то целесообразно рассматривать только одну из фаз, предполагая, что сеть работает в симметричном режиме и распределение токов и напряжений в остальных фазах будет аналогичным.

Для создания имитационной модели осветительной сети необходимо определить, какие данные являются исходными для моделирования, а какие изменяются в процессе работы сети и должны быть найдены.

Для существующих и вновь проектируемых сетей освещения известными являются тип и сечение используемых проводников, конфигурация осветительной сети, представляющая собой места расположения УУО и их присоединения, а также мощность используемых УУО. Искомыми данными является распределение токов по отдельным участкам осветительной сети и напряжения в местах подключения УУО. Таким образом, для имитационной модели ЭС УО необходимо создание математической модели, позволяющей по исходным данным рассчитывать режим работы осветительной сети.

При создании математической модели приняты следующие допущения:

– в связи с тем, что осветительные сети выполняются на низком напряжении, поперечные проводимости проводников сети не учитываются ввиду своих малых значений [13];

– нагрузка представлена моделью постоянной мощности с линейной зависимостью потребляемой мощности от напряжения. При рассмотрении работы ЭС УО в рабочих режимах с отклонением напряжения не более, чем на  $\pm 10\%$  от номинального, данное допу-

щение не окажет существенного влияния на точность расчетов, так как зависимость потребляемой мощности газоразрядных, люминесцентных и светодиодных источников света, применяемых в ЭС УО от напряжения, является линейной [14];

– не рассматриваются сети уличного освещения с двухсторонним питанием и сети с замкнутой конфигурацией в виду их редкого использования.

Математически топологию осветительной сети можно представить в виде матрицы с размерностью  $[n \times n]$ , где  $n$  – количество узлов в сети. Узлами считаются – место подключения источника питания и места подключения УУО и разветвления осветительной сети. В том случае, если узлы под номерами  $k$  и  $j$  связаны непосредственно друг с другом, то  $C(j,k)=1$ , в ином случае  $C(j,k)=0$ . Аналогичным образом с помощью матрицы могут быть заданы значения длин и сопротивлений отдельных участков сети. УУО задаются в виде векторов электрической нагрузки  $S[n]$ ,  $P[n]$ ,  $Q[n]$ , где каждый элемент вектора представляет нагрузку в узле с соответствующим номером. Режим работы сети характеризуется матрицей токов ветвей  $I[n \times n]$  и вектором напряжений в узлах сети  $U[n]$ .

Предложенный подход позволяет задавать сети различных конфигураций с различными типами нагрузок и сопротивлениями между узлами сети. Пример участка ЭС УО между узлами  $j$  и  $k$  представлен на рис. 2.

В связи с тем, что осветительные сети содержат большое количество узлов и их токовая нагрузка на начальных и конечных участках различна, формализация классических методов расчета электрической цепи (метод контурных токов и узловых потенциалов) для данной задачи оказывается затруднительной. В связи с этим для расчета режима сети предлагается использовать итерационный метод расчета, показывающий достоверные результаты для сетей с односторонним питанием [15]. Достоинствами указанного метода является быстрая сходимость, высокая точность и простота формализации для сетей с односторонним питанием и большим количеством узлов нагрузки. Расчет происходит по следующему алгоритму:

1. На нулевой итерации расчета предполагается, что потери напряжения в сети равны нулю и напряжение в каждом из узлов равно напряжению источника питания. Исходя из этого предположения, рассчитываются токи каждой УУО:

$$I_{H_k}^{(0)} = \frac{S_k}{U_1}, \quad (1)$$

где  $S_k$  – полная мощность УУО с номером  $k$ , ВА;  $U_1$  – напряжение на зажимах источника питания, В.

2. По первому закону Кирхгофа определяются токи и потоки мощностей в каждой из ветвей осветительной сети.

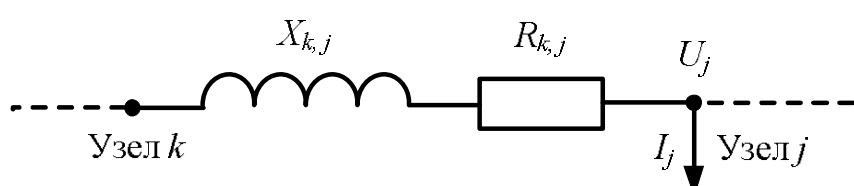


Рис. 2. Иллюстрация схемы замещения участка осветительной сети

3. Исходя из найденных значений токов и потоков мощностей, определяются падения напряжения в ветвях осветительной сети:

$$\Delta U_{k,j}^{(0)} = I_{k,j}^{(0)} R_{k,j} \cos \varphi_{k,j} + I_{k,j}^{(0)} X_{k,j} \sin \varphi_{k,j}, \quad (2)$$

где  $I_{k,j}$  – ток, протекающий по участку, соединяющему узлы под номерами  $k$  и  $j$ , А;  $R_{k,j}$ ,  $X_{k,j}$  – активное и реактивное сопротивления участка осветительной сети между узлами под номерами  $k$  и  $j$ , Ом.

4. С учетом найденной величины падения напряжения уточняются величины напряжений в узлах:

$$U_j^{(1)} = U_j^{(0)} - \Delta U_{k,j}^{(0)}. \quad (3)$$

Затем вычисляется ошибка итерационного расчета:

$$\varepsilon = \frac{|\min(U^{(0)}) - \min(U^{(1)})|}{\min(U^{(0)})} \cdot 100\%. \quad (4)$$

Если ошибка итерационного расчета больше заданного значения, то выполняется следующая итерация расчета с учетом найденных напряжений в каждом из узлов.

Описанная математическая модель расчета режима осветительной сети реализована в виде  $m$ -функции в среде MatLab и в виде функционального блока среды имитационного моделирования Simulink.

### Светотехническая часть установки уличного освещения

Для анализа полезного эффекта от ЭС УО, под которым в данной работе понимается освещенность, создаваемая системой уличного освещения, необходимо разработать математическую модель электротехнической части ЭС УО, позволяющую определять распределение светового потока и освещенность на дороге или тротуаре.

Одним из наиболее точных и проверенных способов расчета освещенности является точечный метод расчета, позволяющий определять освещенность в любой точке пространства, исходя из координат УУО, их светового потока и кривой силы света.

В системах уличного освещения наиболее часто встречаются одностороннее (светильники  $A$ ,  $B$ ) и двухстороннее симметричное (добавляются светильники  $C$ ,  $D$ , рис. 3) расположения УУО вдоль освещаемой дороги.

Для создания математической модели рассмотрим расположение светильников в трехмерном пространстве, при этом ось  $X$  направлена вдоль освещаемой дороги, ось  $Y$  – поперек, а ось  $Z$  – вертикально вверх.

Определим освещенность, создаваемую светильником  $A$  в точке  $X$ , считая известными следующие величины:

- световой поток  $F$ , создаваемый светильником  $A$ , лк;
- координаты расположения светильника относительно рассматриваемой точки - высота подвеса и расположение относительно дорожного полотна.



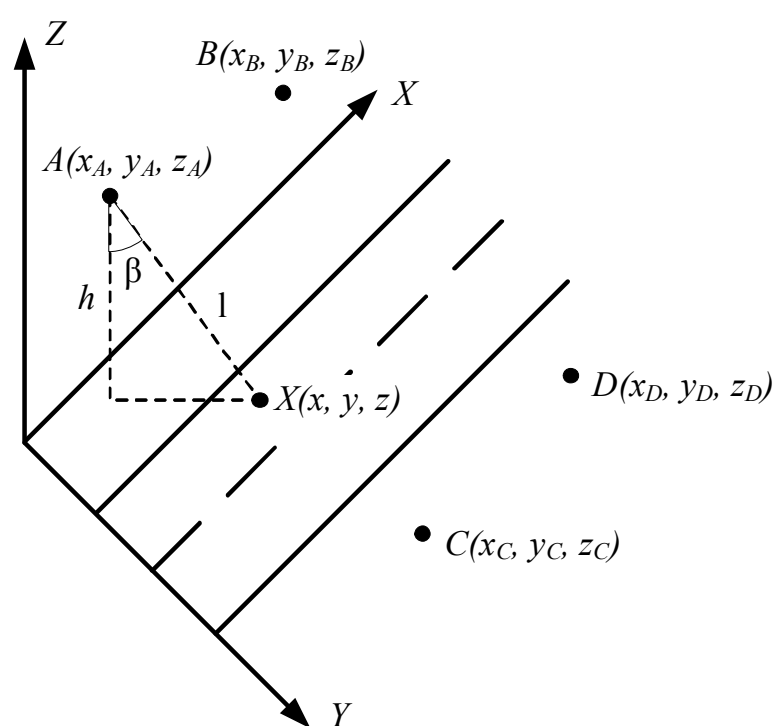


Рис. 3. Пример расположения светильников вдоль освещаемой дороги

При моделировании примем следующие допущения:

1. Осветительные установки считаем точечными источниками света, так как их линейные размеры малы по сравнению с высотой подвеса.

2. Не учитывается возможное падение светового потока светильников, вызванное их загрязнением, старением и другими причинами - все эти факторы могут быть учтены в величине светового потока  $F_{ном}$ .

3. Освещенность, создаваемая естественными источниками света, принимается постоянной для всех точек рассматриваемой поверхности.

Рассмотрим произвольную точку  $X$ , лежащую на освещаемой поверхности. Координаты точки  $X$  в общем виде  $X(x, y, z)$ . Согласно точечному методу расчета освещенность в этой точке можно найти по формуле

$$E = I_{\alpha} \frac{\cos \beta}{l^2} \cdot \frac{F_{ном}}{1000}, \quad (5)$$

где  $I_{\alpha}$  – сила света источника в заданном направлении, Кд;  $\cos \beta$  – косинус угла падения светового луча в заданную точку;  $l$  – расстояние до источника света, м;  $F_{ном}$  – номинальный световой поток светильника, лм.

Рассмотрим осветительную установку в точке  $A$ . Для нее

$$l = \sqrt{z_A^2 + (x - x_A)^2 + (y - y_A)^2}, \quad (6)$$

где  $x_A, y_A, z_A$  – координаты светильника  $A$ .

$$\cos \beta = \frac{h}{l} = \frac{z_A}{\sqrt{z_A^2 + (x - x_A)^2 + (y - y_A)^2}}. \quad (7)$$

Сила света источника в заданном направлении определяется его кривой силы света (КСС) и зависит от угла  $\beta$ , под которым луч света падает на поверхность:  $I_{\alpha} = f(\beta)$ . При формализации задачи нахождения освещенности большую сложность представляет формализация кривой силы света. Как правило, КСС задаются в табличном виде, а промежуточные значения углов аппроксимируются.

Для наиболее часто встречающихся в системах уличного освещения светильников в литературе [14, 16-17] встречаются следующие аппроксимирующие формулы:

– для КСС типа Л

$$I_{\alpha}(\beta) = 154,8 \cdot \frac{\cos \beta}{\cos(70 \cdot \sin^{1,2}(1,66\beta))}, \quad (8)$$

– для КСС типа Л-Ш

$$I_{\alpha}(\beta) = 119 \cdot \frac{\cos \beta}{\cos(78,3 \cdot \sin^{1,4}(1,39\beta))}, \quad (9)$$

– для КСС типа Ш

$$I_{\alpha}(\beta) = 78,3 \cdot \frac{\cos \beta}{\cos(84,4 \cdot \sin^{1,5}(1,2\beta))}. \quad (10)$$

Таким образом, формулы (8-10) позволяют формализовать задачу нахождения освещенности, создаваемой светильником  $A$  в точке  $X$ , согласно формуле (5).

Аналогичным образом можно найти освещенности, создаваемые остальными светильниками в окрестности рассматриваемой точки, и определить суммарную освещенность:

$$E = E_A + E_B + E_C + E_D + E_{ест}, \quad (11)$$

где  $E_{ест}$  – освещенность, создаваемая естественными источниками света, лк.

Также в предлагаемой математической модели предлагается учитывать снижение светового потока используемых ламп в зависимости от приложенного напряжения [19]:

– для ламп типа ДРЛ

$$F = F_{ном} (3,26 \frac{U}{U_{ном}} - 2,26), \quad (12)$$

где  $F$  – световой поток лампы при напряжении  $U$ , лм;  $F_{ном}$  – номинальный световой поток лампы, лм;  $U_{ном}$  – номинальное напряжение лампы, В;

– для люминесцентных ламп с пускорегулирующими аппаратами

$$F = F_{ном} (1,05 \frac{U}{U_{ном}} - 0,05), \quad (13)$$

– для светодиодных ламп в рассматриваемом диапазоне напряжений заметного снижения светового потока не происходит [20].

Математическая модель была реализована в виде функционального блока в среде моделирования Simulink и позволяет получать значения освещенности на освещаемой поверхности при различных режимах работы УУО и значениях естественной освещенности.

#### МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ УЛИЧНЫМ ОСВЕЩЕНИЕМ И ИЗМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Различные алгоритмы управления уличным освещением представлены и подробно описаны в работах [8, 21-23]. С точки зрения имитационного моделирования модель должна иметь возможность изменения светового потока установок уличного освещения в процессе моделирования в зависимости от тех или иных внешних факторов. Изменение светового потока может

осуществляться путем изменения питающего напряжения для люминесцентных ламп либо с помощью ШИМ-модуляции для светодиодных светильников. При отсутствии плавного или ступенчатого регулирования имитационная модель должна иметь возможность включения и отключения установок уличного освещения по заданному графику.

В рамках исследования были реализованы следующие алгоритмы управления:

1) Ступенчатое управление по заданному временному графику [22]. В этом случае возможны только два состояния УУО – включенное и отключенное, переход между которыми осуществляется в заданное графиком время.

2) Ступенчатое управление по значению естественной освещенности. Принцип управления аналогичен предыдущему, но переход УУО из одного состояния в другое происходит при достижении определенного порога естественной освещенности.

3) Плавное управление по значению естественной освещенности. При указанном способе управления мощность УУО плавно увеличивается при снижении естественной освещенности в вечерний период, и снижается при повышении естественной освещенности в утреннее время. Указанный алгоритм рассмотрен автором в работе [8].

4) Плавное управление по значениям естественной освещенности и интенсивности дорожного движения, предложенное в статье [22]. Необходимая мощность УУО определяется аналогично предыдущему способу, а затем корректируется исходя из данных об интенсивности дорожного движения на рассматриваемом участке.

Для реализации описанных выше моделей системы управления уличным освещением в среде имитационного моделирования были реализованы следующие блоки:

- блок текущей даты и времени. Выходными значениями данного блока являются текущая дата и количество минут, прошедших с начала суток;

- блок расписания включения и отключения УУО. В данном блоке задаётся время включения и отключения УУО для каждого из дней периода симуляции работы системы уличного освещения;

- блок значений естественной освещенности, содержащий значения естественной освещенности по датам календарного года, полученные экспериментально;

- блок значений интенсивности дорожного движения на рассматриваемом участке дороги, содержащий сведения о количестве транспортных средств, проехавших по данному участку в обоих направлениях за промежутки времени в 10 минут;

- блок корректировки мощности УУО по значению прогноза интенсивности дорожного движения. Алгоритм работы этого блока описан автором в статье [23].

#### ОПИСАНИЕ РАБОТЫ ЭЛЕМЕНТОВ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ И ЕЕ АПРОБАЦИЯ

Реализация модели была произведена в среде имитационного моделирования Simulink математического

пакета MatLab в виде отдельных блоков, представляющих собой компоненты электротехнической системы уличного освещения. Шаг моделирования принят равным одной минуте реального времени, таким образом, одни сутки симуляции работы включают в себя 1440 шагов симуляции. Рассмотрим отдельные составляющие части имитационной модели:

1) Модель осветительной сети. Входными сигналами для данного блока являются напряжение на источнике питания и сигнал, поступающий от системы управления мощностью УУО, представляющий собой рассчитанный уровень мощности УУО для данного момента времени в относительных единицах. Параметрами модели являются матрицы соединений, активных и реактивных сопротивлений ветвей осветительной сети, а также вектора активных и реактивных нагрузок в узлах осветительной сети. Эти данные могут быть заданы в табличном виде в рабочем пространстве математического пакета MatLab. Выходными значениями являются матрицы токов, протекающих по ветвям сети и напряжений в её узлах в каждый из моментов времени симуляции. Математическая модель данного блока описана ранее.

2) Блок, имитирующий светотехническую часть установки УУО. Входными параметрами блока являются текущее значение напряжения в месте подключения осветительной установки и значение естественной освещенности. Выходное значение – распределение освещенности на участке дороги между двумя ближайшими светильниками.

С помощью разработанных моделей отдельных компонентов ЭС УО возможно имитационное моделирование электротехнических систем уличного освещения с различными типами источников света, питающих проводов и любым расположением установок уличного освещения.

Разработанная имитационная модель апробирована посредством моделирования ЭС УО улицы Орской г. Оренбурга для различных алгоритмов управления.

На данном участке на железобетонных опорах СВ-95 установлены светильники с лампами типа ДнАТ-250 и широкой кривой силы света. Исполнение сети уличного освещения трёхфазное, расстояние между опорами уличного освещения – 30 м. В сети 30 установок уличного освещения (по 10 на каждую фазу), соединённых между собой проводом СИП-3 сечением 35 мм<sup>2</sup>. Существующая система управления уличным освещением работает по заданному графику.

Для оценки возможностей имитационной модели было произведено сравнение функционирования ЭС УО при работе по заданному графику и при управлении по значению освещенности. За значение освещенности, при котором включаются УУО, было принято значение в 15 лк (люкс). Моделирование производилось для промежутка времени с 1 по 10 марта 2017 года. На **рис. 4** представлены графики изменения тока, потребляемого ЭС УО и освещенности (в логарифмическом масштабе) у наиболее удаленной установки уличного освещения для 9 марта.

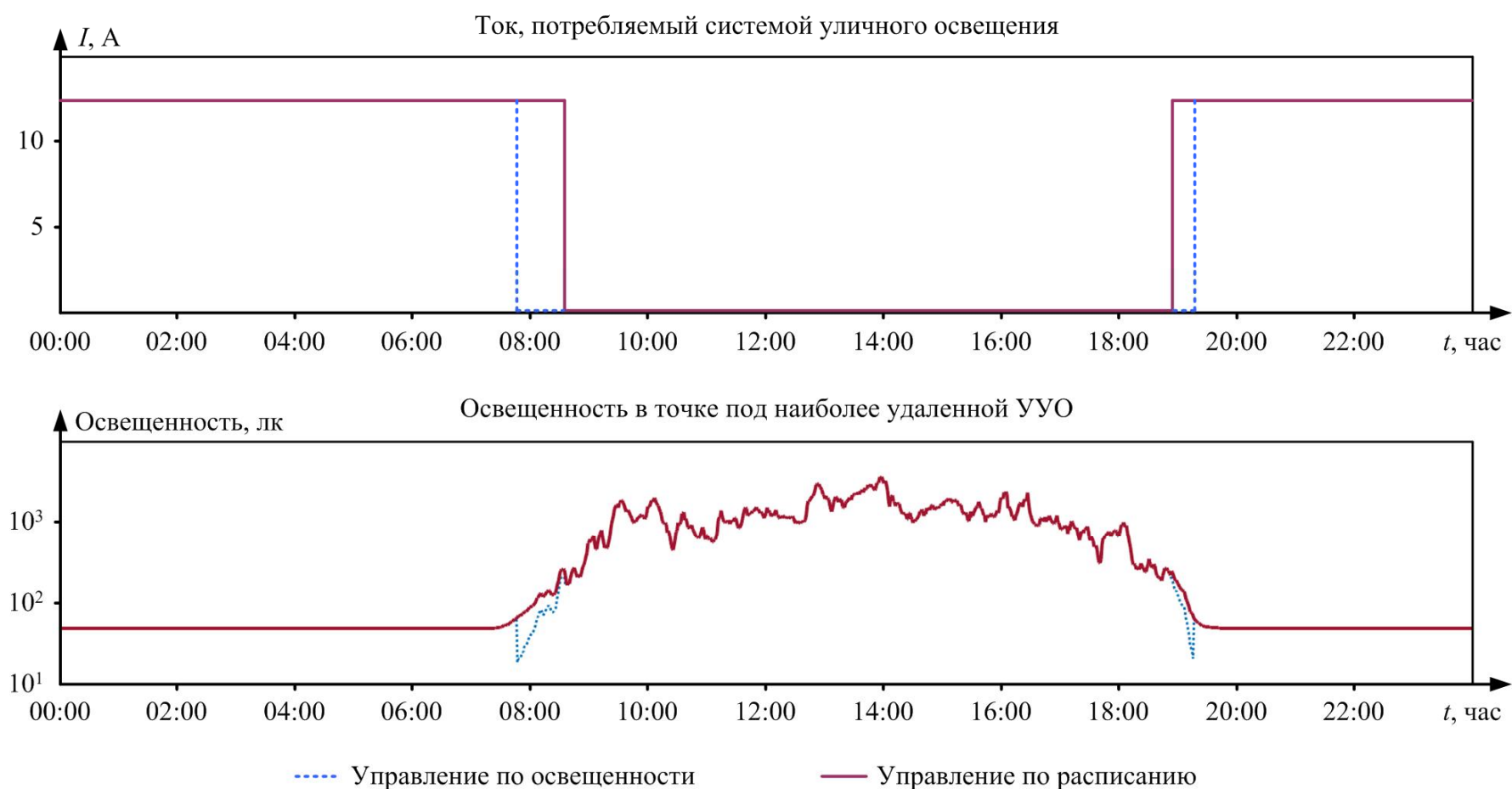


Рис. 4. Моделирование алгоритмов управления мощностью УУО с помощью предлагаемой имитационной модели

Полученные результаты позволяют оценить адекватность составленного графика включения и отключения УУО, а также соответствие нормативам освещенности. Из графиков на рис. 4 видно, что в случае управления по заданному графику обеспечивается более высокий, но избыточный уровень освещенности дорожного покрытия. Управление по освещенности в определенные моменты допускает снижение до минимально допустимого значения в 15 лк, что снижает энергопотребление ЭС УО. Также с помощью полученных данных было определено значение энергопотребления УУО за указанный промежуток времени. При управлении по заданному графику энергопотребление составило 376,14 кВт·ч, при управлении по освещенности – 352,03 кВт·ч (экономия составила 24,11 кВт·ч или 6,8%).

Таким образом, с помощью разработанной имитационной модели можно оценить экономию различных мероприятий по модернизации системы уличного освещения без их непосредственного внедрения.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Для оценки эффективности решений по модернизации электротехнических систем уличного освещения разработана имитационная модель, включающая в себя источник питания, осветительную сеть, светотехническую модель установки уличного освещения и учитывающая взаимосвязь указанных компонентов.

2. Разработана и реализована в виде  $m$ -функции математическая модель электротехнической части ЭС УО, основанная на матричном представлении топологии осветительной сети и итерационном методе расчета параметров её режима.

3. Разработана и реализована в виде  $m$ -функции математическая модель светотехнической части ЭС УО, основанная на точечном методе расчета освещенности, учитывающая различные КСС источников света, используемых в ЭС УО и падение светового потока при изменении питающего напряжения.

4. В среде Simulink реализованы различные алгоритмы управления ЭС УО: управление по заданному графику, управление по значению естественной освещенности и интенсивности дорожного движения.

5. Предложенная обобщенная имитационная модель ЭС УО реализована в среде Simulink математического пакета MatLab и позволяет всесторонне оценивать работу ЭС УО по ее электротехническим и светотехническим параметрам.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гавриленко В.Ю. Разработка и применение рационального уличного освещения // Таврический научный обозреватель. 2016. №5-1 (10). С. 364-367.
2. Семеняк М. В., Горюнов В. Н. Светодиодные источники света в системах наружного и внутреннего освещения // Вестник ОмГАУ. 2011. №2 (2). С. 59-62.
3. Идиатуллина А.М., Смоленцев Р.А. Управление энергоэффективностью и энергосбережением в сфере городского наружного освещения на материалах города Казани // Вестник Казанского технологического университета. 2014. №18. С. 280-284.
4. Алексеев Е. Г., Шиков С. А., Ивлиев С. Н. Интеллектуальные системы на примере уличного освещения // Известия Самарского научного центра РАН. 2017. №1-2. С. 439-442.
5. Валиуллин К. Р. Разработка алгоритма функционирования автоматизированной системы управления уличным освещением // Школа-семинар молодых ученых и специалистов в области компьютерной интеграции производства: материалы. Оренбург, 2016. С. 297-302. ISBN 978-5-7410-1608-4
6. Преимущества и недостатки ретрофита уличного освещения при установке светодиодных светильников, а также их влияние на потери активной мощности в трансформаторах распределительных сетей / А.И. Троицкий, С.С. Костинский, В.И. Власенко, Т.З. Химишев // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. 2016. №2 (190). С. 53-61.
7. Крахмалев Е. И. Энергосервис в системах уличного освещения: технико-экономические аспекты // Вестник ЮУрГУ. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2012. №35. С. 150-153.



