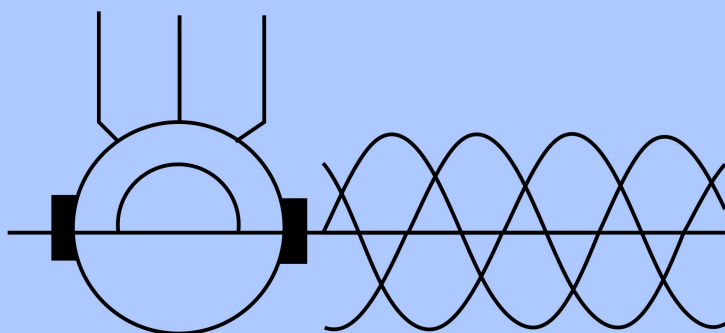
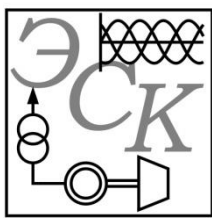


ISSN 2311-8318
ISSN (online) 2658-3151

Электротехнические Системы и Комплексы



№3(44), 2019



ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

ИЗДАЕТСЯ С ЯНВАРЯ 1996 Г.

№ 3(44), СЕНТЯБРЬ 2019

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

Редакционная коллегия

Председатель редакционной коллегии:

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

Главный редактор:

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

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

Секция энерго- и ресурсосбережения:

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

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

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

Секция электроснабжения:

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

И.Ю. Андрияшин – 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,
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. Храмина – МГТУ им. Г.И. Носова,
г. Магнитогорск, Россия.

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

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

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

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

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

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

Адрес редакции:

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

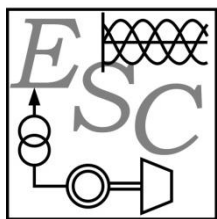
Адрес издателя:

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

Адрес типографии:

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

Выход в свет 26.09.2019. Заказ 285. Тираж 500 экз.
Цена свободная.



ELECTROTECHNICAL SYSTEMS AND COMPLEXES

PUBLISHED SINCE JAN., 1996

NO. 3(44) SEPT. 2019

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

Editorial Board

Head of the Editorial Board:

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

Editor in Chief:

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

Executive Editor:

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

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;

I.Yu. Andryushin – 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),
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, 2019

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

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

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

Founder – 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: 26.09.2019. Order 285. Circulation: 500.
Open price.

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРО- И ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА	4
<i>Бартоломей П.И., Паздерин А.А.</i> Задача потокораспределения потерь электроэнергии и поправочные коэффициенты к тарифам на передачу	4
<i>Корнилов Г.П., Баранкова И.И., Лукьянов Г.И., Карякин А.Л.</i> Расчет кратковременной дозы фликера в электрических сетях предприятий	10
<i>Николаев А.А., Ивекеев В.С., Ложкин И.А.</i> Разработка методики оценки резервов реактивной мощности статических тиристорных компенсаторов промышленных предприятий для компенсации провалов напряжения	16
<i>Федорова С.В., Шеметов А.Н.</i> Развитие диспетчеризации электрохозяйства промышленного предприятия как шаг к его цифровой трансформации	27
<i>Панарина М.С., Кушмилъ О.Е., Патшин Н.Т.</i> Автоматизированный выбор и проверка кабелей высокого напряжения при проектировании распределительных устройств подстанций средствами САПР	34
ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА	39
<i>Гасияров В.Р.</i> Способ компенсации динамических нагрузок электропривода прокатной клетки за счет опережающего увеличения скорости	39
<i>Володин Е.В., Осипов О.И.</i> Экспериментальное исследование повышающего DC-DC преобразователя	47
ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА, АВТОМАТИКА И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ	53
<i>Лукьянов С.И., Швидченко Д.В., Пишнограев Р.С., Швидченко Н.В., Красильников С.С.</i> Система управления электроприводом тянущих роликов машины непрерывного литья заготовок при деформации бочек роликов	53
ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ	63
<i>Мещеряков В.Н., Евсеев А.М., Данилова О.В., Ласточкин Д.В.</i> Вентильно-емкостная система стабилизации тока для электродуговой установки	63
ЭНЕРГО- И РЕСУРСОБЕРЕЖЕНИЕ	68
<i>Варганова А.В., Байрамгулова Ю.М., Гончарова И.Н., Кроткова О.А.</i> Технико-экономическое обоснование места установки источников распределенной генерации	68
СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	73