8. Валиуллин, К.Р. Интеллектуальная система управления уличным освещением на основе нейросетевых технологий // Вестник Оренбургского государственного университета. 2015. № 4. С. 185-191.
9. Казаринов Л.С., Вставская Е.В., Барбасова Т.А. Концепция повышения энергетической эффективности комплексов наружного освещения // Фундаментальные исследования. 2011. № 12-3. С. 553-558.
10. Martyanov A. S., Korobotov D. V., Solomin E. V. Simulation model of public street lighting provided by a photovoltaic converter and battery storage // Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 2017 International Conference on. IEEE, 2017. С. 1-5.
11. Sittoni A. et al. Street lighting in smart cities: A simulation tool for the design of systems based on narrowband PLC // Smart Cities Conference (ISC2), 2015 IEEE First International. – IEEE, 2015. С. 1-6.
12. Moreno I. et al. Modeling LED street lighting // Applied optics. 2014. Т. 53. №. 20. Р. 4420-4430.
13. Идельчик В.И. Электрические системы и сети: учебник для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1989. 592 с.
14. Морозов А.П., Карандаев А.С., Ларина Т.П. Электротехника и энергетические системы обеспечения жизнедеятельности человека. Энергосбережение при освещении: монография. Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова, 2004. 186 с.
15. Винников Б.Г., Зеленский Д.А., Картавцев В.В. Расчет режимов разомкнутых распределительных сетей методом распределения мощности // Вестник ВГТУ. 2009. №8. С. 171-174.
16. Айзенберг Ю.Б. Световые приборы. М.: Энергия, 1980. 463 с.
17. Кнорринг Г.М. Светотехнические расчеты в установках искусственного освещения. Л.: Энергия, 1973. 200 с.
18. Никитин В.Д. Совершенствование методов расчета освещения улиц // Светотехника. 2001. №3. С.27-29.
19. Козловская В.Б., Радкевич В.Н., Колосова И.В. Влияние напряжения на основные характеристики ламп электрического освещения // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2009. №1. С.5-13.
20. Выбор оптимального режима работы светодиодных излучателей / В.И. Константинов, Е.В. Вставская, Т.А. Барбасова, В.О. Волков // Вестник ЮУрГУ. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2010. №2 (178). С.46-51.
21. Валиуллин К.Р. Анализ способов управления уличным освещением по различным критериям // Электроэнергетика глазами молодежи: науч. тр. Vмеждународ. техн. конф., Т.2., 10-14 ноября 2014 г., г. Томск, Мин-во образования и науки РФ, Томский политехнический университет. Томск, 2014. С. 275-279.
22. Валиуллин К.Р. Энергоэффективная система управления уличным освещением // Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: материалы Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием (Екатеринбург, 12–16 декабря 2016 г.). Екатеринбург: УрФУ, 2016. с. 115-119.
23. Валиуллин К.Р. Нейросетевое прогнозирование временного ряда естественной освещенности для увеличения энергоэффективности систем управления уличным освещением // Материалы международной конференции «Эффективная энергетика–2015». Санкт-Петербург: СПбПУ, 2015. С. 237-242.

Поступила в редакцию 01 октября 2018 г.

## INFORMATION IN ENGLISH

### IMITATIONAL MODELING OF A STREET LIGHTING SYSTEM

Kamil R. Valiullin

Senior Lecturer, Department of Electrical and Thermal Power Engineering, Orenburg State University, Orenburg, Russia.  
E-mail: ValiullinKamil91@gmail.com.

The article proposes an imitation model of an electrotechnical street lighting system, which includes the following components: a power supply model, a lighting network model, a lighting model of the lighting installation, a model of the street lighting control system and a model of changing environmental parameters. The Simulink program of MatLab mathematical package was chosen as simulation environment. The model of the lighting network based on the iterative method of calculation is realized, which allows calculating the steady-state conditions of the electrical part of the street lighting system. The model is implemented in the form of an m-function in the MatLab language and in the form of a functional block of the Simulink environment. Likewise, the lighting model of a street lighting installation was implemented taking into account the external illumination and the dependence of the light flux of various types of lamps on the value of the supply voltage. In addition, a model of various algorithms for controlling the street lighting system is implemented. The resulting simulation model allows analyzing the operation of electrotechnical street lighting systems over long periods through computer simulation thereby enabling the evaluation of the correctness of design solutions and the effectiveness of various energy efficiency measures.

**Keywords:** Imitation modeling, electrotechnical street lighting system, MatLab, Simulink, street lighting.

#### REFERENCES

1. Gavrilenko V.Yu. Development and application of rational street lighting. *Tavrisheskiy nauchnyy obozrevatel* [Taurian scientific observer]. 2016, no. 5-1 (10), pp. 364-367. (In Russian)
2. Semenyak M.V., Goryunov V. N. LED light sources in systems of external and internal illumination. *Vestnik OMGU* [Bulletin of OmGAU]. 2011, no. 2 (2), pp. 59-62. (In Russian)
3. Idiatullina A.M., Smolentsev R.A. Management of energy efficiency and energy saving in urban outdoor lighting on the materials of the city of Kazan. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Kazan Technological University]. 2014, no. 18, pp. 280-284. (In Russian)
4. Alekseev E. G., Shikov S. A., Ivliev S. N. Intellectual systems based on the example of street lighting. *Izvestiya samarskogo nauchnogo centra rossiyskoy akademii nauk*. [News of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences]. 2017, no. 1-2, pp. 439-442. (In Russian)
5. Valiullin K.R., Semenova N.G. Development of an algorithm for the functioning of an automated control system for



- street lighting. School-Seminar of Young Scientists and Specialists in the Field of Computer Integration of Production: Materials. Orenburg, 2016, pp. 297-302 (In Russian)
6. Troitsky A. I., Kostinsky S. S., Vlasenko V. I., Khimichev T. Z. Advantages and disadvantages of retrofit of street lighting when installing LED light fixtures as well as their effect on the losses of active power in transformers of distribution networks. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedeniy severo-kavkazskiy region. Tekhnicheskie nauki*. [News from North-Caucasian region universities. Series: Technical sciences]. 2016, no. 2 (190), pp. 53-61. (In Russian)
  7. Krakhmalev E. I. Energy service in street lighting systems: technical and economic aspects. *Vestnik yuzhno-uralskogo gosudarstvennogo universiteta seriya kompyuternye tekhnologii, upravlenie, radioelektronika* [Bulletin of the South Ural State University. Series: Computer technology, management, electronics]. 2012, no. 35, pp. 150-153. (In Russian)
  8. Valiullin K.R., Semenova N. G. Intelligent street lighting control system based on neural network technologies. *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of the Orenburg State University]. 2015, no. 4, pp. 185-191. (In Russian)
  9. Kazarinov L.S., Vstavskaya E.V., Barbasova T.A. The concept of increasing the energy efficiency of outdoor lighting complexes. *Fundamentalnye issledovaniya* [Fundamental research]. 2011, no. 12-3, pp. 553-558. (In Russian)
  10. Martyanov A.S., Korobov D.V., Solomin E.V. Simulation of the public street lighting provided by a photovoltaic converter and battery storage. Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 2017 International Conference on. IEEE, 2017, pp. 1-5.
  11. Sittoni A. et al. Street lighting in smart cities: // Smart Cities Conference (ISC2), 2015 IEEE First International. IEEE, 2015, pp. 1-6.
  12. Moreno I. et al. Modeling LED street lighting. Applied optics. 2014. Vol. 53, no. 20, pp. 4420-4430.
  13. Idelchik V.I. *Elektricheskie sistemy i seti: Uchebnik dlia vuzov* [Electrical Systems and Grids: Textbook for high schools]. Moscow, Energoatomisdat Publ., 1989. 592 p. (In Russian)
  14. Morozov A.P., Karandaev A.S., Larina T.P. *Elektrotehnika i energeticheskiye sistemy obespecheniya zhiznedeyatel'nosti cheloveka. Energoberezheniye pri osveshchenii: Monografiya* [Electrical engineering and energy systems to ensure human life. Energy Saving in Illumination: Monograph]. Magnitogorsk: NMSTU, 2004. 186 p. (In Russian)
  15. Vinnikov B.G., Zelensky D.A., Kartavtsev V.V. Calculation of the modes of open distribution networks by the power distribution method. *Vestnik voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Voronezh State Technical University]. 2009, no. 8, pp. 171-174. (In Russian)
  16. Ayzenberg Yu.B. *Svetovye pribory* [Lighting devices]. Moscow: Energy, 1980. 463 p. (In Russian)
  17. Knorring G.M. *Svetotekhnicheskie raschety v ustanovkakh iskustvennogo osveshcheniya* [Lighting calculations in artificial lighting]. Leningrad: Energy, 1973, 200 p. (In Russian)
  18. Nikitin V.D. Perfection of methods for calculating street lighting. *Svetotekhnika* [Lighting]. 2001, no. 3, pp. 27-29. (In Russian)
  19. Kozlovskaya V.B., Radkevich V.N., Kolosova I.V. Influence of voltage on the main characteristics of electric lighting lamps. *Energetika izvestiya vysshih uchebnyh zavedeniy i ehnergeticheskikh obedineniy SNG* [Power Engineering. News of higher educational institutions and energy associations of the CIS]. 2009, no. 1, pp. 5-13. (In Russian)
  20. Konstantinov V. I., Vstavskaya E. V., Barbasova T. A., Volkov V. O. Choice of the optimum mode of work of LED emitters. *Vestnik yuzhno-uralskogo gosudarstvennogo universiteta seriya kompyuternye tekhnologii, upravlenie, radioelektronika* [Bulletin of the South Ural State University. Series: Computer technology, management, electronics]. 2010, no. 2 (178), pp. 46-51. (In Russian)
  21. Valiullin K.R. Analysis of ways to control street lighting by various criteria. *Elektroenergetika glazami molodezhi: nauch. tr. V mezhdunar. tekhn. konf.* [Power engineering through the eyes of youth: scientific works of international technical conference], Vol. 2., Tomsk, November 10-14, 2014. Ministry of Education and Science of the Russian Federation, Tomsk Polytechnic University. Tomsk, 2014, pp. 275-279. (In Russian)
  22. Valiullin K.R., Semenova N.G. Energy-efficient street lighting control system. *Energo- i resursoberezhenie. Energobespechenie. Netraditsionnye i vozobnovlyаемые istochniki energii: materialy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh s mezhdunarodnym uchastiem* [Energy and Resource Saving. Energy supply. Non-traditional and renewable sources of energy: materials of the All-Russian scientific and practical conference of students, graduate students and young scientists with international participation] (Ekaterinburg, December 12-16, 2016). Ekaterinburg: UrFU, 2016, pp. 115-119. (In Russian)
  23. Valiullin K.R. Neural network forecasting of the time series of daylight to increase the energy efficiency of street lighting control systems. *Materialy mezhdunarodnoy konferentsii "Effektivnaya energetika - 2015"* [Proceedings of the international conference "Efficient Energy - 2015"]. St. Petersburg: SPbPU, 2015, pp. 237-242. (In Russian)

Валиуллин К.Р. Имитационное моделирование электротехнической системы уличного освещения // Электротехнические системы и комплексы. 2018. № 4(41). С. 48-55. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-2\(39\)-48-55](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-2(39)-48-55)

Valiullin K.R. Imitational Modeling of a Street Lighting System. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2018, no. 4(41), pp. 48-55. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-4\(41\)-48-55](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-4(41)-48-55)

Ибрагим А.А., Мирошниченко А.А., Соломин Е.В., Гордиевский Е.М., Ковалев А.А.

Южно-Уральский государственный университет (НИУ)

## СТРАТЕГИЯ УПРАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ ОТСЛЕЖИВАНИЯ ТОЧКИ МАКСИМАЛЬНОЙ МОЩНОСТИ АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА ДВОЙНОГО ПИТАНИЯ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

Энергия ветра в настоящее время играет важную роль в выработке экологически чистой и дешевой электроэнергии в мире. Во многих странах повышается количество ветроэнергетических установок, и доля возобновляемых источников в общей генерации энергии постоянно растет. Ученые и инженеры прилагают серьезные усилия для оптимизации использования этого типа энергии с помощью различных методов и подходов. Асинхронный электрический генератор с двойным питанием является неотъемлемой частью широкого спектра ветроэнергетических установок благодаря своей высокой эффективности в преобразовании энергии и наличием управления реактивной мощностью. В связи с непостоянством и флуктуациями ветрового потока растет и требование к системам отбора мощности, вследствие чего основной задачей управления ветроэнергетической установкой является отслеживание и регулирование тока нагрузки для достижения максимального использования энергии ветра. Статья представляет собой результаты изучения системы управления для отслеживания точки максимальной мощности ветроэнергетической установки. Изучение ее поведения в установившемся режиме осуществлялось с помощью программного комплекса MatLab / Simulink. Благодаря моделированию данной системы появилась возможность изучить процессы, возникающие в асинхронной машине двойного питания. Также удалось отследить искомую точку максимума отбора мощности и следовать по пути её максимальной генерации, с учетом оптимальных рабочих точек по графику коэффициента мощности при разных скоростях ветра и быстроходности ротора ветроэнергетической установки. Также данное исследование позволило изучить компьютерную модель ветроэнергоустановки и получить значения скорости вращения ротора, электромагнитного момента, составляющих тока ротора, напряжения на роторе, напряжения на статоре и значение токов на выводах ротора и статора в установившемся режиме. Полученные осциллограммы демонстрируют правильность теоретических данных и расчетов, а также дают возможность продолжить исследования в выбранном направлении.

**Ключевые слова:** энергия ветра, модель ветровой турбины, отслеживание точки максимальной мощности, электрогенератор двойного питания, анализ установившегося режима, косвенный способ управления скоростью.

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время системы генерации электроэнергии на основе энергии ветра стремительно развиваются. Разные типы ветроэнергетических установок используют различные принципы отбора мощности: работа на постоянной частоте вращения ротора ветроэнергоустановки при переменной скорости ветра, на постоянной частоте вращения при постоянной скорости ветра, работа на постоянной частоте с использованием асинхронного электрогенератора с двойным питанием и т.д. Основное преимущество использования последнего принципа отбора мощности заключается в том, что мощность, регулируемая силовым преобразователем, является лишь частью суммарной мощности турбины, поэтому потери мощности и стоимость генерации энергии меньше, чем при использовании полноценного преобразователя мощности [1]. На основе этих доводов впервые будет произведено исследование системы управления для отслеживания точки максимальной мощности в асинхронном электрогенераторе с помощью регулятора скорости непрямого действия. Крутящий момент принимается в качестве базовой величины.

Регулятор мощности относится к регуляторам скорости непрямого действия [2]. В связи с этим анализ устойчивой работы асинхронного электрогенератора с двойным питанием проведен путем моделирования на программном комплексе MatLab / Simulink. В процессе исследования проверяется адекватность построенной модели и реальность проведенных исследований

### ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Асинхронный электрогенератор двойного питания является асинхронной электрической машиной с фазным ротором, у которой обмотки статора и ротора присоединяются к одному или разным источникам переменного тока. Такой тип генератора используется для работы в широких диапазонах мощности, от нескольких киловатт до нескольких мегаватт. Используемый в нем принцип работы отличается от принципа работы, который применяется в обычной синхронной или асинхронной машине. Данный принцип может быть использован в работе с ограниченным диапазоном скоростей, что позволит уменьшить размеры преобразователя мощности, например при выработке электроэнергии на переменной скорости ветра.

Принципиальная электрическая схема асинхронной электромашины двойного питания показана на **рис. 1**. Система статора трехфазная с питанием от сети постоянного напряжения и частоты. При подаче питания на статор возникает электромагнитный поток [1-3], который замыкается в обмотке статора. Обмотка ротора также является трехфазной, но с иным напряжением и частотой. Это осуществляется благодаря использованию трехфазного преобразователя с обратной связью, как показано на **рис. 1**. Такой преобразователь с рассматриваемой в статье системой управления необходим для подачи основного трехфазного напряжения на ротор электрогенератора, а также для управления точкой максимальной мощности ветроэнергоустановки и для обеспечения передачи мощности через ротор к потребителю [4].

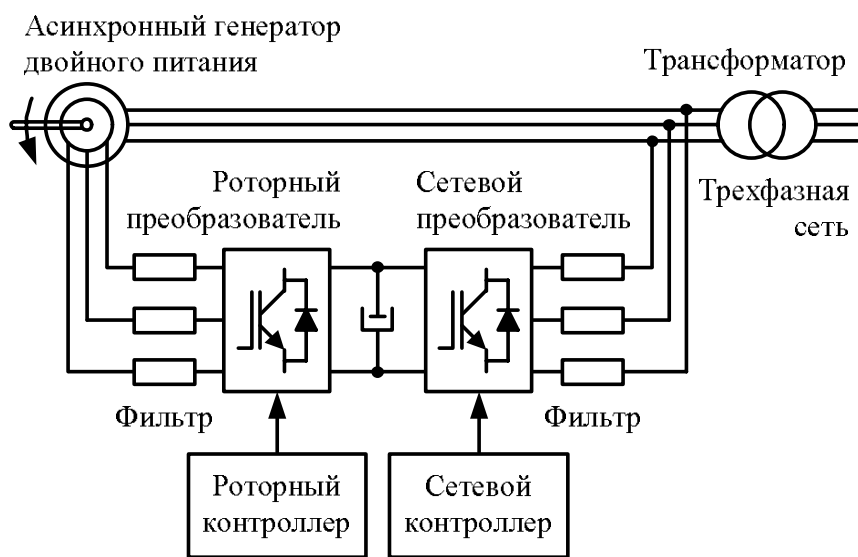


Рис. 1. Общая система питания асинхронной электромашины двойного питания [2]

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Модель ветроэнергостанции состоит из следующих компонентов:

1) Аэродинамическая модель, которая характеризуется мощностью обмотки ротора и определяет механический крутящий момент ротора турбины  $T_t$  как функцию интенсивности воздушного потока, т.е. скорости ветра  $V_v$  и угловой скорости вращения турбины  $\Omega_t$  на конце лопасти. Механический крутящий момент турбины  $T_t$ , создаваемый ротором, зададим выражением

$$T_t = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 V_v^2 C_p, \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность воздуха;  $R$  – радиус ротора ветроэнергостанции;  $V_v$  – скорость ветра;  $C_p$  – коэффициент мощности [5, 6].

Самым распространенным методом представления крутящего момента и коэффициента мощности  $C_p$  является их выражение в виде функций быстроходности ветроколеса  $\lambda$  и установочного угла  $\beta$ :

$$C_p(\lambda, \beta) = 0,73 \cdot \left( \frac{151}{\lambda} - 0,58 \cdot \beta - 0,002 \beta^{2,14} - 13,2 \right) e^{-\frac{19,4}{\lambda}}, \quad (2)$$

где  $\lambda$  – функция быстроходности ветроколеса;  $\beta$  – установочный угол.

Быстроходность ветроколеса определяется как

$$\lambda = \frac{R \Omega_t}{V_v}, \quad (3)$$

где  $\Omega_t$  – угловая скорость вращения турбины.

2) Система контроля установочным углом (углом заклинивания) предназначена для обеспечения вращения всех лопастей на одинаковых углах. Данное независимое регулирование снижает нагрузку на контроллер. Этот подход также снижает деформацию лопастей благодаря снижению момента кориолисовых сил и гироскопического момента. Кроме этого, за счет этого контроллер приобретает больше информации о периферии [7]. Таким образом, система контроля углов заклинивания рассчитывает динамику установочных углов как функцию, зависящую от базовой величины  $\beta_{ref}$ .

3) Механическая система: для проведения модели-

рования введем основную резонансную частоту и массу модели, как показано на рис. 2, затем последовательно промоделируем действие привода, в то время как другая частота должна быть выше или ниже по величине. Величина момента инерции  $J_t$  связана с массой турбины, а момент инерции  $J_m$  соотносится с электрической частью машины. Если основная резонансная частота является частотой вращения ротора, часть момента попадает в систему в виде  $J_m$ . Таким образом, механическая система позволяет рассчитать угловую скорость вращения турбины и генератора ( $\Omega_t$  и  $\Omega_m$ ) как функцию крутящего момента турбины  $T_{em}$ . Скорость вращения турбины  $\Omega_{t-ar}$  и вращающий момент  $T_{t-ar}$  задаются выражениями [8-10]

$$\Omega_{t-ar} = N \Omega_t, \quad (4)$$

где  $N$  – передаточное число редуктора.

$$T_{t-ar} = \frac{T}{N}. \quad (5)$$

Коэффициент жесткости  $K_{tm}$  и коэффициенты затухания  $D_t$  и  $D_m$  описывают упругую связь между  $J_t$  и  $J_m$ . В данном случае  $D_t$  и  $D_m$  являются коэффициентами трения, характеризующими механические потери при трении [11].

4) Преобразователь мощности асинхронного электрогенератора двойного питания со встречным включением. Он преобразует крутящий момент генератора в ток генератора, а затем в ток сети как функцию сетевого напряжения [12].

5) Система управления вычисляет крутящий момент генератора, установочный угол и значение реактивной мощности как функции скорости ветра и напряжения сети. На рис. 3 показана блок-схема модели с переменной скоростью вращения ветроэнергостанции.

На основе базовых выражений для модели трехлопастной ветроустановки (выражения (1-3)), имитационная модель ветроустановки мощностью 2,4 МВт может быть реализована с помощью программы MatLab / Simulink. Примем передаточное число редуктора  $N = 100$ , радиус ротора турбины (т.е. длину лопастей)  $R = 42$  м и плотность воздуха  $\rho = 1,225$  кг/м<sup>3</sup>. На рис. 4, а показана зависимость коэффициента крутящего момента  $C_t$  от быстроходности, на рис. 4, б приведена кривая мощности  $P$  в зависимости от скорости ветра  $V_v$  и на рис. 4, в изображен график зависимости коэффициента использования энергии ветра  $C_p$  от быстроходности ветроколеса  $\lambda$  для конкретной ветроустановки [13, 14]. На основе выражений (1) - (3) смоделируем работу и подключение блока ветроустановки к блоку асинхронного электрогенератора двойного питания. Входным параметром для данной модели ветроустановки будет скорость ветра, которая описана на рис. 4, б (принимая 8 м/с). Примем во внимание, что передаточное число редуктора  $N$  и параметры модели ветровой турбины приведены к высокоскоростному валу [15-17].

Поскольку электромашина ветроустановки работает в режиме генератора, то крутящий момент должен быть отрицательным. Выходными данными для модели будет механический крутящий момент ротора  $T_t$ , который передается асинхронной машине [18].

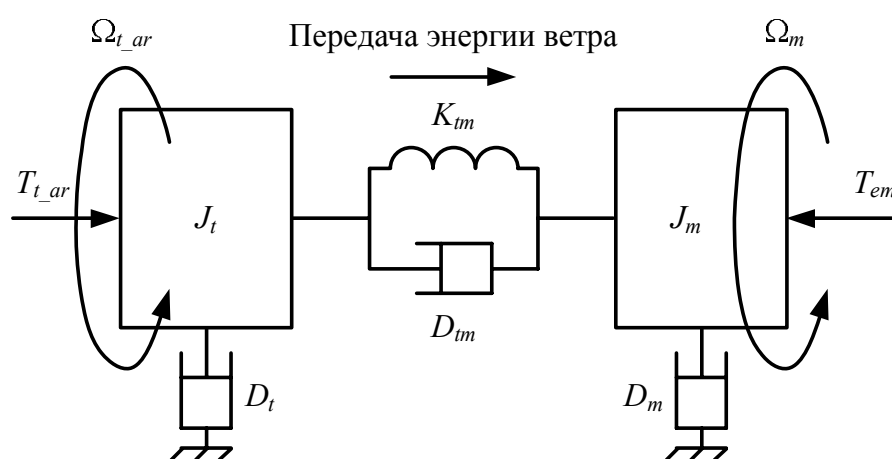


Рис. 2. Механические режимы

Целью управления отбором мощности ветроэнергостанции является отслеживание точки максимальной мощности. Существует множество способов управления ветроустановкой с помощью нагрузки, регулируемой для достижения точки максимальной мощности. Используя динамическую устойчивость электродвигателя, работающего с постоянной частотой вращения с кривой максимальной мощности, рассмотрим электромагнитный момент в качестве базовой величины для регулирования. Этот метод управления называется непрямым контролем скорости. Исследуя модель ветроустановки, можно утверждать, что ее поведение устойчиво относительно любой точки на кривой максимальной мощности, которая приведена на рис. 5. Это означает, что при изменении скорости относительно максимальной точки на кривой мощности

система самостоятельно возвращается вновь к рабочей точке. Принимая во внимание это свойство, делаем вывод, что крутящий момент  $T_t$  может оставаться максимальным на кривой максимальной мощности при изменениях скорости ветра в том случае, если крутящий момент турбины  $T_{em}$  управляется на основе отслеживания этой кривой мощности. Например, ротор, работающий на постоянной частоте, оказывается в точке  $a$  на кривой, показанной на рис. 5. Когда скорость ветра увеличивается с  $V_{v1}$  до  $V_{v2}$ , рабочая точка переходит в точку  $b$ , а крутящий момент турбины становится равным  $T_{t_b}$ . Система отслеживания точки максимальной мощности обеспечивает крутящий момент  $T_{em}$ , соответствующий кривой максимальной мощности (точка  $c$ ), который меньше  $T_{t_b}$ . Исходя из этого, увеличивается скорость турбины до тех пор, пока она не достигнет точки устойчивости (точка  $c$ ) [19-21]. Теоретическое максимальное значение реального коэффициента мощности  $C_p$  находится на уровне  $C_{p\_max} = 0,44 = 44\%$ .

Мощность, представленная в виде кинетической энергии ветра со скоростью  $V_v$  на поверхность площадью  $S$ , определяется следующим образом [22-25]:

$$P_v = \frac{1}{2} \rho S V_v^3, \quad (6)$$

где  $S$  – площадь поверхности.

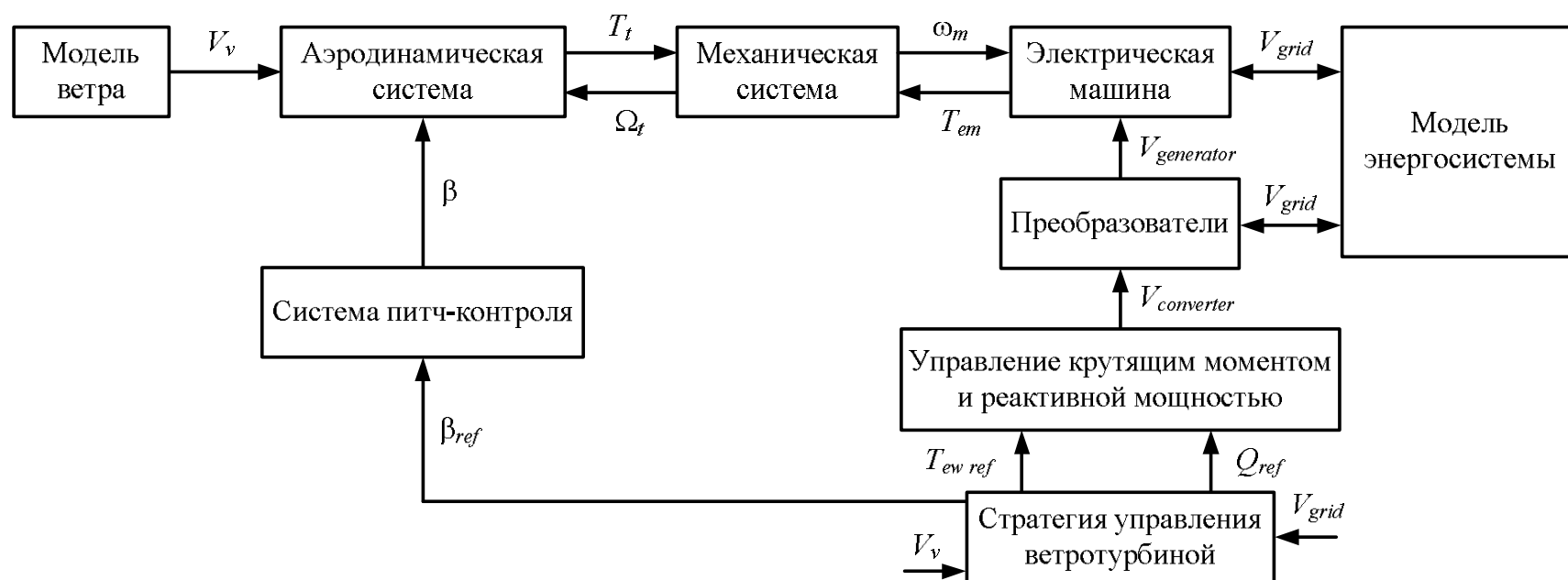


Рис. 3. Блок-схема модели ветроэнергостанции с переменной скоростью ветра

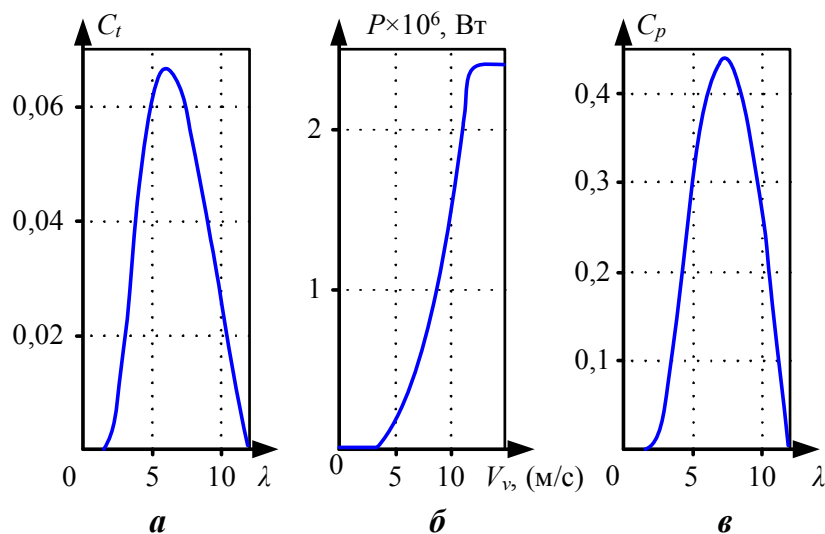


Рис. 4. Графики исследуемых зависимостей:  
а - зависимость коэффициента крутящего момента  $C_t$  по отношению к быстроходности; б - кривая мощности  $P(W)$  в зависимости от скорости ветра  $V_v$ ;  
в - коэффициент использования энергии ветра  $C_p$  в зависимости от быстроходности ветроколеса

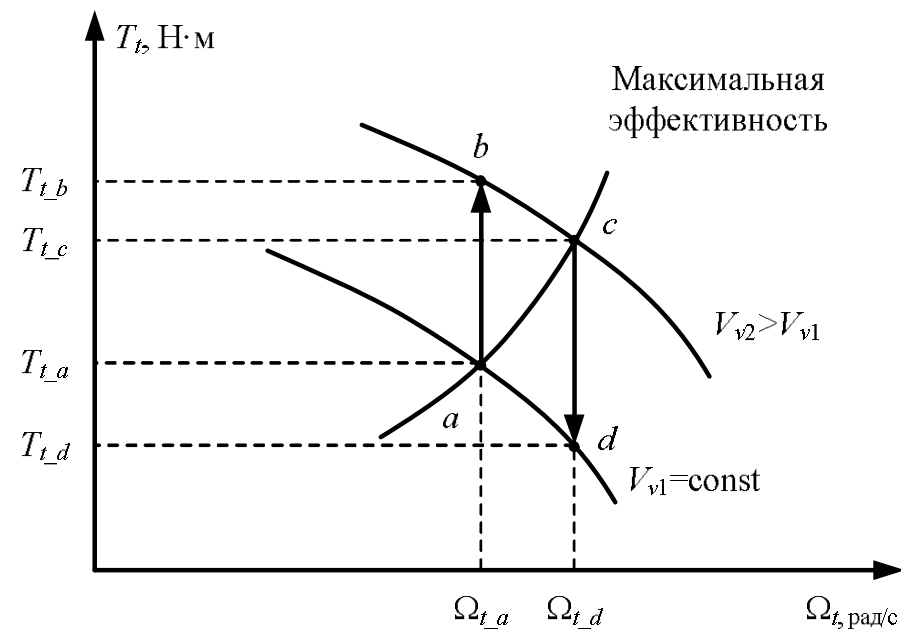


Рис. 5. Исследование устойчивости вокруг точки на кривой максимальной мощности



Ветроэнергостановка может использовать только часть этой мощности:

$$P_t = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V_v^3 C_p. \quad (7)$$

Крутящий момент ротора рассчитывается как отношение мощности к скорости вращения:

$$\begin{aligned} T_t &= \frac{P_t}{\Omega_t} = \frac{\rho \pi R^2 V_v^3}{2 \Omega_t} C_p = \frac{\rho \pi R^3 V_v^2}{2 \lambda} C_p = \\ &= \frac{\rho \pi R^3 V_v^2}{2} C_t. \end{aligned} \quad (8)$$

Коэффициент мощности и коэффициент крутящего момента связаны выражением

$$C_p(\lambda) = \lambda \cdot C_t(\lambda). \quad (9)$$

Когда турбина работает с максимальной мощностью

$$\lambda_{opt} = \frac{R \Omega_t}{V_v}, C_p = C_{p\_max}, C_t = C_{t\_opt}.$$

Крутящий момент турбины выражается как

$$T_t = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 \frac{R^2 \Omega_t^2}{\lambda_{opt}^2} \cdot \frac{C_{p\_max}}{\lambda_{opt}}. \quad (10)$$

Тогда

$$\begin{aligned} T_t &= \frac{1}{2} \rho \pi \frac{R^5}{\lambda_{opt}^3} C_{p\_max} \Omega_t^2 = \\ &= k_{opt\_t} \cdot \Omega_t^2, \end{aligned} \quad (11)$$

где  $k_{opt\_t}$  – оптимальная постоянная, зависящая от типа и размеров ротора ветроколеса,

$$k_{opt\_t} = \frac{1}{2} \rho \pi \frac{R^5}{\lambda_{opt}^3} C_{p\_max}. \quad (12)$$

В зависимости от математической формулы в выражении (12) произведем моделирование системы управления для отслеживания точки максимальной мощности в асинхронном электрогенераторе с помощью регулятора скорости непрямого действия в программе MatLab / Simulink.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для моделирования процессов необходимо знать скорость ветра в м/с, скорость вращения генератора в рад/с, номинальное напряжение статора в вольтах и номинальный ток статора в амперах в качестве входных величин. Скорость ветра напрямую подается в систему из внешнего файла или задается пользователем. Далее можно наблюдать результаты моделирования, поскольку система контролирует скорость ветра и вычисляет относительную скорость на конце лопасти. Значение входной скорости генератора позволяет си-

стеме определить, достигла ли скорость генератора заданного значения. Значения выходного напряжения и тока дают возможность системе вычислить значение выходной мощности. Информация о значении мощности на выходе из системы, а также значение скорости генератора и скорости ветра позволяет системе определить максимальные значения мощности.

Моделирование началось со скорости ветра 8 м/с, после чего скорость была увеличена до 10 м/с, а скорость вращения ротора турбины была принята равной 1800 об / мин, что эквивалентно 188,57 рад/с. В результате моделирования (рис. 6, а), для скорости ветра 8 м/с, была определена величина крутящего момента, которая оказалась равна -5573 Н/м. Также была найдена величина скорости вращения генератора - 136,35 рад/с. Для скорости ветра в 10 м/с (рис. 6, б) крутящий момент должен составлять - 8707 Н/м, а скорость вращения генератора 170,6 рад/с. Для скорости ветра 10 м/с в точке максимальной мощности согласно полученным результатам соответствующая механическая мощность составит -759878,55 Вт (-0,759 МВт) и -1485414 Вт (-1,485 МВт).

На рис. 7, а и б приведены графики напряжения на статоре и тока ротора в установившемся режиме соответственно. График тока статора в установившемся режиме показан на рис. 7, в. В результате можно сделать вывод, что мощность, отображенная преобразователем энергии, вычисляется, а алгоритм успешно определяет точку максимальной мощности системы.

Таким образом, оптимальный коэффициент крутящего момента  $C_t$ , при быстроходности  $\lambda = 7,2$ , равен 0,061, как показано на рис. 8, а. А коэффициент использования энергии ветра  $C_p$  при той же быстроходности равен 0,44 (рис. 8, б).

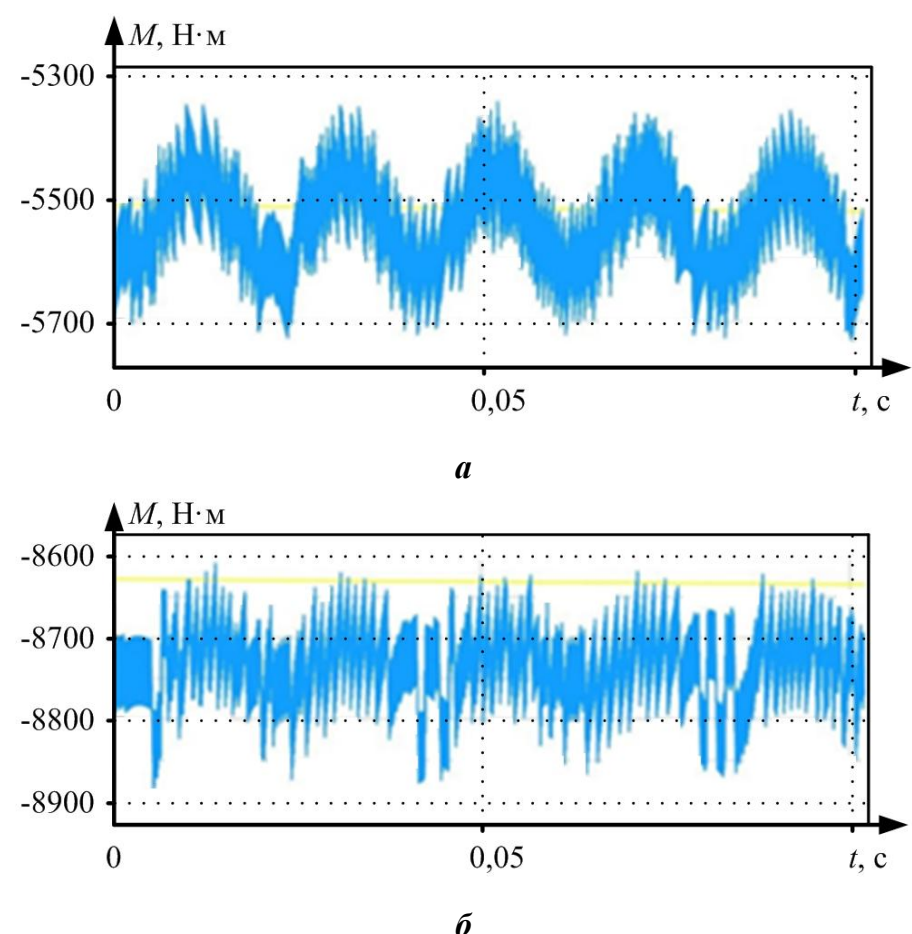


Рис. 6. Результаты моделирования при скорости ветра 8 м/с (а) и 10 м/с (б)

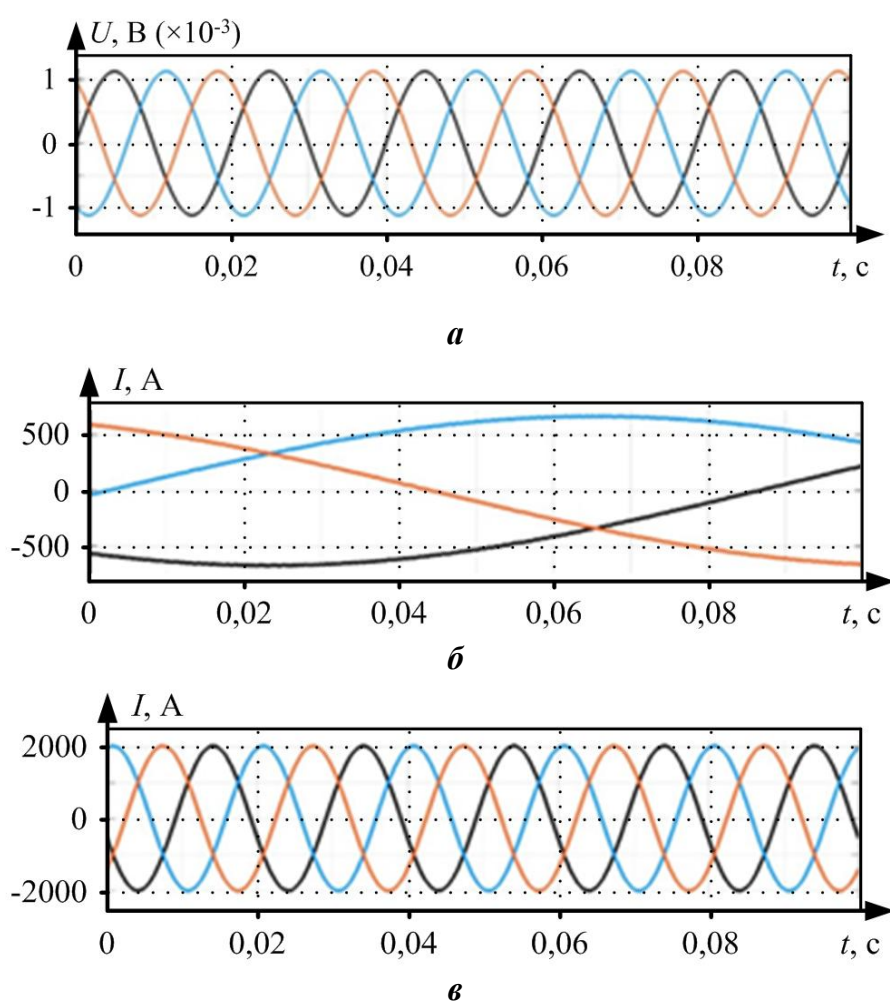


Рис. 7. Характеристики статора и ротора в установившемся режиме: а - напряжение статора; б - ток ротора; в - ток статора

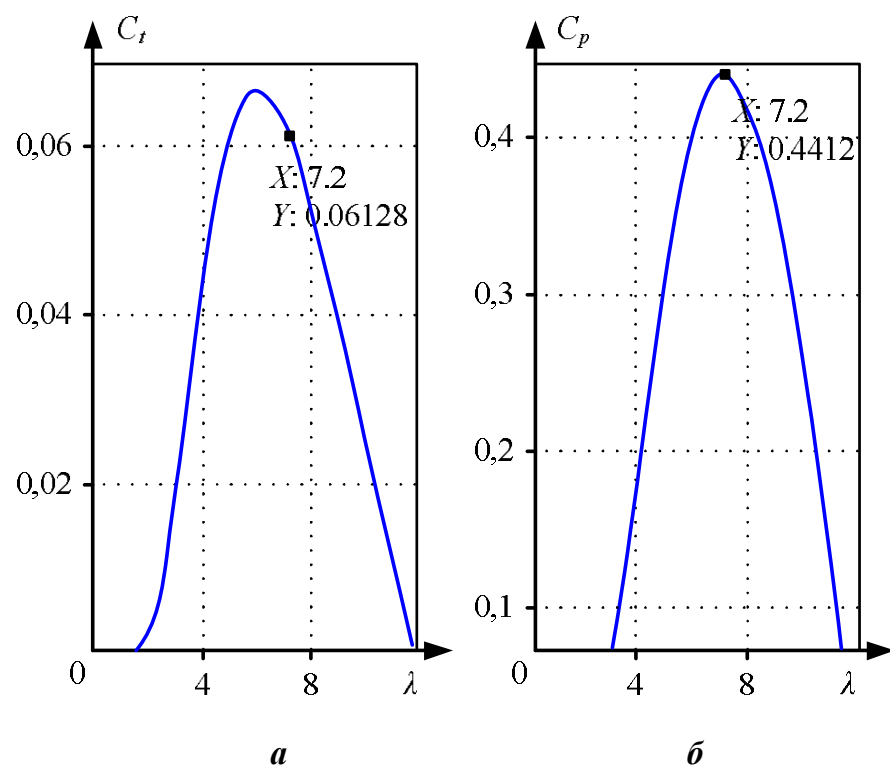


Рис. 8. Определение искомых точек при оптимальной относительной скорости на конце лопасти: а - оптимальный коэффициент крутящего момента; б - максимальный коэффициент мощности

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В связи с непостоянством скорости ветра требуется совершенствование способов отбора мощности ветроэнергетической установкой для максимального использования энергии ветра. Для любой скорости ветра постоянный крутящий момент турбины и постоянная скорость вращения ротора (быстроходность) могут быть получены с использованием предложенной и смоделированной системы управления точкой максимальной мощности и метода непрямого контроля скорости вращения ротора. Разработанный алгоритм создан для максимально возможного повышения эффективности ветроэнергетической системы с использованием памяти контроллера для запоминания и выдачи

оптимальных скоростей турбины, а также для регистрации максимального коэффициента мощности при разных скоростях ветра в условиях его флуктуаций. Еще одним преимуществом этой системы управления является ее простота модифицирования и адаптации для разных ветроэнергоустановок, поскольку она не зависит от характеристик установки.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pena R, Clare J.C., Asher G.M. "Doubly fed induction generator using back-to-back PWM converters and its application to variable-speed wind-energy generation". IEEE Proceedings, 1996, 143(3):231-241 (in Eng.).
2. Gonzalo A., Jesus L., Miguel A.R., Luis M., Grzegorz I. "Doubly Fed Induction Machine". IEEE press, Published by John Wiley & Sons, 2011:31-33 (in Eng.).
3. Abad, G., López, J., Rodríguez, M.A. et al. "Doubly Fed Induction Machine: Modeling and Control for Wind Energy Generation", 2011:289 (in Eng.).
4. Jia Y., Yang Z., Cao B., "A new maximum power point tracking control scheme for wind generation," Proc. Int. Conf. Power Syst. Technol., 2002:144-148(in Eng.).
5. Neammanee B., Krajangpan K., Sirisumrannukul S., Chatratana S., "Maximum peak power tracking-based control algorithms with stall regulation for optimal wind energy capture," Proc. Power Convers. Conf., 2007:1424-1430 (in Eng.).
6. Koutroulis E., Kalaitzakis K., "Design of a maximum power tracking system for wind-energy-conversion applications," IEEE Trans. Ind. Electron., 2006;53(2):486-494 (in Eng.).
7. Wang P., Liu H.Y., Guo C.S., Tao C.B., "MPPT control algorithms for wind power generation based on voltage disturbance," Proc. 7th World Congr. Intell. Control Autom., 2008: 7398-7402 (in Eng.).
8. Fernandez L.M., Garcia C.A., Jurado F., Saenz J.R., "Control system of doubly fed induction generators based wind turbines with production limits," Proc. IEEE Int. Elect. Mach. Drives Conf., 2005:1936-1941(in Eng.).
9. Abo-Khalil A.G., Lee D.C., "MPPT control of wind generation systems based on estimated wind speed using SVR," IEEE Trans. Ind. Electron., 2008;55(3):1489-1490 (in Eng.).
10. Guo P., "Research of a new MPPT strategy based on gray wind speed prediction," Proc. 2nd Int. Symp. Knowl. Acquis. Model., 2009:120-123 (in Eng.).
11. Bianchi F., "Wind turbine control systems: principles, modelling & gain scheduling design", 2006:186 (in Eng.).
12. Kazmierkowski M.P., Krishnan R., Blaaberg F., "Control in Power Electronics Selected Problems, 2002:543 (in Eng.).
13. Blaaberg F., Chen Z., "Power Electronics for Modern Wind Turbines", 2006:511 (in Eng.).
14. Boldea I., Variable Speed Generators, 2006:244 (in Eng.).
15. Wu B., Lang Y., Zargari N., Kouro S. "Power Conversion and Control of Wind Energy Systems", 2011:258 (in Eng.).
16. Sul K. "Control of Electric Machine Drive Systems", 2011:444 (in Eng.).
17. Liu Q., He Y., Zhao R., "The maximal wind-energy tracing control of a variable speed constant frequency wind power generation system". Automation of Electric Power Systems, 2003;27(20):62-67 (in Eng.).
18. Hansen A.D., Iov F., Sørensen P., "Overall control strategy of variable speed doubly-fed induction generator wind turbine". Nordic wind power conference, 2004:113 (in Eng.).
19. Baroudi J.A., Dinavahi V., Knight A.M., "A review of power converter topologies for wind generators," Proc. IEEE Int. Conf. Elect. Mach. Drives, 2005:458-465 (in Eng.).
20. Ben Alaya J., Khedher A., Mimouni M.F. «DTC and Non-Linear Vector Control Strategies applied to the DFIG operated at Variable Speed» WSEAS Transactions On Environment And Development, 2010;11(6):744-754 (in Eng.).



21. Tang Y., Xu L., "A flexible active and reactive power control strategy for a variable speed constant frequency generating system", IEEE Transactions On Power Electronics, 1996;10(4): 472 -478 (in Eng.).
22. Salles M., Cardoso J.R., Grilo A.P., Rahmann C., Hameyer K., "Control strategies of doubly fed induction generators to support grid voltage," IEEE International Conference on Electric Machines and Drives (IEMDC'09). 2009:1551–1556 (in Eng.).
23. Blaabjerg, F., Chen Z., "Power Electronics for Modern Wind Turbines, 2006:294 (in Eng.).
24. Poitiers F., Bouaouiche T., Machmoum M. "Advanced control of a doubly-fed induction generator for wind energy conversion" Electric Power Systems Research 2009;79:1085–1096 (in Eng.).
25. José Fernando Medina Padrón, Andrés Elías Feijóo Lorenzo "Calculating Steady-State Operating Conditions for Doubly-Fed Induction Generator Wind Turbines" IEEE Trans. Power Syst, 2010;25(2):922-928 (in Eng.)

Поступила в редакцию 04 октября 2018 г.

## INFORMATION IN ENGLISH

### CONTROL STRATEGY FOR MAXIMUM POWER POINT TRACKING OF DOUBLY FED INDUCTION MOTOR FOR A WIND TURBINE

Ahmed A. Ibrahim

Post-graduate Student, Department of Electric Stations, Grids and Systems, South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia. E-mail: ahmedd20666@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4352-3544>.

Alexey A. Miroshnichenko

Undergraduate Student, Department of Electric Stations, Grids and Systems, South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia. E-mail: alex.miroshnichenko@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4594-3806>.