CONTENT

POWER ENGINEERING.....	4
<i>Bartolomey P.I., Pazderin A.A.</i> Electric Energy Loss Flow Problem and Correction Factors for Transmission Tariff	4
<i>Kornilov G.P., Barankova I.I., Lukyanov G.I. Karyakin A.L.</i> Calculation of Short-Term Flicker Value in Electric Networks Of Enterprises	10
<i>Nikolaev A.A., Ivekeev V.S., Lozhkin I.A.</i> Development of Methods for Assessing Reserves of Industrial Static Var Compensators Reactive Power for Balancing of Voltage Sags.....	16
<i>Fedorova S.V., Shemetov A.N.</i> Development of Electric Facilities Dispatching of Industrial Enterprise as a Step to its Digital Transformation	27
<i>Panarina M.S., Kushmil' O.E., Patshin N.T.</i> Automted Selection and Check of High Voltage Cables when Designing Distribution Devices of Substations by CAD	34
THEORY AND PRACTICE OF AUTOMATED ELECTRIC DRIVE.....	39
<i>Gasiyarov V.R.</i> Compensation of Dynamic Loads of the Rolling Stand Electric Drive by Means of Anticipatory Speed Increase	39
<i>Volodin E.V., Osipov O.I.</i> Experimental Research of Step-up DC-DC Converter	47
POWER ELECTRONICS, AUTOMATION AND CONTROL SYSTEMS	53
<i>Lukyanov S.I., Shvidchenko D.V., Pishnograev R.S., Shvidchenko N.V., Krasilnikov S.S.</i> Continuous Caster Pulling out Rolls Electric Drive Control System for the Case of Deformation of Roll Barrels.....	53
INDUSTRIAL ELECTRO TECHNOLOGY	63
<i>Meshcheryakov V.N., Evseev A.M., Danilova O.V., Lastochkin D.V.</i> Capacitive-Switched System of Current Stabilizing for Electric Arc Plant.....	63
ENERGY- AND RESOURCES-ECONOMY.....	68
<i>Varganova A.V., Bayramgulova Ju.M., Goncharova I.N., Krotkova O.A.</i> Technical and Economic Substantiation of the Place of Installation of Sources of Distributed Generation.....	68
INFORMATION ABOUT THE AUTHORS	73

ЗАДАЧА ПОТОКОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ И ПОПРАВочНЫЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ К ТАРИФАМ НА ПЕРЕДАЧУ

Рассматривается метод распределения потерь между узлами отпуска электрической энергии из сети на основе режима распределения потоков электроэнергии. В основе подхода лежат уравнения баланса для узлов и ветвей расчетной схемы, которые записываются для потоков и потерь электроэнергии. Метод позволяет получить распределение потерь, аналогичное методу коэффициентов адресности. На основе распределенных потерь вводятся поправочные коэффициенты к тарифу на передачу, стимулирующие потребителей к снижению потерь.

Ключевые слова: тарифы на передачу электроэнергии, потери электроэнергии, энергораспределение, балансовая задача, поправочные коэффициенты.