Evgeny V. Solomin

D.Sc. (Engineering), Associate Professor, Professor, Department of Electric Stations, Grids and Systems, South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia. E-mail: nii-uralmet@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4694-0490>.

Evgeny M. Gordievsky

Undergraduate Student, Department of Electric Stations, Grids and Systems, South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia. E-mail: gordievskiy@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5049-5900>.

Anton A. Kovalev

Master degree student, Department of making use of Renewable Energy Sources, South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia. E-mail: alpenglowlow305@yandex.ru.

Nowadays wind energy has an important role to participate in generating green and cheap electrical power. The countries increase the wind turbine potential along with the general renewable energy sources development. Scientists and engineers are improving the strategies for optimizing the utilization of this type of energy using different techniques. Doubly fed induction motor (DFIM) becomes the necessary part of wind turbine system generation since its good efficiency of using wind power and controlling of reactive power, so the wind systems are being developed more rapidly because of their advantages as friendly and renewable resources of energy. Due to the wind irregular obtainability, power system principle should be based on the extraction of as much power as possible from the wind. The purpose of this research was to introduce a control strategy for maximum power point tracking (MPPT) for a wind turbine and to study its steady state behaviour by using MATLAB/SIMULINK. This modeling algorithm gave us the possibility for asynchronous machine or alternator to track and follow the path of maximum power extraction and the optimal operation points of the power coefficient curve over different wind circumstances simulating the wind turbine model and studying the steady state condition for the reference value and actual value for the rotor speed, electromagnetic torque, the two components of rotor current, rotor voltage, stator voltage and the value of currents for the rotor side and stator side.

**Keywords:** wind generation, wind turbine model, maximum power point tracking (MPPT), doubly fed induction motor, steady state analysis, indirect speed control mode.

## REFERENCES

1. Pena R, Clare J.C., Asher G.M., "Doubly fed induction generator using back-to-back PWM converters and its application to variable-speed wind-energy generation". IEEE Proceedings, 1996, 143(3):231-241.
2. Gonzalo A., Jesus L., Miguel A.R, Luis M., Grzegorz I., "Doubly Fed Induction Machine". IEEE press, Published by John Wiley & Sons, 2011:31-33.
3. Abad, G., López, J., Rodríguez, M.A. et al., "Doubly Fed Induction Machine: Modeling and Control for Wind Energy Generation", 2011:289.
4. Jia Y., Yang Z., Cao B., "A new maximum power point tracking control scheme for wind generation", Proc. Int. Conf. Power Syst. Technol., 2002:144–148.
5. Neammanee B., Krajangpan K., Sirisumrannukul S., Chatratana S., "Maximum peak power tracking-based control algorithms with stall regulation for optimal wind energy capture," Proc. Power Convers. Conf., 2007:1424–1430.
6. Koutroulis E., Kalaitzakis K., "Design of a maximum power tracking system for wind-energy-conversion applications", IEEE Trans. Ind. Electron., 2006;53(2):486–494.
7. Wang P., Liu H.Y., Guo C.S., Tao C.B., "MPPT control algorithms for wind power generation based on voltage disturbance", Proc. 7th World Congr. Intell. Control Autom., 2008: 7398–7402.
8. Fernandez L. M., Garcia C. A., Jurado F., Saenz J. R., "Control system of doubly fed induction generators based wind turbines with production limits", Proc. IEEE Int. Elect. Mach. Drives Conf., 2005:1936–1941.

9. Abo-Khalil A.G., Lee D.C., "MPPT control of wind generation systems based on estimated wind speed using SVR", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 2008;55(3):1489–1490.
10. Guo P., "Research of a new MPPT strategy based on gray wind speed prediction", *Proc. 2nd Int. Symp. Knowl. Acquis. Model.*, 2009:120–123.
11. Bianchi F., "Wind turbine control systems: principles, modelling & gain scheduling design", 2006:186.
12. Kazmierkowski M.P., Krishnan R., Blaaberg F., "Control in Power Electronics Selected Problems", 2002:543.
13. Blaaberg F., Chen Z., "Power Electronics for Modern Wind Turbines", 2006:511.
14. Boldea I., "Variable Speed Generators", 2006:244.
15. Wu B., Lang Y., Zargari N., Kouro S., "Power Conversion and Control of Wind Energy Systems", 2011:258.
16. Sul K. "Control of Electric Machine Drive Systems", 2011:444.
17. Liu Q., He Y., Zhao R., "The maximal wind-energy tracing control of a variable speed constant frequency wind power generation system". *Automation of Electric Power Systems*, 2003;27(20):62-67.
18. Hansen A.D, Iov F., Sørensen P., "Overall control strategy of variable speed doubly-fed induction generator wind turbine". *Nordic wind power conference*, 2004:113.
19. Baroudi J.A., Dinavahi V., Knight A. M., "A review of power converter topologies for wind generators", *Proc. IEEE Int. Conf. Elect. Mach. Drives*, 2005:458–465.
20. Ben Alaya J., Khedher A., Mimouni M.F., "DTC and Non-Linear Vector Control Strategies applied to the DFIG operated at Variable Speed", *WSEAS Transactions On Environment And Development*, 2010;11(6):744-754.
21. Tang Y., Xu L., "A flexible active and reactive power control strategy for a variable speed constant frequency generating system", *IEEE Transactions On Power Electronics*, 1996;10(4): 472 -478.
22. Salles M., Cardoso J.R., Grilo A.P., Rahmann C., Hameyer K., "Control strategies of doubly fed induction generators to support grid voltage", *IEEE International Conference on Electric Machines and Drives (IEMDC'09)*. 2009:1551–1556.
23. Blaabjerg, F., Chen Z., "Power Electronics for Modern Wind Turbines", 2006:294.
24. Poitiers F., Bouaouiche T., Machmoum M., "Advanced control of a doubly-fed induction generator for wind energy conversion", *Electric Power Systems Research* 2009;79:1085–1096.
25. José Fernando Medina Padrón, Andrés Elías Feijóo Lorenzo, "Calculating Steady-State Operating Conditions for Doubly-Fed Induction Generator Wind Turbines", *IEEE Trans. Power Syst*, 2010;25(2):922-928.

Ибрагим А., Мирошниченко А.А., Соломин Е.В., Гордиевский Е.М., Ковалев А.А. Стратегия управления на основе отслеживания точки максимальной мощности асинхронного генератора двойного питания ветроэнергетической установки // *Электротехнические системы и комплексы*. 2018. № 4(41). С. 56-62. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-4\(41\)-56-62](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-4(41)-56-62)

Ibrahim A., Miroshnichenko A.A., Solomin E.V., Gordievsky E.M., Kovalev A.A. Control Strategy for Maximum Power Point Tracking of Doubly Fed Induction Motor for a Wind Turbine. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2018, no. 4(41), pp. 56-62. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-4\(41\)-56-62](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-4(41)-56-62)





## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГАРМОНИЧЕСКОГО СОСТАВА ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ ДУГ МОЩНОЙ ДУГОВОЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ ШАХТНОГО ТИПА

В рамках данной работы, на основании экспериментально полученных сигналов мгновенных значений фазного напряжения и тока электрической дуги в трёхфазной дуговой сталеплавильной печи (ДСП) шахтного типа ШП-125, с помощью разработанной математической модели были рассчитаны сигналы мгновенных значений напряжений электрических дуг на начальной стадии плавления шихты с использованием заранее известных параметров схемы замещения электрического контура. Полученные данные позволили произвести сравнительный анализ изменения гармонического состава сигналов тока и напряжения электрической дуги, который включал в себя анализ относительных действующих значений суммарных, чётных и нечётных гармоник. В результате было показано, что гармонический состав сигнала напряжения электрической дуги в меньшей мере подвержен влиянию возмущающих воздействий в виде мгновенного изменения длины дуги, а также возникающих несимметричных режимов по сравнению с гармоническим составом тока дуги. Данный вывод говорит о том, что анализ гармонического состава сигнала напряжения дуги может эффективно применяться в системах автоматического управления электрическим режимом ДСП для решения задач диагностики стадии плавления шихты на начальных этапах плавки, обеспечивая повышение энергетической эффективности сталеплавильного комплекса. При этом в середине и конце плавки, когда влияние возмущающих воздействий снижено, методики диагностики стадии плавления шихты по высшим гармоникам токов и напряжений дуг эффективны практически в равной мере, вследствие чего ресурсоёмкий расчёт мгновенных значений напряжений дуг становится нецелесообразным.

**Ключевые слова:** дуговая сталеплавильная печь, электрическая дуга, преобразование Фурье, анализ гармонического состава, диагностика стадии плавки.

### ВВЕДЕНИЕ

За последние несколько десятилетий в металлургической промышленности при производстве жидкой стали широкое распространение получили дуговые сталеплавильные печи (ДСП) и установки ковш-печь (УКП). Несмотря на ряд преимуществ, которые предоставляет производителю технология выплавки стали в ДСП с последующей внепечной обработкой расплава в УКП, существует ряд технико-экономических издержек, связанных с высоким энергопотреблением ДСП-УКП как электротехнических комплексов. Вследствие устойчивой тенденции роста объёма выплавки и удельной мощности печного трансформатора (для современных ДСП – около 0,75–1 МВт/т) особую актуальность приобрела задача повышения эффективности работы печи путём выявления существующих энергетических резервов.

Одним из путей решения данной задачи является разработка новых методик диагностики стадии плавления шихты, что позволит адекватно оценивать технологические процессы, протекающие в ванне печи в режиме реального времени, что, в свою очередь, обеспечит возможность выбора наиболее оптимального электрического режима работы установки, направленного на обеспечение максимальной производительности при оптимальных энергозатратах.

Отметим, что подавляющее большинство систем управления электрическим режимом ДСП и УКП, таких как Arcos, Simelt (Primetals Technologies, Великобритания), Hireg (Danieli, Италия), E.M.P.E.R.E (Amec

Spie, Франция) и др., в качестве критерия перехода с одной стадии плавления шихты на другую используют показатель удельного расхода электроэнергии  $W_{уд}$  [кВт·ч/т]. Тем не менее величины критических значений  $W_{уд,кр.N}$  [кВт·ч/т], при достижении которых определённый технологический этап плавления шихты считается пройденным, определяются по средним показателям для всех плавов и не учитывают индивидуальных особенностей каждой плавки в отдельности.

В рамках данной статьи выполняется экспериментальное исследование гармонического состава токов и напряжений электрических дуг, оценивается характер их изменения, а также делается вывод о возможности повышения точности диагностики стадии плавки с использованием информации о гармоническом составе напряжений дуг. В качестве объекта исследования выступает шахтная дуговая сталеплавильная печь ШП-125 с технологией предварительного подогрева шихты отводимыми газами.

### ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ МЕТОДЫ

В современных исследованиях одним из наиболее практически применимых математических представлений электрической дуги является дифференциальное уравнение мгновенной проводимости электрической дуги (уравнение Касси) [1]:

$$\theta_d \frac{dg_d(t)}{dt} = \left( \frac{u_d^2(t)}{E_d^2} - 1 \right) g_d(t), \quad (1)$$

где  $\theta_d$  – тепловая постоянная времени дуги;  $g_d(t)$  – мгновенное значение проводимости дуги;  $u_d(t)$  – мгновенное значение напряжения дуги;  $E_d$  – ЭДС дуги.

В свою очередь, ЭДС дуги рассчитывается в соответствии со следующей формулой:

$$E_d = \alpha + \beta L_d, \quad (2)$$

где  $\alpha$  – падение напряжения в приэлектродных областях (принимается равным 40 В);  $\beta$  – градиент напряжения дугового столба (принимается равным 1 В/мм);  $L_d$  – длина электрической дуги в миллиметрах.

В рамках исследования [2] обосновано, что  $\theta_d$  является параметром, который напрямую связан со стадией плавления шихты. Так, на начальной стадии плавки величина  $\theta_d$  находится в диапазоне 800-1000 мкс, в середине плавки – 1000-2500 мкс, а на конечной стадии, после образования расплава и экранирования дуг вспененным шлаком – 2500-3500 мкс. Очевидно, что величина  $\theta_d$  не может быть измерена напрямую. О её величине можно судить исходя из гармонического состава сигналов тока  $i_d(t)$  и напряжения электрической дуги  $u_d(t)$ . Так, чем больше величина  $\theta_d$  – тем ближе форма кривых  $i_d(t)$  и  $u_d(t)$  к синусоидальной, и, соответственно, тем меньше доля высших гармонических составляющих в их составе, определяемая таким параметром, как суммарный коэффициент гармонических искажений тока и напряжения дуги  $K_U$ ,  $K_I$  (THD<sub>U</sub>, THD<sub>I</sub>):

$$K_{Id} = \frac{\sqrt{I_{d(0)}^2 + \sum_{i=2}^n I_{d(n)}^2}}{I_{d(1)}} \cdot 100\%, \quad (3)$$

где  $K_{Id}$  – суммарный коэффициент гармонических искажений сигнала тока дуги;  $I_{d(n)}$  – действующее значение  $n$ -й гармоники в составе сигнала тока дуги;  $I_{d(1)}$  – действующее значение первой гармоники в составе сигнала тока дуги;

$$K_{Ud} = \frac{\sqrt{U_{d(0)}^2 + \sum_{i=2}^n U_{d(n)}^2}}{U_{d(1)}} \cdot 100\%, \quad (4)$$

где  $K_{Ud}$  – суммарный коэффициент гармонических искажений сигнала напряжения дуги;  $U_{d(n)}$  – действующее значение  $n$ -й гармоники в составе сигнала напряжения дуги;  $U_{d(1)}$  – действующее значение первой гармоники в составе сигнала напряжения дуги.

Тем не менее исследование [2] также доказывает, что на величину THD тока и напряжения электрической дуги, помимо тепловой постоянной времени  $\Theta_d$ , оказывают влияние такие параметры, как длина электрической дуги  $L_d$ , коэффициент несимметрии токов  $K_{2I}$ , а также коэффициент вентильного эффекта  $K_{VA}$ . Коэффициент несимметрии токов рассчитывается по следующей формуле:

$$K_{2I} = \frac{I_{d2}}{I_{d1}} \cdot 100\%, \quad (5)$$

где  $I_{d2}$  – действующее значение обратной последовательности тока электрической дуги;  $I_{d1}$  – действующее

значение прямой последовательности тока электрической дуги.

Несимметрия токов по трём фазам ДСП может быть вызвана как возмущающими воздействиями в процессе плавки, так и заранее предопределённым электрическим режимом работы печи, что подробно рассмотрено в работе [3].

В свою очередь, коэффициент вентильного эффекта  $K_{VA}$  определяется следующим выражением:

$$K_{VA} = \frac{E_{d+}}{E_{d-}} \cdot 100\%, \quad (6)$$

где  $E_{d+}$  – величина ЭДС электрической дуги в период прохождения положительной полуволны  $i_d(t)$ ;  $E_{d-}$  – величина ЭДС электрической дуги в период прохождения отрицательной полуволны  $i_d(t)$ .

Отметим, что на практике рассчитать  $K_{VA}$  с высокой точностью достаточно сложно, поскольку в период прохождения положительной и отрицательной полуволны тока должно соблюдаться условие  $L_d = \text{const}$ , что в условиях плавки осложняется высокочастотными возмущающими воздействиями в виде мгновенного изменения длины электрической дуги  $\Delta L_d$  [4].

В работах [2, 5] на математической модели дуговой сталеплавильной печи доказывается, что сигнал  $KU_d$  в меньшей мере подвержен влиянию  $L_d$ ,  $K_{VA}$  и  $K_{2I}$  по сравнению с сигналом  $K_{Id}$ . Вследствие этого анализ гармонического состава сигнала напряжения дуги может быть использован для разработки принципиально нового критерия перехода с одного сочетания ступени печного трансформатора, реактора и номера рабочей кривой на другое в системах управления электрическим режимом работы ДСП второго уровня. Несмотря на высокую адекватность математической модели, данное утверждение необходимо подтвердить экспериментально, что является главной целью данного исследования.

Для решения поставленной в рамках исследования задачи с помощью многоканального регистратора электрических сигналов РЭСЗ были получены сигналы мгновенного значения тока дуги  $i_d(t)$  и фазного напряжения  $U_{2\phi}(t)$  на вторичной стороне печного трансформатора для трёх фаз ШП-125 на протяжении нескольких плавов. При этом сигнал мгновенного значения напряжения дуги вычисляется косвенно в соответствии со следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} u_{dA}(t) = u_{2\phi A}(t) - i_{dA}(t)R_{KCA} - \\ - L_{KCA} \frac{di_{dA}(t)}{dt} + (M_{CA} - M_{AB}) \frac{di_{dA}(t)}{dt}, \\ u_{dB}(t) = u_{2\phi B}(t) - i_{dB}(t)R_{KCB} - \\ - L_{KCB} \frac{di_{dB}(t)}{dt} - (M_{AB} + M_{BC}) \frac{di_{dB}(t)}{dt}, \\ u_{dC}(t) = u_{2\phi C}(t) - i_{dC}(t)R_{KCC} - \\ - L_{KCC} \frac{di_{dC}(t)}{dt} - (M_{CA} + M_{BC}) \frac{di_{dC}(t)}{dt}, \end{cases} \quad (7)$$

где  $R_{KCA,B,C}$  – величина активного сопротивления участка короткой сети для каждой из трёх фаз;  $L_{KCA,B,C}$  – величина индуктивности участка короткой сети для каждой из трёх фаз;  $M_{AB}, M_{BC}, M_{CA}$  – взаимная индуктивность между фазами.

Отметим, что выражение (7) приведено для случая, когда замеры фазного напряжения производились на вторичной стороне печного трансформатора.

Особый интерес в рамках данной работы представляет начальная стадия плавления шихты, для которой характерны частые обрывы электрической дуги ввиду сильных возмущающих воздействий и нестабильного режима горения дуг, а также сильная несимметрия токов. На **рис. 1** представлены осциллограммы действующего значения тока электрической дуги, фазного напряжения и напряжения дуги для каждой из трёх фаз, соответствующие первым 12 минутам с начала плавления шихты.

Отметим, что с практической точки зрения, в отличие от математической модели, параметры  $K_U, K_I$  ( $THD_U, THD_I$ ) для оценки гармонического состава сигналов тока и напряжения дуги на начальной стадии плавки являются неудобными, поскольку в мо-

менты обрывов дуг возникают всплески сигнала, обусловленные наличием помехи, фиксируемой измерительным комплексом. Вследствие этого в данной работе для сравнительного анализа гармонического состава сигналов тока и напряжения дуги, по аналогии с исследованием [6], будут использованы следующие параметры:

1. Относительное действующее значение суммарного тока высших гармоник тока и напряжения дуги:

$$I'_{Д.ВГ\Sigma} = \frac{\sqrt{I_D^2 - I_{Д(1)}^2}}{I_H} \cdot 100\%, \quad (8)$$

$$U'_{Д.ВГ\Sigma} = \frac{\sqrt{U_D^2 - U_{Д(1)}^2}}{U_{2ФН}} \cdot 100\%, \quad (9)$$

где  $I_D, U_D$  – действующее значение тока и напряжения дуги;  $I_{Д(1)}, U_{Д(1)}$  – действующее значение первой гармоники тока и напряжения дуги;  $I_H, U_{2ФН}$  – номинальное значение тока и фазного напряжения печного трансформатора ДСП (УКП).

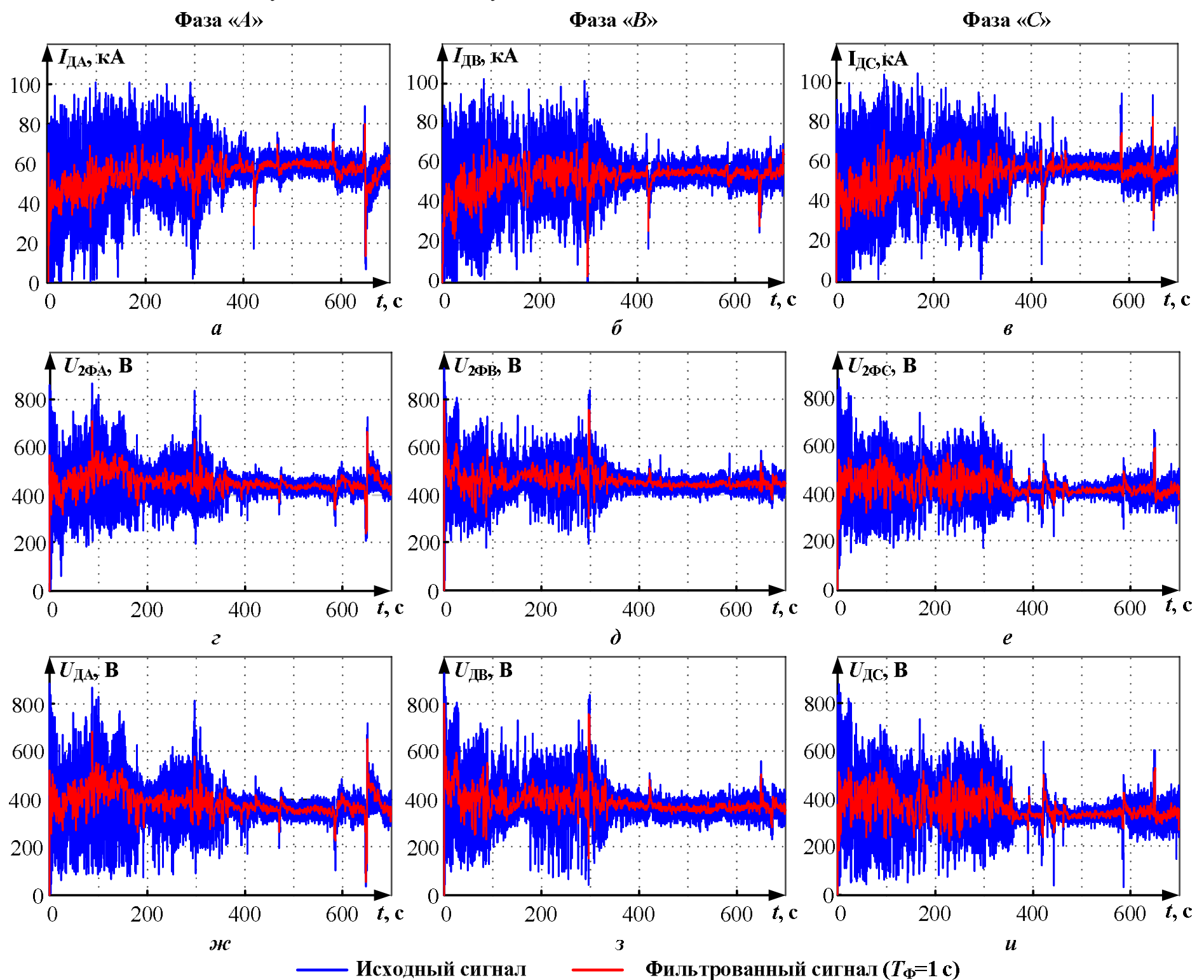


Рис. 1. Графики действующих значений сигналов на протяжении первых 12 минут плавки: а, б, в – токи электрической дуги  $i_D$  в фазах «А», «В» и «С»; г, д, е – фазные напряжения в фазах «А», «В» и «С»; ж, з, и – напряжения в фазах «А», «В» и «С» для исходной частоты дискретизации 2 кГц и после применения фильтра скользящей средней с  $T_\Phi=1$  с

2. Относительное действующее значение суммарных чётных гармоник тока и напряжения дуги:

$$I'_{Д.ВГ.ЧЕТ\Sigma} = \frac{\sqrt{I_{Д(0)}^2 + I_{Д(2)}^2 + I_{Д(4)}^2 + I_{Д(6)}^2 + I_{Д(8)}^2 + I_{Д(10)}^2}}{I_H} \times (10)$$

$\times 100\%$ ,

$$U'_{Д.ВГ.ЧЕТ\Sigma} = \frac{\sqrt{U_{Д(0)}^2 + U_{Д(2)}^2 + U_{Д(4)}^2 + U_{Д(6)}^2 + U_{Д(8)}^2 + U_{Д(10)}^2}}{U_{2ФН}} \times (11)$$

$\times 100\%$ ,

где  $I_{Д(0)}$ ,  $I_{Д(2)}$ ,  $I_{Д(4)}$ ,  $I_{Д(6)}$ ,  $I_{Д(8)}$ ,  $I_{Д(10)}$  – действующие значения 0, 2, 4, 6, 8 и 10-й гармоник тока электрической дуги соответственно;  $U_{Д(0)}$ ,  $U_{Д(2)}$ ,  $U_{Д(4)}$ ,  $U_{Д(6)}$ ,  $U_{Д(8)}$ ,  $U_{Д(10)}$  – действующие значения 0, 2, 4, 6, 8 и 10-й гармоник напряжения электрической дуги соответственно;  $I_H$  – номинальный ток печного трансформатора на текущей ступени РПН;  $U_{2ФН}$  – номинальное фазное напряжение печного трансформатора на текущей ступени РПН.

3. Относительное действующее значение суммарных чётных гармоник тока и напряжения дуги:

$$I'_{Д.ВГ.НЕЧЕТ\Sigma} = \frac{\sqrt{I_{Д(3)}^2 + I_{Д(5)}^2 + I_{Д(7)}^2 + I_{Д(9)}^2}}{I_H} \cdot 100\%, (12)$$

$$U'_{Д.ВГ.НЕЧЕТ\Sigma} = \frac{\sqrt{U_{Д(3)}^2 + U_{Д(5)}^2 + U_{Д(7)}^2 + U_{Д(9)}^2}}{U_{2ФН}} \cdot 100\%, (13)$$

где  $I_{Д(3)}$ ,  $I_{Д(5)}$ ,  $I_{Д(7)}$ ,  $I_{Д(9)}$  – действующие значения 3, 5, 7 и 9-й гармоник тока электрической дуги соответственно;  $U_{Д(3)}$ ,  $U_{Д(5)}$ ,  $U_{Д(7)}$ ,  $U_{Д(9)}$  – действующие значения 3, 5, 7 и 9-й гармоник напряжения электрической дуги соответственно.

На рис. 2 представлена функциональная схема алгоритма расчёта относительного действующего значения суммарного тока чётных и нечётных гармоник тока и напряжения электрической дуги на основании экспериментально полученных сигналов фазного напряжения и тока электрической дуги.

Отметим, что в данной функциональной схеме принято в качестве допущения, что взаимные индуктивности между фазами  $M_{AB}$ ,  $M_{BC}$ ,  $M_{CA}$  равны нулю.

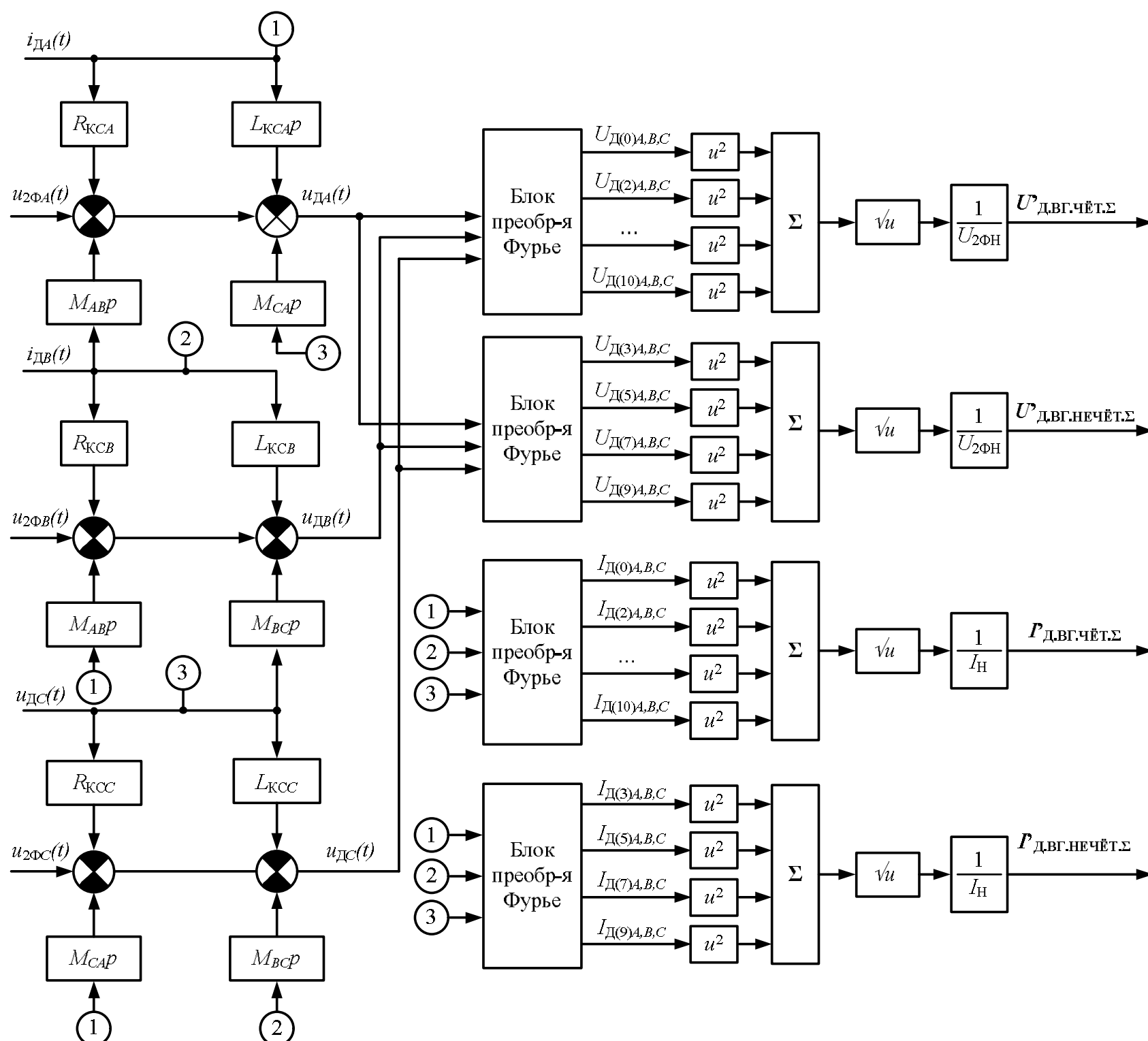


Рис. 2. Функциональная схема алгоритма расчёта относительного действующего значения суммарного тока чётных и нечётных гармоник тока и напряжения электрической дуги



# РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

С помощью функциональной схемы, представленной на **рис. 2**, были получены графики относительных действующих значений суммарных чётных и нечётных гармоник тока и напряжения дуги, а также графики относительного действующего значения суммарных высших гармоник тока и напряжения дуги (**рис. 3–5**).

Визуальный анализ графиков показывает, что скорость уменьшения величины относительного действующего значения суммарных чётных гармоник, как тока, так и напряжения дуги, значительно выше, чем скорость уменьшения относительного действующего значения нечётных гармоник, что подтверждает выводы, сделанные в исследовании [6].

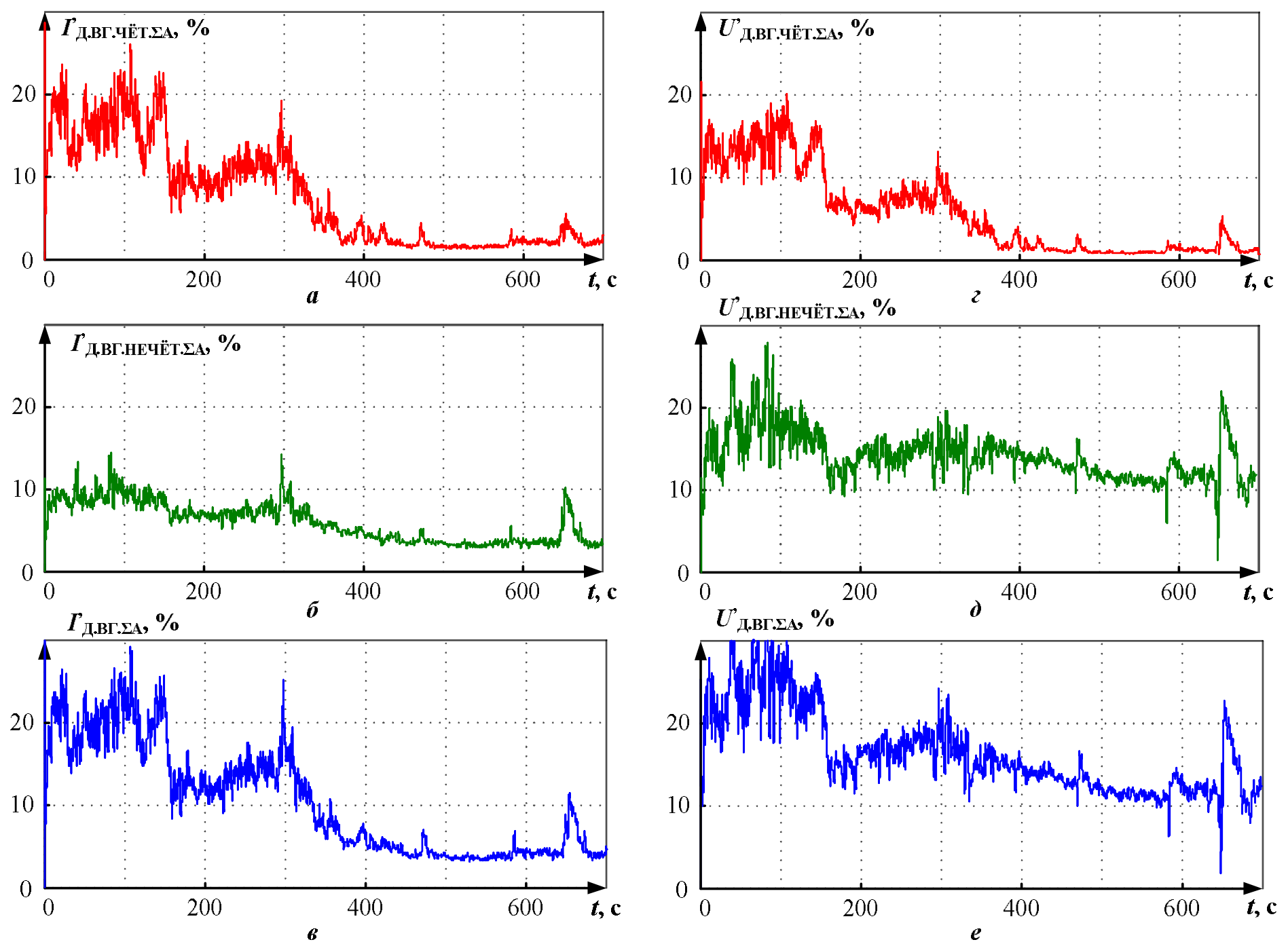
Отметим, что диагностика стадии плавки по величине относительного действующего значения суммарного тока чётных и нечётных гармоник тока дуги лежит в основе функционирования системы управления электрическим режимом, разработанной в рамках патента на полезную модель [7].

Кроме того, характер изменения гармонического состава тока и напряжения дуги имеет общий тренд, что обусловлено общей физической природой, порождающей гармонические искажения сигналов [8-10].

Несмотря на то, что связь между гармоническим составом сигнала тока и напряжения дуги и стадией плавления шихты подтверждается исследованиями [2-8], для их применения в качестве критерия перехода с одного сочетания ступени печного трансформатора, реактора и номера рабочей кривой на другое важным условием является устойчивость параметра к возмущающим воздействиям, характер возникновения которых подробно рассмотрен ранее.

Таким образом, для оценки степени влияния возмущающих воздействий на гармонический состав сигналов тока и напряжения электрической дуги был проведён статистический анализ, результаты которого представлены в **таблице**.

При проведении статистического анализа исследуемый интервал был условно разделён на два временных промежутка: от 0 до 350 с, для которого характерны наиболее сильные колебания относительных действующих значений гармоник тока и напряжения дуги, обусловленные активным расплавлением шихты, и от 350 до 700 с, что соответствует более стабильному режиму горения дуг и значительно меньшим колебаниям гармонического состава.



**Рис. 3. Графики относительных действующих значений чётных, нечётных и суммарных гармоник (использован фильтр скользящей средней, постоянная времени фильтра  $T_{\Phi}=1$  с):  
а, б, в – тока электрической дуги; г, д, е – напряжения электрической дуги в фазе «А»**

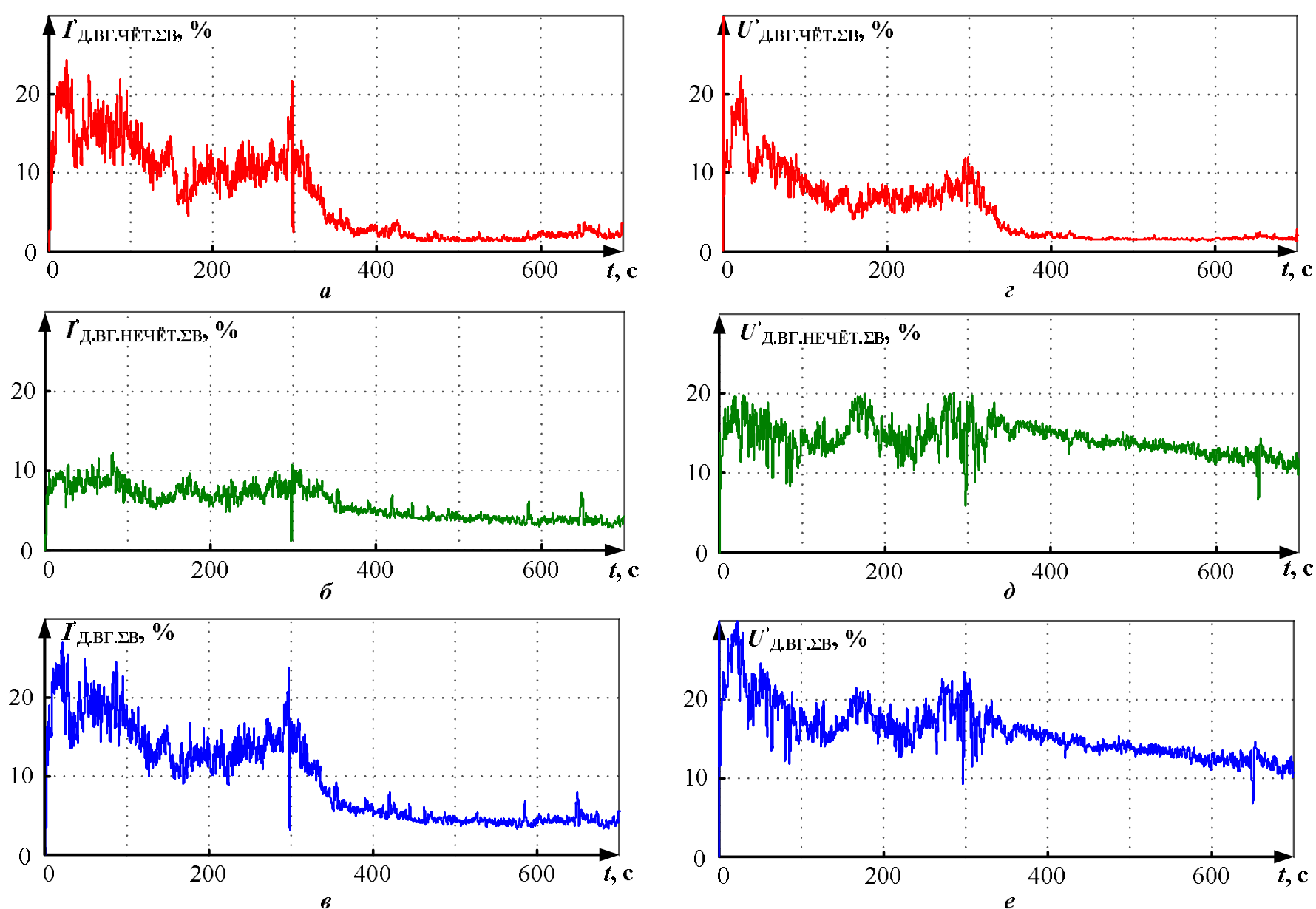


Рис. 4. Графики относительных действующих значений чётных, нечётных и суммарных гармоник (использован фильтр скользящей средней, постоянная времени фильтра  $T_{\Phi}=1$  с):  
а, б, в – тока электрической дуги; г, д, е – напряжения электрической дуги в фазе «В»

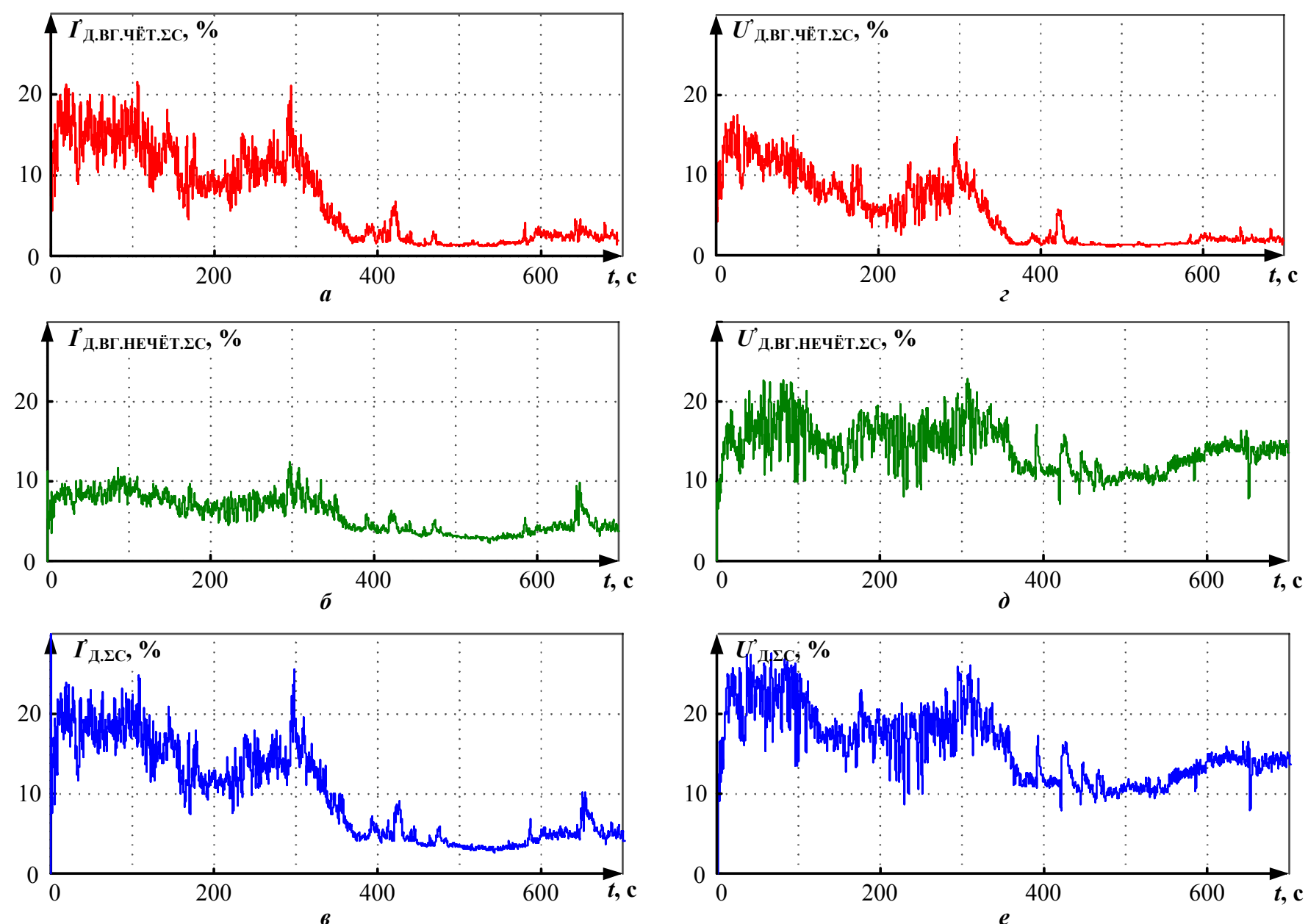


Рис. 5. Графики относительных действующих значений чётных, нечётных и суммарных гармоник:  
а, б, в – тока электрической дуги; г, д, е – напряжения электрической дуги в фазе «С»

Статистический анализ гармонического состава сигналов тока и напряжения электрической дуги

| Сигнал                                                          | Математическое<br>ожидание $\bar{X}$ |             |             | Стандартное<br>отклонение $\sigma$ |             |             | Коэффициент<br>вариации $K_B$ |       |       | $K_{B,CP}$ | $\delta K_{B,CP}$ |  |  |
|-----------------------------------------------------------------|--------------------------------------|-------------|-------------|------------------------------------|-------------|-------------|-------------------------------|-------|-------|------------|-------------------|--|--|
|                                                                 | A                                    | B           | C           | A                                  | B           | C           | A                             | B     | C     |            |                   |  |  |
| t=0...350 с                                                     |                                      |             |             |                                    |             |             |                               |       |       |            |                   |  |  |
| Действующие значения:                                           |                                      |             |             |                                    |             |             |                               |       |       |            |                   |  |  |
| Тока дуги $I_d$                                                 | 52,60<br>кА                          | 50,51<br>кА | 51,46<br>кА | 13,4<br>кА                         | 14,31<br>кА | 14,34<br>кА | 0,25                          | 0,28  | 0,28  | 0,27       | 10<br>%           |  |  |
| Напряжения дуги $U_d$                                           | 405,05<br>В                          | 405,82<br>В | 385,65<br>В | 95,78<br>В                         | 94,88<br>В  | 101,67<br>В | 0,24                          | 0,23  | 0,26  | 0,243      |                   |  |  |
| Относительное действующее значение суммарных чётных гармоник:   |                                      |             |             |                                    |             |             |                               |       |       |            |                   |  |  |
| Тока дуги $I_d$                                                 | 12,88<br>%                           | 11,58<br>%  | 11,86<br>%  | 8,8<br>%                           | 7,96<br>%   | 8,06<br>%   | 0,68                          | 0,69  | 0,67  | 0,68       | 16,18<br>%        |  |  |
| Напряжения дуги $U_d$                                           | 9,8<br>%                             | 8,19<br>%   | 8,77<br>%   | 5,7<br>%                           | 4,78<br>%   | 4,89<br>%   | 0,58                          | 0,58  | 0,55  | 0,57       |                   |  |  |
| Относительное действующее значение суммарных нечётных гармоник: |                                      |             |             |                                    |             |             |                               |       |       |            |                   |  |  |
| Тока дуги $I_d$                                                 | 7,93<br>%                            | 7,47<br>%   | 7,63<br>%   | 3,21<br>%                          | 2,92<br>%   | 2,92<br>%   | 0,4                           | 0,39  | 0,38  | 0,39       | 15,38<br>%        |  |  |
| Напряжения дуги $U_d$                                           | 15,48<br>%                           | 14,93<br>%  | 15,68<br>%  | 5,49<br>%                          | 4,35<br>%   | 4,96<br>%   | 0,35                          | 0,36  | 0,31  | 0,33       |                   |  |  |
| Относительное действующее значение суммарных гармоник:          |                                      |             |             |                                    |             |             |                               |       |       |            |                   |  |  |
| Тока дуги $I_d$                                                 | 15,99<br>%                           | 14,61<br>%  | 14,93<br>%  | 8,39<br>%                          | 7,51<br>%   | 7,59<br>%   | 0,52                          | 0,51  | 0,51  | 0,513      | 57,12<br>%        |  |  |
| Напряжения дуги $U_d$                                           | 19,64<br>%                           | 18,18<br>%  | 19,14<br>%  | 4,66<br>%                          | 3,64<br>%   | 4,09<br>%   | 0,24                          | 0,2   | 0,21  | 0,22       |                   |  |  |
| t=350...700 с                                                   |                                      |             |             |                                    |             |             |                               |       |       |            |                   |  |  |
| Действующие значения:                                           |                                      |             |             |                                    |             |             |                               |       |       |            |                   |  |  |
| Тока дуги $I_d$                                                 | 56,91<br>кА                          | 54,09<br>кА | 56,25<br>кА | 6,17<br>кА                         | 4,65<br>кА  | 5,34<br>кА  | 0,1                           | 0,086 | 0,095 | 0,094      | -12,8<br>%        |  |  |
| Напряжения дуги $U_d$                                           | 365,91<br>В                          | 367,31<br>В | 338,06<br>В | 46,76<br>В                         | 28,56<br>В  | 36,75<br>В  | 0,13                          | 0,078 | 0,11  | 0,106      |                   |  |  |
| Относительное действующее значение суммарных чётных гармоник:   |                                      |             |             |                                    |             |             |                               |       |       |            |                   |  |  |
| Тока дуги $I_d$                                                 | 2,23<br>%                            | 1,98<br>%   | 2,083<br>%  | 1,73<br>%                          | 1,31<br>%   | 1,67<br>%   | 0,76                          | 0,66  | 0,8   | 0,74       | 17,57<br>%        |  |  |
| Напряжения дуги $U_d$                                           | 1,97<br>%                            | 2,083<br>%  | 1,48<br>%   | 1,18<br>%                          | 0,603<br>%  | 1,011<br>%  | 0,6                           | 0,57  | 0,68  | 0,61       |                   |  |  |
| Относительное действующее значение суммарных нечётных гармоник: |                                      |             |             |                                    |             |             |                               |       |       |            |                   |  |  |
| Тока дуги $I_d$                                                 | 3,91<br>%                            | 4,09<br>%   | 3,92<br>%   | 1,33<br>%                          | 0,99<br>%   | 1,29<br>%   | 0,34                          | 0,24  | 0,33  | 0,303      | 42,57<br>%        |  |  |
| Напряжения дуги $U_d$                                           | 12,66<br>%                           | 13,34<br>%  | 12,2<br>%   | 2,57<br>%                          | 1,84<br>%   | 2,2<br>%    | 0,203                         | 0,14  | 0,18  | 0,174      |                   |  |  |
| Относительное действующее значение суммарных гармоник:          |                                      |             |             |                                    |             |             |                               |       |       |            |                   |  |  |
| Тока дуги $I_d$                                                 | 4,69<br>%                            | 4,7<br>%    | 4,6<br>%    | 1,88<br>%                          | 1,29<br>%   | 1,81<br>%   | 0,401                         | 0,275 | 0,39  | 0,36       | 52,78<br>%        |  |  |
| Напряжения дуги $U_d$                                           | 12,84<br>%                           | 13,47<br>%  | 12,39<br>%  | 2,65<br>%                          | 1,84<br>%   | 2,25<br>%   | 0,2                           | 0,14  | 0,18  | 0,17       |                   |  |  |

Для обоих временных промежутков применялись следующие статистические критерии оценивания:

1. Математическое ожидание для дискретного сигнала:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}, \quad (13)$$

где  $X_i$  –  $i$ -й элемент выборки;  $n$  – объём выборки дискретного сигнала.