ВВЕДЕНИЕ

Обзор литературы показал большое разнообразие в подходах стран к формированию тарифов на передачу электрической энергии (ТПЭ) на основе различных технических показателей. Наиболее общие черты связаны с дифференциацией ТПЭ по уровням напряжения, с раздельной оплатой электрической энергии (ЭЭ) и мощности, с оплатой потерь ЭЭ [1-3]. Дополнительными оплачиваемыми показателями в различных странах могут быть реактивная энергия (мощность), географическая удаленность потребителей, время суток или сезонов года, форма графика нагрузки, показатели надежности и качества электроснабжения. Отчетные потери ЭЭ являются главным режимным показателем, на который электросетевая организация (ЭСО) может оказывать влияние и снижать стоимость передачи ЭЭ. Для снижения потерь ЭЭ необходимо создать для потребителей финансовые стимулы в рамках тарифной модели. В настоящей статье это делается за счет введения поправочных коэффициентов к ТПЭ, учитывающих выравнивание потребителем графика своей нагрузки (снижение коэффициента формы), снижение потребления реактивной энергии (снижение коэффициента мощности). Первоочередной проблемой при этом является выделение из общей величины потерь той доли, которая связана с электроснабжением конкретного потребителя.

Проблеме распределения стоимости услуг на передачу и распределения потерь в схеме сети посвящено множество работ, например [4-9]. Согласно [4] методы формирования ТПЭ делятся на две основные группы. В иностранной литературе первая группа методов определяется как «метод почтовой марки», а в отечественной литературе получил распространение термин «котловой» метод тарифообразования. Этот метод достаточно прост, но он не чувствителен к удаленности потребителей и к направлениям передачи ЭЭ. В России данный метод применяется для выравнивания ТПЭ на территории каждого субъекта. Во вторую группу входит метод МВт-милли и метод МВА-км [5-7]. Эти ме-

тоды учитывают расстояние при оплате транспорта ЭЭ. Более сложные и трудоемкие методы используют результаты потокораспределения и принцип трассировки (адресности) для рассчитанного режима работы сети [8, 9]. Считается, что это обеспечивает более справедливое ценообразование. Основным принцип, используемый в методах адресности, это распределение затрат (потерь) на графе сети пропорционально потокам мощности [8]. Настоящая методика развивает этот принцип. Основу подхода, связывающего технические и экономические параметры, образует модель энерго-стоимостного распределения (ЭСР) [10, 11]. Подход позволяет представить процесс передачи ЭЭ в виде двух взаимосвязанных транспортно-балансовых задач на графе электрической сети: распределение потоков электрической энергии и потоков стоимости. Основу технологической подсистемы образует модель энергораспределения (ЭР), которая позволяет рассчитывать распределение потоков и потерь ЭЭ для каждого элемента схемы сети, опираясь на измерения ЭЭ [12-14]. Экономическая подсистема модели позволяет рассчитать распределение потоков стоимости на той же схеме сети и определить полную и удельную стоимость передачи ЭЭ до любой точки сети, опираясь на режим энергораспределения [10,11].

В соответствии с моделью ЭСР [10] в элементные стоимости узлов и ветвей закладывается стоимость содержания и стоимость потерь ЭЭ. Элементная стоимость потерь ЭЭ определяется путем умножения элементных потерь ЭЭ на тариф, применяемый для компенсации потерь. Элементные стоимости, включающие стоимость потерь, транслируются до узлов отпуска ЭЭ или узлов потребления на основе режима энергораспределения. В данной статье принцип распределения затрат модели ЭСР использован и для распределения самих потерь ЭЭ между узлами потребления на основе расчета потокораспределения потерь.

ЗАДАЧА ПОТОКОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТЕРЬ

Используя принципы модели ЭСР, можно распределять между узлами отпуска различные типы потерь электроэнергии (мощности), и все определяется только тем, как будут сформированы значения элементных

потерь. В качестве элементарных потерь целесообразно использовать технические потери ЭЭ каждого элемента схемы сети, которые являются расчетными величинами. Если элементарные потери будут равны полным техническим потерям каждого элемента, то между узлами отпуска будут распределены технические потери. Если элементарные потери сформировать только на основе нагрузочных потерь, то распределены будут чисто нагрузочные потери. Если элементарные потери сформировать на основе «шунтовых» (постоянных) потерь, то они и будут распределены.