2. Стандартное отклонение для дискретного сигнала:

$$\sigma = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}}{n}. \quad (14)$$

3. Коэффициент вариации

$$K_B = \frac{\sigma}{\bar{X}}. \quad (15)$$

4. Средний коэффициент вариации по трём фазам:

$$K_{B,CP} = \frac{1}{3}(K_{BA} + K_{BB} + K_{BC}), \quad (16)$$

где  $K_{BA}$  – коэффициент вариации сигнала в фазе «А»;  $K_{BB}$  – коэффициент вариации сигнала в фазе «В»;  $K_{BC}$  – коэффициент вариации сигнала в фазе «С».

5. Относительная разность среднего по фазам коэффициента вариации для сигнала тока и напряжения дуги:

$$\delta K_{B,CP} = \frac{K_{B,CP,UD} - K_{B,CP,LD}}{K_{B,CP,LD}}, \quad (17)$$

где  $K_{B,CP,LD}$  – средний коэффициент вариации по трём фазам для тока дуги;  $K_{B,CP,UD}$  – средний коэффициент вариации по трём фазам для напряжения дуги.

Анализ полученных данных показал, что сигналы относительного действующего значения чётных, нечётных и суммарных гармоник напряжения дуги более стабильны и в меньшей мере подвержены влиянию возмущающих воздействий по сравнению с аналогичными сигналами для напряжения дуги при общности тренда. Данный вывод позволяет сделать оценка относительной разности среднего по фазам коэффициента вариации сигнала тока и напряжения дуги.

Отдельно следует отметить тот факт, что согласно экспериментальным данным коэффициент вариации сигналов относительного действующего значения суммарных, чётных и нечётных гармоник напряжения дуги не зависит в значительной мере от коэффициента вариации сигнала действующего значения напряжения электрической дуги. Так, несмотря на то, что на втором временном интервале величина  $\delta V_{CP} < 0$  для действующих значений, для относительного действующего значения чётных, нечётных и суммарных гармоник величина  $\delta V_{CP}$  остаётся положительной.

Тем не менее, несмотря на преимущества, которые предоставляет анализ гармонического состава сигнала напряжения дуги для диагностики стадии плавки, расчёт мгновенных значений сигналов мгновенных значений напряжений дуги является ресурсоёмким, и на поздних стадиях плавки является нецелесообразным ввиду равной эффективности с диагностикой стадии по гармоническому составу тока дуги [11-15].

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основании экспериментальных сигналов тока электрической дуги и фазного напряжения, полученных с помощью многоканального регистратора электрических сигналов РЭС-3 на базе дуговой сталеплавильной печи, с помощью специально разработанной математической модели были восстановлены мгновенные значения сигналов напряжения электрической дуги в каждой из трёх фаз. Полученные данные позволили провести сравнительный анализ гармонического состава сигналов тока и напряжения электрической дуги.

2. Анализ гармонического состава сигналов тока и напряжения дуги подтверждает, что оба сигнала могут быть использованы в качестве критерия, на основании которого можно судить о текущей стадии плавления шихты, что важно для своевременной адаптации текущего электрического режима печи системой управления второго уровня путём изменения сочетания ступе-

ни печного трансформатора, реактора и номера рабочей кривой. Установлено, что вывод о более высокой скорости изменения чётных гармоник тока по сравнению с нечётными также применителен к гармоникам напряжения дуги.

3. На нестабильном участке плавки предпочтительнее использовать анализ гармонического состава напряжения дуги, поскольку данный показатель в меньшей мере подвержен возмущающим воздействиям в виде мгновенного изменения длины электрической дуги, а также несимметрии токов. В этом случае сводится к минимуму вероятность несвоевременного изменения электрического режима вследствие некорректной реакции системы управления второго уровня на всплеск гармонических составляющих, обусловленный технологическим коротким замыканием. Частично решить данную проблему можно путём увеличения постоянной времени фильтрации параметра регулирования. Тем не менее на начальной стадии плавки продолжительность технологических этапов сравнительно невысока, вследствие чего чрезмерное увеличение времени фильтрации может привести к обратной ситуации, когда переход с одного режима плавки на другой производится несвоевременно.

4. Расчёт мгновенных значений напряжения электрической дуги в производственных условиях является ресурсоёмкой задачей и требует наличия значительных вычислительных мощностей. При этом на стабильных стадиях плавления, когда степень влияния возмущающих воздействий сведена к минимуму, эффективность диагностики стадии плавки по высшим гармоникам токов и напряжений дуг практически одинакова. Данную особенность необходимо учитывать в дальнейших исследованиях при разработке усовершенствованных систем управления электрическим режимом работы ДСП, в основе которой лежит методика диагностики стадии плавки по высшим гармоникам токов и напряжений дуг.

**Работа выполнена в рамках гранта Президента РФ, МК №3230.2018.8.**

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Cassie A.M. Nouvelle théorie des arcs de rupture et rigidité du circuit (New theory of breaker arcs and circuit rigidity). CIGRE Report, no. 102, 1939.
2. Nikolaev A.A., Tulupov P.G., Anufriev A.V. Assessing the Feasibility of Electrical Mode Control of Ultra-High Power Arc Steelmaking Furnace Based on Data about Harmonic Composition of Arc Currents and Voltages// Proceedings of 16<sup>th</sup> International Conference on Research and Education in Mechatronics (REM2015). IEEE. Bochum, Germany, November 18-20, 2015. pp. 302-308, DOI: 10.1109/REM.2015.73804112.
3. Nikolaev A.A., Tulupov P.G. Method of setting optimum asymmetric mode of operation of electric arc furnace// in Proc. 11th France-Japan & 9th Europe-Asia Congress on Mechatronics, 2016, pp. 033-037. DOI:10.1109/MECATRONICS.2016.7547111.
4. Nikolaev A.A.; Tulupov P.G.; Savinov D.A. Mathematical model of electrode positioning hydraulic drive of electric arc steel-making furnace taking into account stochastic disturbances of arcs// International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM) pages 1-6, 2017, DOI: 10.1109/ICIEAM.2017.8076205
5. Nikolaev A.A., Tulupov P.G., Antropova L.I. Heating stage



- diagnostics of the electric arc furnace based on the data about harmonic composition of the arc voltage // 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), DOI:10.1109/EIConRus.2018.8317198
6. Николаев А.А., Руссо Ж.-Ж., Сцымански В., Тулупов П.Г. Экспериментальное исследование гармонического состава токов дуг для дуговых сталеплавильных печей различной мощности // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2016. Т.14. №3. DOI:10.18503/1995-2732-2016-14-3-106-120
  7. Николаев А.А., Тулупов П.Г., Ануфриев А.В. Система управления электрическим режимом дуговой сталеплавильной печи: патент на полезную модель №176106, 2018
  8. Bowman B., Krüger K. Arc Furnace Physics, Verlag Stahleisen GmbH. Düsseldorf, 2009.
  9. Jaipradidtham C.A Control of Real Voltage and Harmonic Analysis with Adaptive Static Var of Electric Arc Furnace for Power Quality Improvement by Grey Markov Method // Proceedings of the Power Systems (ICPS), 2016 IEEE 6th International Conference on. New Delhi, India. 2016. pp. 1-6. DOI: 10.1109/ICPES.2016.7584250.
  10. Harmonic Measurements and Analysis in a Modern Steel Manufacturing Facility / Bao M., Xia J., Yin X., Dong M., He H., He J. // Proceedings of the Power and Energy Society General Meeting, 2010 IEEE. Providence. RI. USA. 2010. pp.1-6. DOI: 10.1109/PES.2010.5589983
  11. Influence of a SVC on AC Arc Furnaces Harmonics, Flicker and Unbalance. Measurement and Analysis / Donsión M.P., Güemes J.A., Oliveira F. // Proceedings of the MELECON 2010 – 2010 15th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference. Valleta. Malta. Pp. 1423-1428. DOI: 10.1109/MELCON.2010.5476032.
  12. Power Quality Measurements in a Steel Industry with Electric Arc Furnaces / Issouribehere P.E., Barbero J.C., Issouribehere F., Barbera A. // Proceedings of the Power and Energy Society General Meeting – Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE. Pittsburgh. PA. USA. 2008. pp. 1-8. DOI: 10.1109/PES.2008.4596177.
  13. Harmonics and Interharmonics Analysis of Electrical Arc Furnaces Based on Spectral Model Optimization with High Resolution Windowing / Vatankulu Y.E., Sentirk Z., Salor O. // IEEE Transactions on Industry Applications. Issue 99. 2017. pp. 1-8. DOI:10.1109/TIA.2017.2669328.
  14. Online Characterization of Interharmonics and Harmonics of AC Electric Arc Furnaces by Multiple Synchronous Reference Frame Analysis / Uz-Logoglu E., Salor O., Ermis M. // IEEE Transactions on Industry Applications. Vol. 52, Issue 3. 2016. pp. 2673-2683. DOI: 10.1109/TIA.2016.2524455.
  15. Power Quality Indices: A Saudi Steel Mill Case Study / El-Amin I.M., Al-Elyani A., Shuaib A. // Proceedings of the Computing, Electrical and Electronics Engineering (IC-CEEE), 2013 International Conference on. Khartoum, Sudan. 2013. pp. 99-102. DOI: 10.1109/ICCEEE.2013.6633914.

Поступила в редакцию 02 октября 2018 г.

## INFORMATION IN ENGLISH

### EXPERIMENTAL ANALYSIS OF ELECTRIC ARC CURRENT AND ELECTRIC ARC VOLTAGE HARMONIC COMPOSITION OF POWERFUL SHAFT ELECTRIC ARC FURNACE

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>.

Platon G. Tulupov

Post-graduate student, the Department of Automated Electric Drive and Mechatronics, Nosov Magnitogorsk State University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: Tulupov.pg@mail.ru.

Evgeniy Ya. Omelchenko

D.Sc. (Engineering), Associate Professor, the Department of Automated Electric Drive and Mechatronics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: momentum2@yandex.ru.

During the present scientific research, instantaneous values of the electric arc voltage were obtained for the alternative current three-phase shaft electric arc furnace SF-125. The calculation of the electric arc voltage signal were provided for early melting stage on the base of designed mathematical model, measured signals of phase voltage and electric arc current and predetermined parameters of electric circuit. The obtained results made it possible to accomplish the comparative analysis of electric arc current and electric arc voltage harmonics fluctuations including analysis of the relative RMS values for odd, even and total harmonics. Consequently, it is clear that harmonic composition of the electric arc voltage is more stable against non-symmetrical modes and random disturbances of electric arc length in comparison with harmonic composition of the electric arc voltage. Therefore, the method of heating stage diagnostic based on the data about harmonic composition of the electric arc voltage may be efficiently applied in electric modes control systems, providing the rise of energy efficiency for steelmaking

complex. Nevertheless, at the late stages of melting heating stage diagnostic methods based on the data about harmonic composition of electric arc current and electric arc voltage have equal efficiency. Due to this fact, resource-intensive calculation of the electric arc voltage instantaneous values becomes unreasonable.

**Keywords:** electric arc furnace, electric arc, Fourier transformation, harmonic data analysis, heating stage diagnostic.

#### REFERENCES

1. Cassie A.M. Nouvelle théorie des arcs de rupture et rigidité du circuit (New theory of breaker arcs and circuit rigidity). CIGRE Report No. 102, 1939.
2. Nikolaev A.A., Tulupov P.G., Anufriev A.V. Assessing the Feasibility of Electrical Mode Control of Ultra-High Power Arc Steelmaking Furnace Based on Data about Harmonic Composition of Arc Currents and Voltages. Proceedings of 16<sup>th</sup> International Conference on Research and Education in

- Mechatronics (REM2015). IEEE. Bochum, Germany, November 18-20, 2015, pp. 302-308, DOI: 10.1109/REM.2015.73804112.
3. Nikolaev A.A., Tulupov P.G. Method of setting optimum asymmetric mode of operation of electric arc furnace. Proc. 11th France-Japan & 9th Europe-Asia Congress on Mechatronics, 2016, pp. 033-037. DOI:10.1109/MECATRONICS.2016.7547111.
4. Nikolaev A.A., Tulupov P.G., Savinov D.A. Mathematical model of electrode positioning hydraulic drive of electric arc steel-making furnace taking into account stochastic disturbances of arcs. International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), pages 1-6, 2017, DOI: 10.1109/ICIEAM.2017.8076205
5. Nikolaev A.A., Tulupov P.G., Antropova L.I. Heating stage diagnostics of the electric arc furnace based on the data about harmonic composition of the arc voltage. 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus), DOI:10.1109/ElConRus.2018.8317198
6. Nikolaev A.A., Rousseau J.-J., Szymanski V., Tulupov P.G. An experimental study of electric arc current harmonics in electric arc furnaces with different power characteristics. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Bulletin of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2016, vol.14, no. 3, pp. 106-120. DOI:10.18503/1995-2732-2016-14-3-106-120 (in Russian)
7. Nikolaev A.A., Tulupov P.G., Anufriev A.V. *Sistema upravleniya ehlektricheskim rezhimom dugovoj staleplavilnoj pechi* [Electric mode control system of the electric arc furnace]: Russian Federation effective model №176106, 2018. (in Russian)
8. B. Bowman, K. Krüger, Arc Furnace Physics, Verlag Stahleisen GmbH, Düsseldorf, 2009.
9. Jaipradidtham C., A Control of Real Voltage and Harmonic Analysis with Apaptive Static Var of Electric Arc Furnace for Power Quality Improvement by Grey Markov Method. Proceedings of the Power Systems (ICPS), 2016 IEEE 6th International Conference on. New Delhi, India. 2016, pp. 1-6. DOI: 10.1109/ICPES.2016.7584250.
10. Bao M., Xia J., Yin X., Dong M., He H., He J. Harmonic Measurements and Analysis in a Modern Steel Manufacturing Facility. Proceedings of the Power and Energy Society General Meeting, 2010, IEEE. Providence. RI. USA. 2010. pp.1-6. DOI: 10.1109/PES.2010.5589983
11. Donsión M.P., Güemes J.A., Oliveira F. Influence of a SVC on AC Arc Furnaces Harmonics, Flicker and Unbalance. Measurement and Analysis. Proceedings of the MELECON 2010 – 2010 15th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference. Valleta. Malta, pp. 1423-1428. DOI: 10.1109/MELCON.2010.5476032.
12. Issouribehere P.E., Barbero J.C., Issouribehere F., Barbera A. Power Quality Measurements in a Steel Industry with Electric Arc Furnaces. Proceedings of the Power and Energy Society General Meeting – Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE. Pittsburgh. PA. USA. 2008, pp. 1-8. DOI: 10.1109/PES.2008.4596177.
13. Vatankulu Y.E., Sentirk Z., Salor O. Harmonics and Interharmonics Analysis of Electrical Arc Furnaces Based on Spectral Model Optimization with High Resolution Windowing. IEEE Transactions on Industry Applications. Issue 99. 2017, pp. 1-8. DOI:10.1109/TIA.2017.2669328.
14. Uz-Logoglu E., Salor O., Ermis M. Online Characterization of Interharmonics and Harmonics of AC Electric Arc Furnaces by Multiple Synchronous Reference Frame Analysis. IEEE Transactions on Industry Applications. Vol. 52, iss. 3, 2016, pp. 2673-2683. DOI: 10.1109/TIA.2016.2524455.
15. El-Amin I.M., Al-Elyani A., Shuaib A. Power Quality Indices: A Saudi Steel Mill Case Study. Proceedings of the Computing, Electrical and Electronics Engineering (ICCEEE), 2013 International Conference on. Khartoum, Sudan. 2013, pp. 99-102. DOI: 10.1109/ICCEEE.2013.6633914.

Николаев А.А., Тулупов П.Г., Омельченко Е.Я. Экспериментальные исследования гармонического состава токов и напряжений дуг мощной дуговой сталеплавильной печи шахтного типа // Электротехнические системы и комплексы. 2018. № 4(41). С. 63-72. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-4\(41\)-63-72](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-4(41)-63-72)

Nikolaev A.A., Tulupov P.G., Omelchenko E.Ya. Experimental Analysis of Electric arc Current and Electric arc Voltage Harmonic Composition of Powerful Shaft Electric arc Furnace. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2018, no. 4(41), pp. 63-72. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-4\(41\)-63-72](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-4(41)-63-72)



## ИНФОРМАЦИОННОЕ, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 004.43

[https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-2\(39\)-73-81](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-2(39)-73-81)Логунова О.С.<sup>1</sup>, Багаев И.И.<sup>1</sup>, Сидоренко Н.С.<sup>1</sup>, Логунов С.М.<sup>2</sup>, Егорова Л.Г.<sup>1</sup><sup>1</sup> Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова<sup>2</sup> ООО «Объединенная сервисная компания», г. Магнитогорск

## МЕТОД ЭФФЕКТИВНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

Целью исследования является разработка метода эффективной организации специализированного информационного обеспечения для системы автоматизированного управления технологическими процессами, позволяющего сохранять только информацию о ключевых элементах сложно структурированного изображения. При выполнении исследований введено понятие сложноструктурированного изображения, включающего объект исследования и множество элементов, нарушающих его сплошность. Для описания изображения вводится структурная единица информации, включающая для объекта исследования: принадлежность к классу, гистограмму яркости, начальную точку и описание границы объекта; для элементов внутри объекта исследования: начальную точку области каждого элемента и описание границы элемента. Для реализации структурной единицы информации разработана функциональная схема программного продукта, который содержит два блока: блок формирования математического описания изображения для сохранения в корпоративном Хранилище; блок использования математического описания для экспертной оценки с учетом требования восстановления исходного изображения. Разработанный метод протестирован для изображений серного отпечатка непрерывно-литой заготовки для условий крупного металлургического предприятия России. Исходные материалы получены в ходе пассивного эксперимента на машине непрерывного литья заготовок криволинейного типа. Для проведения вычислительного эксперимента спроектирован и разработан программный продукт, позволяющий выполнить построение математического описания изображения и его восстановления. С использованием массива ретроспективной информации 2011-2018 гг. и разработанного программного продукта выполнена оценка эффективности представления графической информации в виде структурной единицы информации без непосредственного сохранения изображения. Средняя доля сохраняемой информации от исходного объема составляет 0,53%. Результаты исследования применимы для систем автоматизированного управления технологическими процессами и производствами, в которых необходима экспертная оценка объектов по изображениям: качество продукта, целостность оборудования, сплошность объектов в медицинской и легкой промышленности.

**Ключевые слова:** изображение, структура изображения, структурная единица информации, математическое описание, Хранилище данных.

## ВВЕДЕНИЕ

Интенсивное развитие информационной среды промышленных предприятий требует проектирования и разработки методов эффективной организации и ведения специализированного информационного и программного обеспечения для системы автоматизированного управления технологическими процессами, производствами и технологической подготовкой производства. Современные технологии организации информационного обеспечения систем управления технологическими процессами и производствами требуют проектирования и разработки структуры базы и банков данных, а также альтернативных способов представления и хранения информации, в том числе и графической [1, 2].

Для крупных предприятий количество записей в базе данных для сохранения параметров процессов насчитывает миллионы при количестве полей в каждой записи до 500 и более с объемом каждой записи до 15 000 МБ. Например, для одного из крупнейших металлургических предприятий Российской Федерации только по этапу непрерывной разливки стали за полный календарный 2017 г. и шесть месяцев 2018 г. количество записей в Храни-

лище достигает 6211239 и в каждой записи 306 полей общим объемом 9180 МБ. По прокатному переделу максимальное количество записей за этот же период достигает 18998408 записей при структуре записи в 408 полей и объемом каждой записи 9760 МБ. Общий объем записей по всем переделам в Хранилище достигает 1 ЭксаБ. Следует учитывать, что Хранилище обеспечивает сохранение не только текущей информации, но возможность архивирования для последующего восстановления.

Среди методов эффективной организации и ведения специализированного информационного обеспечения систем управления технологическими процессами и производствами можно отметить [3-6]:

- оптимизацию структуры базы с учетом функциональных особенностей поисковых запросов по параметрам, характеризующих технологический процесс: пересмотр планов для запросов, перераспределения весовых категорий запросов, рефакторинг запросов, изменение структуры индексов, тонкая настройка планов для запросов;

- изменение состава и типа полей базы данных технологических параметров для повышения достоверности и полноты информации, характеризующих процесс: денормализация и нормализация базы данных, добавление, удаление и изменений полей.

Если есть возможность хранить исходную инфор-

мацию в меньшем размере (как минимум, на 30% меньше), то данные подлежат оптимизации.

Среди теоретических и практических разработок в области проектирования и разработки методов эффективной организации и ведения специализированного информационного и программного обеспечения для системы автоматизированного управления технологическими процессами, производствами и технологической подготовкой производства представлены работы, в которых:

– предлагаются методы построения и использования систем управления с распределенной структурой, которые должны обеспечивать согласование параметров управления для каждого участка [7, 8];

– рассматриваются особенности построения информационного обеспечения АСУ ТП для потенциально опасных объектов [9, 10].

Для хранения больших объемов информации на производственных предприятиях используют дорогостоящее аппаратное и программное обеспечение. В качестве примера можно привести конфигурацию одной из действующих корпоративных систем, приведенной в табл. 1.

Представление в Хранилище данных информации в графическом виде в настоящее время становится все более актуальным. Графическая информация наиболее полно дает представление о мгновенном или динамическом состоянии объекта. В современном мире активно разрабатываются как классические, так и новые алгоритмы обработки графической информации [11]. Несмотря на это, графическая информация в рабочем пространстве Хранилища данных требует большого объема на носителях для ее сохранения и, как, правило исключается из набора сохраняемой информации.

**Таблица 1**  
**Ресурсы корпоративного Хранилища данных металлургического предприятия**

| Вид ресурса                                | Характеристики аппаратного обеспечения                                                                                                                          | Характеристики программного обеспечения                                                                                                                                                                                                    |
|--------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Ресурсы WEB-сервера                        | 4<br>вычислительных<br>ядра<br>16 ГБ<br>оперативного<br>запоминающего<br>устройства<br>(ОЗУ);<br>100 ГБ<br>дискового<br>пространства                            | Операционная система<br>Linux<br>Apache 2.4 + PHP 7.2.3<br>(с кодировкой по<br>умолчанию UTF-8)<br>Подключение к системе<br>управления базами<br>данных (СУБД) Sybase<br>ASE – ODBC<br>Подключение к СУБД<br>Oracle – Oracle<br>Client/PDO |
| Ресурсы<br>базы<br>данных                  | Технология<br>процессора –<br>SPARC;<br>Частота<br>процессора не<br>ниже 3,4ГГц;<br>8<br>вычислительных<br>ядра;<br>32 ГБ ОЗУ<br>2 ТБ дискового<br>пространства | Операционная система<br>Solaris<br>СУБД Oracle 12c<br>(с кодировкой по<br>умолчанию UTF-8)<br>СУБД разбита<br>на 2 кластера – основная<br>и резерв                                                                                         |
| Ресурсы<br>реплика-<br>ционного<br>сервера | 2<br>вычислительных<br>ядра;<br>8 ГБ ОЗУ<br>50 ГБ дискового<br>пространства                                                                                     | Операционная система<br>Windows Server 2012R2                                                                                                                                                                                              |

Для условий использования графической информации возникает задача поиска компромисса при выборе набора и формы представления информации, которая предполагается для размещения в Хранилище данных. Наиболее популярной является траектория сохранения изображения при использовании алгоритмов сжатия [12-16]. Одно из усовершенствований алгоритма сжатия *JPEG* с потерями представлено в работе [13] и заключается в разделении объекта и фона изображения и использовании разных степеней компрессии для каждого в отдельности, что позволяет добиться повышения общего коэффициента сжатия графической информации и сохранения объекта изображения в лучшем качестве, нежели качество фона. Приведенный в работе алгоритм основан на выделении наиболее информативных областей изображения, не имеющих равномерного распределения яркости внутри себя и замкнутых границ, очерчивающих объект. Среди менее распространенных методов сжатия с потерями также существует метод [14], основанный на разложении квазициклических компонент изображения по собственным векторам соответствующих субполосных матриц на основе вариационного субинтервального частотного анализа/синтеза. В ходе вычислительных экспериментов, проведенных авторами работы, метод сжатия продемонстрировал высокоэффективное сжатие изображений, энергия которых сосредоточена в незначительном количестве частотных интервалов. Довольно простой для понимания алгоритм сжатия с потерями описан в работе [15]. Каждому пикселю изображения ставится в однозначное соответствие пара  $X$  и  $Y$  из хаотично построенного числового ряда, полученного при помощи использования дискретного отображения Хенона. Благодаря тому, что одним из шагов алгоритма сжатия является аннулирование фрагмента полученного хаотически трансформированного изображения, снижается объем занимаемого графической информацией дискового пространства. Авторы утверждают, что аннулированию без видимых потерь успешно подвергается до 70% площади изображения в зависимости от его фактуры. В работе [16] представлен алгоритм сжатия изображений с адаптацией к структуре графической информации, в котором под адаптацией понимается процесс деления изображения на непересекающиеся фрагменты с учетом их информационной ценности или морфологической структуры. Для решения задачи адаптации вводится понятие маски, которая показывает одну или несколько областей интереса. Выделять маску предлагается при помощи статистических характеристик, определяемых по гистограмме яркости на основе значений средней энтропии, характеризующей изменчивость яркости изображения. Адаптивный способ сжатия, представленный авторами, позволяет сохранить близкую к исходной точности информацию об области повышенного интереса на изображении и при этом обеспечить малые размеры файла. В большинстве своем описанные алгоритмы являются усовершенствованием формата *JPEG* и могут успешно применяться, учитывая данные авторами ограничения. В силу разных при-



чин, зависящих от предметной области использования, малый размер файла и соответствующее этому качество графической информации не всегда подходит для изображений, при хранении которых важно сохранять исходное качество лишь выделенных объектов изображения, пренебрегая всеми остальными.