Модель потокораспределения потерь ЭЭ, по аналогии с моделью ЭСР, будет содержать две системы балансовых уравнений. Первая система определяет условия баланса ЭЭ в ветвях и узлах сети, то есть является моделью энергораспределения (ЭР). Вторая система содержит уравнения баланса для ветвей и узлов, записанные относительно потерь.

БАЛАНСОВАЯ МОДЕЛЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТОКОВ ЭЭ (МОДЕЛЬ ЭНЕРГОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ)

Основу математической модели ЭР образуют уравнения балансов ЭЭ, которые можно записать для всех N узлов и всех M ветвей схемы замещения электрической сети [12, 13]. В данной статье уравнения балансов будут записываться только относительно потоков активной ЭЭ. Такое допущение в рамках рассматриваемой задачи вполне оправдано, так как в соответствии с действующими нормативными документами при оплате услуг на передачу ЭЭ в РФ учитывается только активная ЭЭ (мощность).

Каждое уравнение узлового баланса ЭЭ определяет, что нулю равна сумма потоков ЭЭ W_{ij} по всем смежным узлу i ветвям из множества ω_i , узлового потока ЭЭ W_i и шунтовых потерь ЭЭ ΔW_i узла i :

$$\sum_{j \in \omega_i} W_{ij} + W_i + \Delta W_i = 0, \quad i = 1, 2, \dots, N. \quad (1)$$

Вторая группа уравнений задачи ЭР относится к балансам ЭЭ в ветвях схемы. Для каждой из M ветвей сумма потоков ЭЭ в начале ветви W_{ij} , в конце ветви W_{ji} и продольных (нагрузочных) потерь ЭЭ ΔW_{ij} данной ветви равна нулю

$$W_{ij} + W_{ji} + \Delta W_{ij} = 0, \quad ij = 1, 2, \dots, M. \quad (2)$$

В уравнениях баланса ЭЭ для узлов и для ветвей присутствуют технические потери ЭЭ ΔW_i и ΔW_{ij} , которые рассчитываются по известным выражениям [14]. При этом необходимо так сформировать расчетную схему замещения электрической сети, чтобы она корректно учитывала потери ЭЭ в продольных и поперечных элементах схемы замещения.

БАЛАНСОВАЯ МОДЕЛЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТЕРЬ ЭЭ

Балансовая модель распределения потерь ЭЭ предполагает, что произведен расчет режима ЭР и распределение нагрузочных и шунтовых потерь между элементами схемы известно. Как и в технологической модели ЭР элементами схемы являются узлы, ассоциируемые с электрическими станциями / подстанциями,

и ветви, ассоциируемые с линиями электропередачи/трансформаторами.

Далее элементарные потери узлов ΔW_i и ветвей ΔW_{ij} транслируются (переносятся) на последующие элементы схемы сети в соответствии с путями протекания потоков ЭЭ, начиная от узлов поступления ЭЭ в сеть и заканчивая узлами отпуска ЭЭ из сети, каскадно поглощая все встречающиеся на своем пути элементарные потери последующих элементов схемы. При этом на каждом элементе схемы формируются новые величины, называемые «потокосовые потери» узлов ∇W_i и ветвей ∇W_{ij} . Данные потокосовые потери являются условными математическими величинами и в отличие от элементарных потерь ΔW_i и ΔW_{ij} не связаны с физикой возникновения потерь ЭЭ. Используя элементарные и потокосовые потери, распределение ответственности нагрузочных узлов за потери можно представить в виде транспортно-балансовой задачи, в виде потоков потерь на схеме сети, то есть в виде задачи потокораспределения потерь.