Для современных Хранилищ промышленных данных о протекании технологических процессов и состоянии оборудования возникает противоречие: с одной стороны, наличие графической информации об объекте позволяет устранить влияние человеческого фактора при выполнении экспертной оценки и, как следствие, повысить качество принятия решения на основе полной информации с применением современных методов автоматизированной или автоматической обработки информации, с другой – непосредственное размещение графической информации в Хранилище приводит к быстрому заполнению рабочего пространства Хранилища и высоким затратам на приобретение и обслуживание технического обеспечения.

Для устранения противоречий необходимо разработать метод эффективной организации и ведения специализированного информационного обеспечения для системы автоматизированного управления технологическими процессами, производствами и технологической подготовкой производства.

#### МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Предположим, что в ходе исследования технологического процесса или осмотра оборудования получено изображение, на котором можно выделить объект исследования произвольной формы и нарушение его сплошности в виде более темных элементов нерегулярной формы (рис. 1, а). Изображение такого вида будем называть сложноструктурированным.

Особенностями сложноструктурированного изображения является:

- объект исследования ограничен и его границы описываются непрерывной функцией ;
- объект исследования и элементы внутри него имеют нерегулярную форму;
- объект исследования на изображении и элементы внутри него имеют случайное расположение  $Coor$ .

Частным упрощенным случаем такого изображения может считаться сканированное изображение серного отпечатка непрерывно-литой заготовки квадратного сечения, на котором нарушения сплошности соответствуют образованию и развитию внутренних дефектов [17, 18]. В этом случае объект исследования имеет форму квадрата, для которого должно быть идентифицировано положение одной из вершин  $Coor$  и угол наклона одной из сторон относительно границ всего изображения (рис. 1, б). Граница объекта исследования описывается уравнением прямых от заданной вершины и на изображении может быть выделена в интерактивном режиме.

Учитывая, что отношение средней яркости фона и основного объекта исследования является различным для набора изображений, необходимо ввести характеристику или набор характеристик, на основе которых

можно классифицировать отличия фона и объекта исследования. В работе [18] построен алгоритм каскадной классификации изображений, который позволяет решать эту задачу с использованием формообразующих характеристик гистограммы яркости. В ходе дальнейших исследований считаем, что задача классификации уже решена и выбрана траектория для выделения объекта исследования и его сегментации.

Размер файла для сохранения изображения с сохранением полной информативности достигает 5–7 МБ.

При проектировании базы данных для Хранилища рассматриваются способы размещения изображения традиционными способами (траектория 1 и 2), приведенными на рис. 2 по соответствующим траекториям, и предлагается новый способ (траектория 3).

На рис. 2 введены обозначения: ТП – технологический процесс; ХД – Хранилище данных;  $I_0$  – исходное изображение;  $I_1$  – изображение после сжатия;  $I_2$  – изображение после предварительной обработки;  $Ar_{Pr}$  – массив конечных оценок элементов сложноструктурированного изображения;  $Sr_{MD}$  – структурная единица информации, построенная на математическом описании сложноструктурированного изображения.

Траектория 1 описывает процесс размещения изображения в Хранилище после его сжатия с использованием стандартных алгоритмов [13–16].

Траектория 2 предполагает выполнение двух этапов:

– этап предварительной обработки изображения, включающий алгоритмы классической теории обработки изображения [11], целью которого является улучшение исходного изображения для последующей сегментации;

– этап извлечения конечных свойств, в результате которого формируется массив оценок для внутренних элементов объекта исследований (например, балльная экспертная оценка развития внутренних дефектов продукции или геометрических размеров объекта, характеризующих разрушение оборудования).

Новая траектория 3 предполагает выполнение двух этапов:

– этап предварительной обработки изображения аналогичен этапу в траектории 2;

– этап построения математического описания изображения по заранее определенной структуре для ключевых объектов изображения.

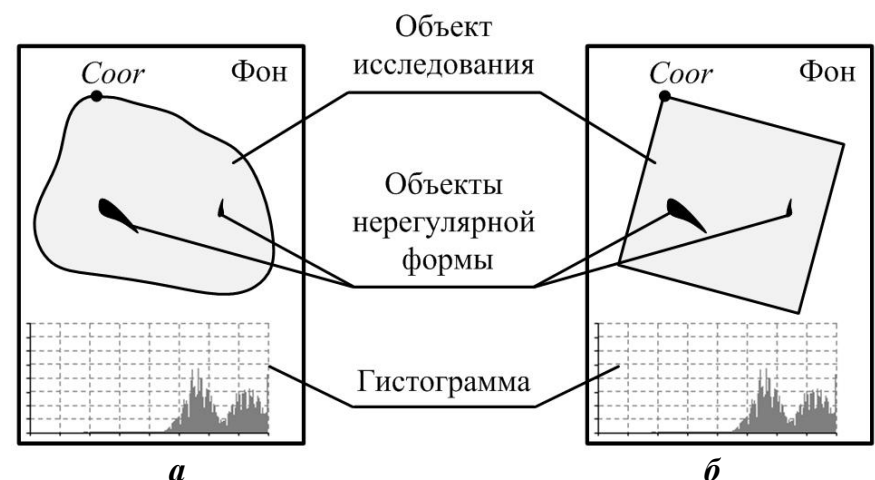


Рис. 1. Структура изображения:  
а – сложноструктурированное изображение в общем виде;  
б – частный случай сложноструктурированного изображения на примере серного отпечатка

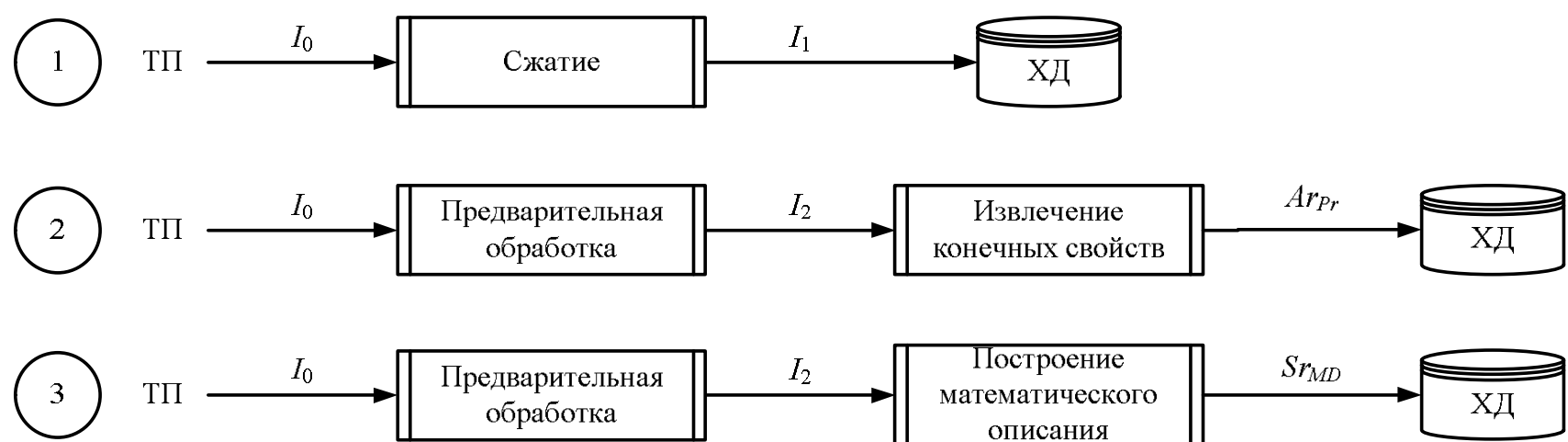


Рис. 2. Траектории размещения графической информации в Хранилище данных

Для выполнения этапа 1 по траекториям 2 и 3 используется классификация изображений согласно исследованиям [18] и строится индивидуальная траектория применения классических алгоритмов для предварительной обработки.

Понятие ключевого объекта для каждого вида изображения определяется для каждой задачи.

Указанные траектории характеризуются свойствами, указанными в табл. 2.

По результатам обобщения свойств, характеризующих траектории размещения графической информации в Хранилище данных, можно выдвинуть гипотезу о превосходстве способа представления изображения в виде математического описания.

Для реализации нового способа разработан метод построения математического описания сложноструктурированного изображения для эффективной организации специализированного информационного обеспечения для системы автоматизированного управления технологическими процессами.

Для описания метода рассмотрим сложноструктурированное изображение и введем систему координат на его поверхности (рис. 3).

Согласно [18] каждому изображению можно поставить в соответствие класс по соотношению яркости фона и объекта исследования. Обозначим значение класса

$$K_m, m = 1..M,$$

где  $m$  – номер класса;  $M$  – количество классов изображений рассматриваемой задачи.

Таблица 2

Перечень и оценка свойств траекторий размещения графической информации в Хранилище данных

| № п/п | Свойства траектории                                        | Номер траектории |   |   |
|-------|------------------------------------------------------------|------------------|---|---|
|       |                                                            | 1                | 2 | 3 |
| 1     | Достижение наименьшего размера файла с изображением        | +                | + | - |
| 2     | Сохранение информации о свойствах элементов на изображении | -                | + | + |
| 3     | Сохранение информации о структуре изображения              | +                | - | + |
| 4     | Возможность восстановления исходного изображения           | -                | - | + |
| 5     | Отсутствие необходимости сохранения файла с изображением   | -                | - | + |

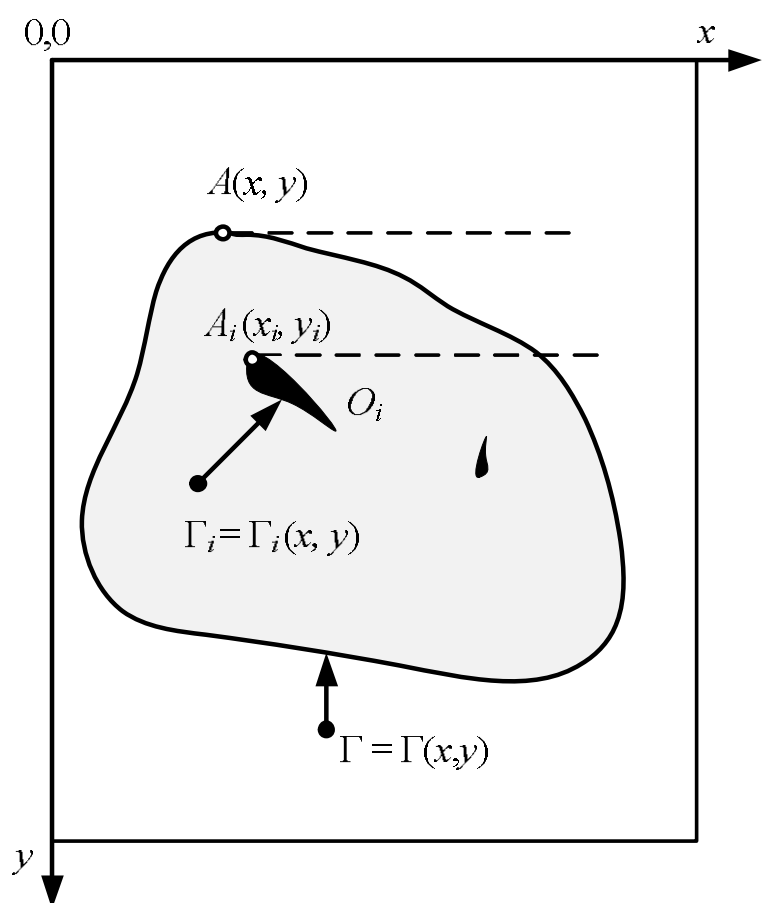


Рис. 3. Схема структурированного изображения

Характеристикой яркости изображения является гистограмма, содержащая 256 цветовых градаций. Для математического описания гистограммы изображения достаточно структуры в виде линейного массива

$$\vec{G} = (g_0, g_1, \dots, g_{255}),$$

где  $\vec{G}$  – массив яркостей пикселей;  $(g_0, g_1, \dots, g_{255})$  – элементы массива, содержащие количество пикселей, имеющих яркость, соответствующую индексу массива.

На поле изображения выделяется объект исследования, для математического описания которого необходимо представление координат начальной точки границы  $A=A(x,y)$  и границы объекта в виде аналитической или табличной функции  $\Gamma=\Gamma(x,y)$ . Наличие границы исследуемого объекта позволяет сегментировать область для детализации элементов, определяющих нарушение сплошности.

Указанные выше характеристики изображения формируют первую часть структуры математического описания изображения и включают поля: класс яркости, гистограмма яркости изображения, начальная точка объекта исследования и описание границы объекта исследования.

Сегментация изображения для объекта исследования выделяет внутри его границы массив элементов для описания нарушения сплошности  $\vec{E}=\vec{E}(E_1, E_2, \dots, E_n)$

и каждый элемент является структурой, в которой сохраняются координаты начальной точки входа в область элемента и аналитическая или табличная функция границы каждого элемента  $A_q = A_q(x_q, y_q)$ ,  $q=1 \dots n$ , где  $n$  – количество элементов объекта исследования. Таким образом, формируется вторая часть структуры для математического описания изображения – характеристики объекта исследования.

Учитывая, что в ходе технологического процесса формируется набор изображения для каждой единицы продукции или выборочно по продукции ответственного назначения, формируется структурная единица информации, которая содержит структурированное поле математического описания изображения:

$$\overline{SR}_{MDj} = \overline{SR}_{MDj} \left( FI_j \{ K_{jm}, G_j, A_j, \Gamma_j \}, OI_j \{ \{ A_{jq}, \Gamma_{jq} \} \} \right),$$

где  $j$  – идентификационный номер записи в Хранилище данных;  $FI$  – структурная единица информации для описания изображения в целом;  $OI$  – структурная единица информации для описания множества элементов внутри границы объекта исследования;  $q$  – номер элемента в поле объекта исследования,  $q=1 \dots n$ ;  $n$  – количество элементов нарушения сплошности объекта.

Графическое представление структурной единицы информации для поля математического описания изображения в Хранилище данных приведена на рис. 4.

Наличие структуры для математического описания изображения требует разработки алгоритмического окружения структуры, позволяющего по требованиям государственных или отраслевых стандартов в автоматизированном режиме выполнить экспертную оценку элементов на изображении и при необходимости восстановить аналог исходного изображения. На рис. 5 приведена схема функционирования программного продукта для формирования математического описания сложноструктурированного изображения и его использования для экспертной оценки нарушения сплошности объекта исследования. На рис. 5 условие

оценки определяет необходимость восстановления изображения для сопоставления экспертных оценок, полученных в автоматизированном режиме и при непосредственной визуальной оценке эксперта.

На основе функциональной схемы, приведенной на рис. 5, реализован программный продукт, который позволил провести тестовое испытание по оценке эффективности сохранения в корпоративном Хранилище только математического описания изображения (рис. 6, 7).

#### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Одной из задач, которая решена с использованием теории сегментации сложноструктурированного изображения, является задача о сохранении рабочего пространства, занимаемого изображением, в корпоративном Хранилище с информацией о качестве непрерывно-литой заготовки при построении системы управления технологическим процессом непрерывной разливки стали с обратной связью [19-21].

В качестве исходных данных выбраны серые отпечатки поперечного сечения непрерывно-литой заготовки (рис. 6). Приведенные на рис. 6 изображения относятся к разным классам. Общий объем тестируемой базы составил 110 изображений за период с 2011 по 2018 гг. На каждом изображении представлен объект исследования в виде фигуры, близкой по форме к квадрату.

Программный продукт позволяет загрузить изображение  $I_0$ , выполнить его преобразование и получить изображение  $I_2$ . Для изображения  $I_2$  строится перечень сегментированных элементов и математическое описание изображения для сохранения в Хранилище.

Для каждого из приведенных изображений выполнен расчет дисперсии с восстановленным изображением и коэффициента сжатия стандартными методами. Результаты вычислительного эксперимента с усредненными характеристиками приведены в табл. 3.

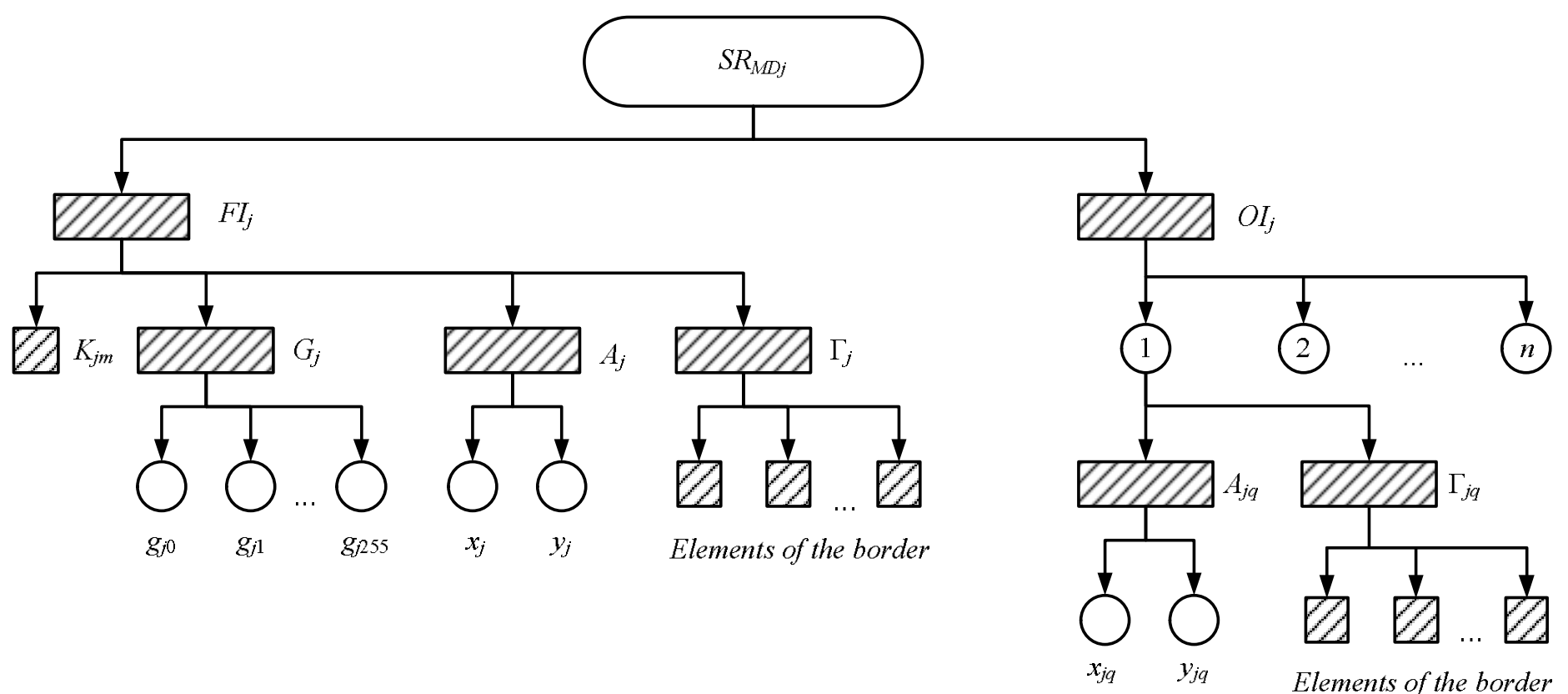


Рис. 4. Графическое представление структурной единицы информации для математического описания сложноструктурированного изображения

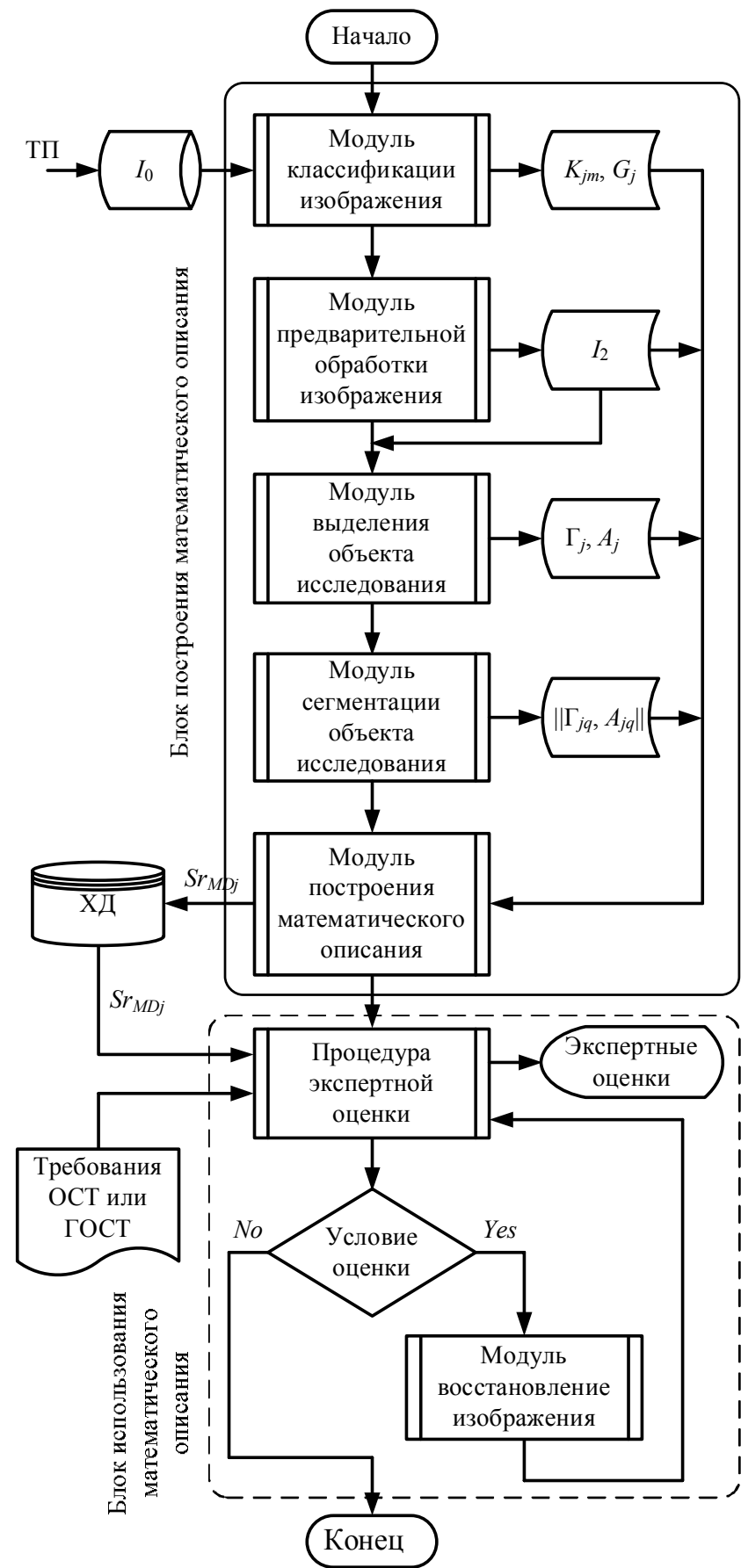


Рис. 5. Схема функционирования программного продукта для формирования и его использования для экспертной оценки нарушения сплошности объекта исследования на изображениях

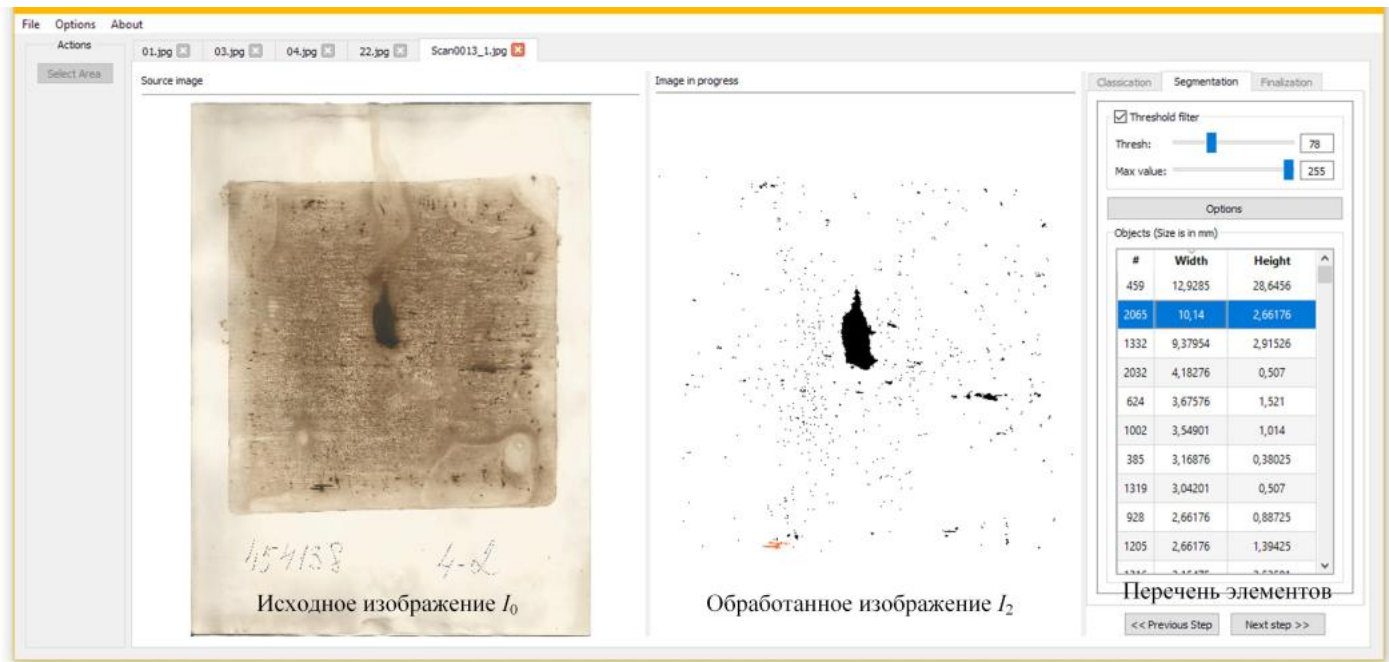


Рис. 6. Внешний вид рабочего окна программного продукта

Таблица 3

Доля итогового от изображения после сжатия по форматам изображения и оценка рассеяния, %

| Степень сжатия | Стандартные способы сжатия |            |            |            | Метод хранения ключевых показателей |            |
|----------------|----------------------------|------------|------------|------------|-------------------------------------|------------|
|                | Формат JPEG                | Дис-персия | Формат PNG | Дис-персия | Формат SISImg                       | Дис-персия |
| Мин. сжатие    | 24,67                      | 14,6       | 51,24      | 94,0       | 0,53                                | 0,12       |
| Сред. сжатие   | 8,24                       | 3,05       | 43,83      | 64,5       |                                     |            |
| Макс. сжатие   | 2,98                       | 0,37       | 43,31      | 64,8       |                                     |            |

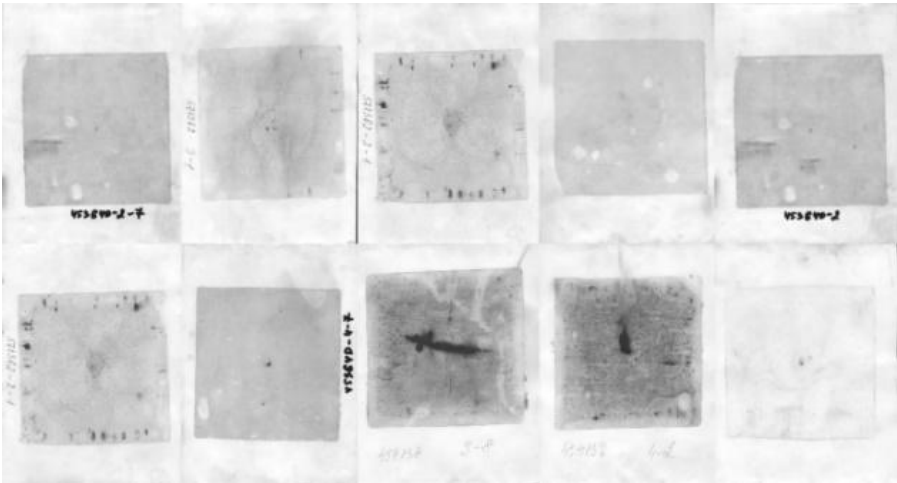


Рис. 7. Набор изображений для тестовой оценки работы программного обеспечения

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Анализ теоретических и практических разработок использования, сжатия и хранения изображений показал, что использование изображений позволяет повысить качество полноты и достоверности информации при принятии решений на основе экспертной оценки объекта исследования.
2. Объект исследования может относиться к множеству отраслей, включая оценку качества металлургической продукции, планирование работ по техническому обслуживанию и ремонтам оборудования, оценку сплошности объекта при медицинском обследовании, оценку территориальной плоскостности и т.п.



3. Предложен метод сохранения ключевых показателей сложноструктурированного изображения, отличающийся от ранее известных тем, что в Хранилище размещается математическое описание структуры изображения, включающее информацию о структуре основного объекта исследования и структуре об элементах объекта, находящихся внутри него.

4. Структура изображения характеризует: класс по яркости, гистограмму яркости, начальную точку объекта исследования и каждого его элемента, описание границы объекта исследования и границ элементов внутри объекта. Указанных элементов структуры достаточно для экспертной оценки согласно соответствующим ОСТ и ГОСТ.

5. Согласно функциональной схеме реализован программный продукт, который позволил доказать эффективность сохранения в корпоративном Хранилище только математического описания изображения на примере оценки качества непрерывно-литой заготовки. Доля занимаемого рабочего пространства от итого размера изображения составляет 0,53% без потери информативности исходного изображения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Logunova O.S., Devyatov D.K., Nurov K.K. Computerized quality estimates of continuous-cast billet // *Steel in Translation*. 2005. Т. 35. № 9. С. 36-42.
2. Мобильное приложение технического обслуживания и ремонта оборудования промышленного предприятия: опыт разработки и внедрения /П.А. Бовшик, Е.В. Берляков, И.Н. Ахметшин, С.М. Логунов // *Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах*. 2017. Т. 5. № 1. С. 30-36.
3. Tow D. SQL Tuning: Generating Optimal Execution Plans. O'Reilly Media, Inc. 2003. 338 с.
4. Kyte T. Эффективное проектирование приложений Oracle. М.: Лори, 2018. 638 с.
5. Льюис Д. Oracle. Основы стоимостной оптимизации. Cost-Based Oracle Fundamentals. СПб.: Питер, 2007. 528 с.
6. Codd E.F. Normalized data base structure: a brief tutorial / *Proc. ACM SIGFIDET*. 1971, Workshop, San Diego, Calif., Nov. 1971. pp. 1-18
7. Исаев Ю. Ю. Методы эффективной организации и ведения информационного и программного обеспечения АСУП с распределенной структурой: дис... канд. техн. наук. 05.13.06 / Исаев Юрий Юрьевич. Москва, 2009.
8. Смолин Павел Александрович. Методы эффективной организации и ведения специализированного информационного и программного обеспечения АСПП с распределенной структурой: дис...канд. техн. наук. 05.13.06 / Смолин Павел Александрович. Москва, 2011.
9. Синешук М.Ю. Особенности обеспечения информационной безопасности АСУ ТП потенциально опасных объектов // *Современные технологии обеспечения гражданской обороны и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций*. 2015. Т. 2. № 1 (6). С. 49-51.
10. Корнеева М.Д., Труцина Ю.Ю. Информационная безопасность автоматизированных систем управления технологическими процессами // *Образование и наука без границ: социально-гуманитарные науки*. 2016. № 3. С. 211-214.
11. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений М.: Техносфера, 2005. 1072 с.
12. Foody G. A relative Evaluation of MultiClass Image Classification by Suuport Vector Machines // *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*. 2004. Vol. 42, iss. 6. P. 1335-1343.
13. Иванов В.Г., Любарский М.Г., Ломоносов Ю.В. Сокращение содержательной избыточности изображений на основе классификации объектов и фона // *Проблемы управления и информатики*. 2007. № 3. С. 93-102.
14. Жилияков Е.Г., Черноморец А.А., Голощапова В.А. Метод сжатия изображений, основанный на разложении квазициклических компонент изображения по собственным векторам соответствующих субполосных матриц // *Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: История. Политология*. 2011. №13-1 (108). С. 191-195.
15. Гора С.Ю., Довгаль В.М. Метод и инструментальные средства решения задачи сжатия изображений с использованием механизмов хаотической динамики // *Ученые записки. Электронный научный журнал Курского государственного университета*. 2012. №4-2 (24). С. 25-28.
16. Кахоу Самира Эбрахими, Сулема Е.С. Адаптивный способ сжатия изображений // *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки*. 2010. №2. С. 125-131.
17. Посохов И.А. Визуализация и обработка информации о качестве непрерывнолитой заготовки // *Электротехнические системы и комплексы*. 2016. №2 (31). С. 35-43.
18. Логунова О.С., Шакшин В.В., Логунов С.М. Математическое описание объектов нерегулярной формы на цветных изображениях // *Автоматизация технологических и производственных процессов в металлургии*. Магнитогорск, 2009. С. 54-62.
19. Logunova O.S., Matsko I.I., Posohov I.A., Luk'ynov S.I. Automatic system for intelligent support of continuous cast billet production control processes // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2014. Т. 74. №9-12. С. 1407-1418.
20. Кирпичев А.А. Математическое моделирование макроскопических параметров затвердевания непрерывных слитков / О.С. Логунова, Д.Х. Девятков, И.М. Ячиков // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. 1997. №2. С. 49-51.
21. Логунова О.С., Мацко И.И., Сафонов Д.С. Моделирование теплового состояния бесконечно протяженного тела с учетом динамически изменяющихся граничных условий третьего рода // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Математическое моделирование и программирование*. 2012. № 27. С. 74-85.

Поступила в редакцию 06 августа 2018 г.

#### INFORMATION IN ENGLISH

### METHOD OF EFFECTIVE ORGANIZATION OF SPECIALIZED INFORMATION SUPPORT FOR AUTOMATED CONTROL SYSTEM OF TECHNOLOGICAL PROCESSES

Oksana S. Logunova

D.Sc. (Engineering), Professor, Department of Computer Engineering and Programming, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: logunova66@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7006-8639>.

Ivan I. Bagaev

Postgraduate Student, Department of Computer Engineering and Programming, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: InPROfess@ya.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5228-4517>.

Nikita S. Sidorenko

Postgraduate Student, Department of Computer Engineering and Programming, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: Sidorenko@ausferr.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0585-0835>.

Sergey M. Logunov

Engineer of the first category, Scientific and Technical Center, United Service Company, Magnitogorsk, Russia.

Lyudmila G. Egorova

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Computer Engineering and Software Engineering Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

The aim of the research is to develop a method for efficient organization of specialized information support for the automated process control system, which makes it possible to save only information about key elements of a complex structured image. When performing the research, the concept of a complex structured image is introduced, which includes the object of research and many elements that violate its continuity. To describe the image, a structural unit of information is introduced, which includes the following for the research object: belonging to the class, brightness histogram, starting point and description of the object boundary; for elements within the object of investigation: the starting point of the region of each element and the description of the element boundary. To implement the structural information unit, a functional diagram of the software product has been developed, which contains two blocks: a block for forming a mathematical description of the image for storage in the corporate Vault; a block of using the mathematical description for peer review with the requirement of restoring the original image. The developed method has been tested for images of sulfuric imprints of continuous-cast billets for the conditions of a large metallurgical enterprise in Russia. The initial materials were obtained during a passive experiment on a continuous casting machine of a curvilinear type. To study the behavior of the computational experiment, a software product has been designed and developed that provides the construction of a mathematical description of the image and its reconstruction. Using the array of retrospective information in 2011-2018 and the developed software product, an assessment of the efficiency of presentation of graphic information in the form of a structural unit of information without direct preservation of the image was performed. The average share of the stored information from the initial volume is 0.53%. The results of the research are applicable for automated control systems for technological processes and industries where expert evaluation of objects by images is necessary, for example, product quality, integrity of equipment, continuity of objects in the medical and consumer goods industry.

**Keywords:** image, image structure, structural unit of information, mathematical description, data warehouse.

#### REFERENCES

1. Logunova O.S., Devyatov D.K., Nurov K.K. Computerized quality estimates of continuous-cast billet. Steel in Translation. 2005, no 9, pp. 36-42. (In Russian)
2. Bovshik P.A., Berljakov E.V., Ahmetshin I.N., Logunov S.M. Mobile application of maintenance and repair of industrial equipment: experience in development and implementation. *Matematicheskoe i programmnoe obespechenie sistem v promyshlennoj i socialnoj sferah* [Mathematical and software systems in the industrial and social spheres]. 2017, no 1, pp. 30-36. (In Russian)
3. Tow D. SQL Tuning: Generating Optimal Execution Plans. O'Reilly Media, Inc. 2003. 338 p.
4. Kajt T. *Effektivnoe proektirovanie prilozhenij Oracle* [Effective Oracle by design]. Moscow, Lori Publ., 2018. 638 p. (In Russian)
5. L'juis D. Oracle. *Osnovy stoimostnoj optimizacii. Cost-Based Oracle Fundamentals* [Cost-Based Oracle Fundamentals]. St. Petersburg, Piter Publ., 2007, 528 p. (In Russian)
6. Codd E.F. Normalized data base structure: a brief tutorial. Proc. ACM SIGFIDET. 1971, Workshop, San Diego, Calif., 1971, pp. 1-18.
7. Isaev Jurij Jurievich. *Metody jeffektivnoj organizacii i vedenija informacionnogo i programmnogo obespechenija ASUP s raspredelennoj strukturoj*. Kand Diss. [Methods of efficient organization and maintenance of information and software of automated control systems with a distributed structure. Ph.D. Diss.]. Moscow, 2009.
8. Smolin, Pavel Aleksandrovich. *Metody jeffektivnoj organizacii i vedenija specializirovannogo informaci-onnogo i programmnogo obespechenija ASTPP s raspredelennoj strukturoj*. Kand. Diss. [Methods of effective organization and maintenance of specialized information and software. Ph.D. Diss.]. Moscow, 2011.
9. Sineshhuk M.Ju. Features of information security of automated process control system of potentially dangerous objects. *Sovremennye tehnologii obespechenija grazhdanskoj oborony i likvidacii posledstvij chrezvychajnyh situacij* [Modern technologies for ensuring civil defense and liquidation of consequences of emergency situations], 2015, no 1(6), pp. 49-51. (In Russian)
10. Korneeva M.D., Trucina Ju.Ju. Information security of automated process control systems. *Obrazovanie i nauka bez granits: socialno-gumanitarnye nauki* [Education and Science Without Borders: Social and Human Sciences], 2016, no. 3, pp. 211-214. (In Russian)
11. Gonsales R., Vuds R. *Tsifrovaja obrabotka izobrazhenij* [Digital image processing]. Moscow, Tehnosfera Publ., 2005. 1072 p. (In Russian)
12. Foody G. A relative Evaluation of MultiClass Image Classification by Support Vector Machines. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*. 2004, vol.42, iss.6, pp.1335-1343.
13. Ivanov V.G., Ljubarskij M.G., Lomonosov Ju.V. Reducing the content redundancy of images based on the classification of objects and background. *Problemy upravlenija i informatiki* [Problems of management and informatics], 2007, no. 3, pp. 93-102. (In Russian)
14. Zhiljakov E.G., Chernomorec A.A., Goloshchapova V.A. Image compression method based on the decomposition of quasi-cyclic image components into eigenvectors of the corresponding subband matrices. *Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Istorija. Politologija* [Scientific bulletins of the Belgorod State University. Series: History. Political science]. 2011, no. 13-1(108), pp. 191-195. (In Russian)
15. Gora S. Ju., Dovgal V. M. Method and tools for solving the image compression problem using the mechanisms of chaotic

- ic dynamics. *Uchenye zapiski. Elektronnyj nauchnyj zhurnal Kurskogo gosudarstvennogo universiteta* [Scholarly notes. Electronic scientific journal of the Kursk State University.], 2012, no. 4-2 (24), pp. 25-28. (In Russian)
16. Samira Jebra-himi Kahou, Sulema E.S. Adaptive image compression method. *Visnik Hmelnickogo nacionalnogo universitetu. Serija: «Tehnichni nauki»* [Bulletin of Khmelnytsky National University. Series: "Engineering"], 2010, no. 2, pp. 125-131. (In Russian)
  17. Posokhov I.A. Visualization and processing of information about the quality of continuous casting. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical systems and complexes], 2016, no 2 (31), pp. 35-43. (In Russian)
  18. Logunova O.S., Shakshin V.V., Logunov S.M. Mathematical description of objects of irregular shape on color images. *Avtomatizacija tehnologicheskikh i proizvodstvennykh processov v metallurgii* [Automation of technological and production processes in metallurgy], 2009, pp. 54-62. (In Russian)
  19. Logunova O.S., Matsko I.I., Posokhov I.A., Lukyanov S.I. Automatic system for intelligent support of continuous cast billet production control processes. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2014, vol. 74, no. 9-12, pp. 1407-1418.
  20. Logunova O.S., Devjatov D.H., Jachikov I.M., Kirpichev A.A. Mathematical modeling of macroscopic parameters of solidification of continuous ingots. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Chernaja metallurgija* [News of higher educational institutions. Ferrous metallurgy], 1997, no. 2. pp. 49-51. (In Russian)
  21. Logunova O.S., Matsko I.I., Safonov D.S. Simulation of the thermal state of an infinitely extended body with allowance for dynamically changing boundary conditions of the third kind. *Vestnik Juzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Matematicheskoe modelirovanie i programmirovaniye* [Bulletin of the South Ural State University. Series: Mathematical modeling and programming], 2012, no. 27. pp. 74-85. (In Russian)
- 

Логунова О.С., Багаев И.И., Сидоренко Н.С., Логунов С.М., Егорова Л.Г. Метод эффективной организации специализированного информационного обеспечения для системы автоматизированного управления технологическими процессами // *Электротехнические системы и комплексы*. 2018. № 4(41). С. 73-81. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-4\(41\)-73-81](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-4(41)-73-81)

---

Logunova O.S., Bagaev I.I., Sidorenko N.S., Logunov S.M., Egorova L.G. Method of Effective Organization of Specialized Information Support for Automated Control System of Technological Processes. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2018, no. 4(41), pp. 73-81. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-4\(41\)-73-81](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-4(41)-73-81)

---

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Багаев Иван Игоревич** – аспирант, кафедра вычислительной техники и программирования, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия. E-mail: InPROfess@ya.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5228-4517>.

**Бочкарев Игорь Викторович** – д-р техн. наук, профессор, кафедра электромеханики, энергетический факультет, Кыргызский государственный технический университет имени И. Раззакова, г. Бишкек, Кыргызстан. E-mail: elmech@mail.ru. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9873-9203>.

**Брякин Иван Васильевич** – д-р техн. наук, с.н.с., заведующий лабораторией информационно-измерительных систем, Институт автоматики и информационных технологий, Национальная Академия Наук Кыргызской Республики, г. Бишкек, Кыргызстан. E-mail: bivas2006@yandex.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7463-8072>.

**Бухтояров Василий Фёдорович** – д-р техн. наук, профессор, кафедра безопасности жизнедеятельности, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия. E-mail: bukhtoyarovvf@susu.ru.

**Валиуллин Камил Рафкатович** – старший преподаватель, кафедра электро- и теплоэнергетики, Оренбургский государственный университет, г. Оренбург, Россия. E-mail: ValiullinKamil91@gmail.com.

**Васильев Богдан Юрьевич** – канд. техн. наук, доцент, кафедра электроэнергетики и электромеханики, Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: vasilev.bu@spmi.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4018-0507>.

**Гасияров Вадим Рашитович** – канд. техн. наук, заведующий кафедрой мехатроники и автоматизации, Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), г. Челябинск, Россия. E-mail: gasiyarovvr@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9635-4716>.

**Гордиевский Евгений Михайлович** – студент, кафедра электрических станций, сетей и систем электроснабжения, Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), г. Челябинск, Россия. E-mail: gordievskiy@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5049-5900>.

**Григорьев Николай Потапович** – канд. техн. наук, доцент, профессор, кафедра систем электроснабжения, Дальневосточный государственный университет путей сообщения, г. Хабаровск, Россия. E-mail: 0101gnp@mail.ru.

**Давыдов Юрий Анатольевич** – д-р техн. наук, профессор, ректор, Дальневосточный государственный университет путей сообщения, г. Хабаровск, Россия. E-mail: rector@festu.khv.ru.

**Дунаев Дмитрий Иванович** – аспирант, кафедра электропривода и автоматизации промышленных установок, Ульяновский государственный технический университет, г. Ульяновск, Россия. E-mail: du-naeff.dima2015@yandex.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9626-3419>.

**Егорова Людмила Геннадьевна** – канд. техн. наук, доцент, кафедра вычислительной техники и программирования, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия.

**Жирнов Сергей Николаевич** – аспирант, кафедра электропривода и автоматизации промышленных установок, Ульяновский государственный технический университет, г. Ульяновск, Россия. E-mail: zjirnov1980@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5608-7393>.

**Ибрагим Ахмед Амер** – аспирант, кафедра электрических станций, сетей и систем электроснабжения, Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), г. Челябинск, Россия. E-mail: ahmedd20666@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4352-3544>.

**Кислицын Анатолий Леонидович** – канд. техн. наук, профессор, кафедра электропривода и автоматизации промышленных установок, Ульяновский государственный технический университет, г. Ульяновск, Россия. E-mail: alk37@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3023-388X>.

**Ковалёв Антон Александрович** – магистрант, кафедра комплексного использования возобновляемых источников энергии, Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), г. Челябинск, Россия. E-mail: alpenglowlow305@yandex.ru.

**Козярук Анатолий Евтихиевич** – д-р техн. наук, профессор, кафедра электроэнергетики и электромеханики, Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: kozjaruk\_ae@spmi.ru.

**Коржов Антон Вениаминович** – д-р техн. наук, доцент, профессор, кафедра электрических станций, сетей и систем электроснабжения, Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет). E-mail: korzhovav@susu.ru.

**Кирпичникова Ирина Михайловна** – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой электрических станций, сетей и систем электроснабжения, Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), г. Челябинск. E-mail: kirpichnikovaim@susu.ru.

**Круглов Геннадий Александрович** – д-р техн. наук, профессор, кафедра энергоснабжения и автоматизации технологических процессов, Институт агроинженерии, Южно-Уральский государственный аграрный университет, г. Челябинск. E-mail: bgd-susu@mail.ru.



**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>.

**Логунов Сергей Михайлович** – инженер первой категории, научно-технический центр, объединенная сервисная компания, г. Магнитогорск, Россия.

**Мбуен Венджизува** – студент, кафедра электроэнергетики и электромеханики, Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: Vmbuende@gmail.com

**Мирошниченко Алексей Александрович** – студент, кафедра электрических станций, сетей и систем электроснабжения, Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), г. Челябинск, Россия. E-mail: alex.miroshnichenko@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4594-3806>.

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

**Омельченко Евгений Яковлевич** – д-р техн. наук, доцент, профессор, кафедра автоматизированного электропривода и мехатроники, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия. E-mail: momentum2@yandex.ru.

**Парфианович Арсений Петрович** – аспирант, кафедра систем электроснабжения, Дальневосточный государственный университет путей сообщения, г. Хабаровск, Россия.

**Сидоренко Никита Сергеевич** – аспирант, кафедра вычислительной техники и программирования, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия. E-mail: Sidorenko@ausferr.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0585-0835>.

**Соломин Евгений Викторович** – д-р техн. наук, доцент, профессор, кафедра электрических станций, сетей и систем электроснабжения, Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), г. Челябинск, Россия. E-mail: solominev@susu.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4694-0490>.

**Трофимович Полина Николаевна** – старший преподаватель, кафедра электротехники, электроники и электромеханики, Дальневосточный государственный университет путей сообщения, г. Хабаровск, Россия. E-mail: eteem3@festu.khv.ru.

**Тулупов Платон Гарриевич** – аспирант, кафедра автоматизированного электропривода и мехатроники, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия. E-mail: Tulupov.pg@mail.ru.

**Храмшин Вадим Рифхатович** – д-р техн. наук, профессор, кафедра электроснабжения промышленных предприятий, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия. E-mail: hvrnmg@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0972-2803>.

**Шаббо Камил Якуб** – канд. техн. наук, доцент, кафедра электропривода и автоматизации производственных процессов, Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, Технический институт (филиал), г. Нерюнгри, Россия. E-mail: kamilshabo@rambler.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5171-835X>.

**Шелудченко Елена Евгеньевна** – магистрант, кафедра электроэнергетики и электромеханики, Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: elenka.sheludchenko@mail.ru.

**Уважаемые коллеги!**

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

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

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

**Журнал публикует научные работы по следующим рубрикам:**

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

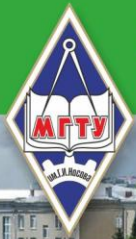
Статья должна быть набрана в шаблоне, который размещен на сайте журнала [esik.magtu.ru](http://esik.magtu.ru) в разделе «Руководство для авторов». Там же находится инструкция по его заполнению, в которой приведены требования к оформлению статей.

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





## 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 автоматики. 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.