Потокораспределение потерь в схеме электрической сети можно описать системой балансовых уравнений. Каждое уравнение узлового баланса определяет, что нулю равна сумма всех втекающих и вытекающих из узла потоковых потерь, то есть узлового потока потерь ∇W_i и всех потоковых потерь ∇W_{ij} по смежным ветвям множества ω_i :

$$\sum_{j \in \omega_i} \nabla W_{ij} + \nabla W_i + \Delta W_i = 0, \quad i = 1, 2, \dots, N. \quad (3)$$

Кроме того, в уравнении узлового баланса присутствует величина узловых элементарных потерь ΔW_i узла i , то есть это шунтовые потери данного узла. Аналогично можно записать уравнения баланса для потоков потерь для всех M ветвей схемы. Сумма потоковых потерь в начале ветви ∇W_{ij} и в конце ветви ∇W_{ji} равна элементарным потерям данной ветви ΔW_{ij} . Для всех M ветвей уравнения баланса потерь ЭЭ можно представить в следующем виде:

$$\nabla W_{ij} + \nabla W_{ji} - \Delta W_{ij} = 0, \quad ij = 1, 2, \dots, M. \quad (4)$$

При этом потокосовые потери в конце ветви больше, чем вначале из-за добавления элементарных (нагрузочных) потерь ветви, а поток ЭЭ, наоборот, в конце меньше, чем вначале из-за наличия этих потерь. В связи с тем, что элементарные потери всех ветвей положительны, в уравнениях баланса для ветвей перед ними ставится знак «минус». Этим потокораспределение потерь отличается от потокораспределения ЭЭ, так как в каждой ветви поток ЭЭ вначале больше, чем в конце, а потокосовые потери, наоборот, вначале меньше, чем в конце.

Сопоставление балансовых уравнений для потоков ЭЭ (1) и (2) с балансовыми уравнениями для потоковых потерь (3) и (4) показывает их структурную схожесть. Для обоих процессов выполняются условия узловых и линейных балансов, то есть сумма втекающих в узел и ветвь потоков энергии и потоков потерь равна сумме вытекающих потоков.

Для формирования системы уравнений задачи потокораспределения потерь необходимо установить

связь между потоками ЭЭ и потоками потерь. Эта связь определяется тем, что сумма втекающих в узел потоковых потерь полностью переходит в потоковые потери смежных ветвей вытекания пропорционально вытекающим потокам ЭЭ, то есть используется принцип деления потерь пропорционально потокам ЭЭ [8].

Потоковые потери ∇W_{ij}^- любой ветви отпуска ЭЭ (вытекания), смежной узлу i , определяется выражением:

$$\nabla W_{ij}^- = - \frac{W_{ij}^-}{\sum_{j \in \beta_i} W_{ij}^-} \left(\sum_{j \in \alpha_i} \nabla W_{ij}^+ + \Delta W_{ij} \right), \quad (5)$$

$$i = 1, 2, \dots, M,$$

где множества β_i и α_i определяют список ветвей отпуска «-» и приема «+» ЭЭ для узла i .

В первой круглой скобке (5) присутствует доля ЭЭ ветви ij по отношению к суммарной вытекающей ЭЭ из узла i . Во второй круглой скобке (5) присутствует сумма потоковых потерь по всем ветвям приема ЭЭ,

а также элементные потери узла i . Использование (5) обеспечивает распределение потерь в схеме сети аналогично адресному подходу [8, 9]. Решение системы линейных уравнений (3)-(5) позволяет получить потокораспределение потерь в схеме сети и тем самым распределить полные потери между узлами нагрузки. При этом отсутствует необходимость расчета матрицы коэффициентов адресности.

Далее приводится пример распределения технических потерь ЭЭ между нагрузочными узлами на основе описанной балансовой модели. На **рис. 1, а** представлен рассматриваемый в [11] фрагмент электрической сети с нанесенными на схему сети расчетными потоками ЭЭ и потерями ЭЭ, полученными на этапе расчета энергораспределения. Все расчетные потоки и потери ЭЭ являются сбалансированными, то есть для них выполняются уравнения баланса ЭЭ (1) и (2) с учетом знаков. Распределение технических потерь между нагрузочными узлами осуществляется на основе режима энергораспределения, представленного на **рис. 1, а**.

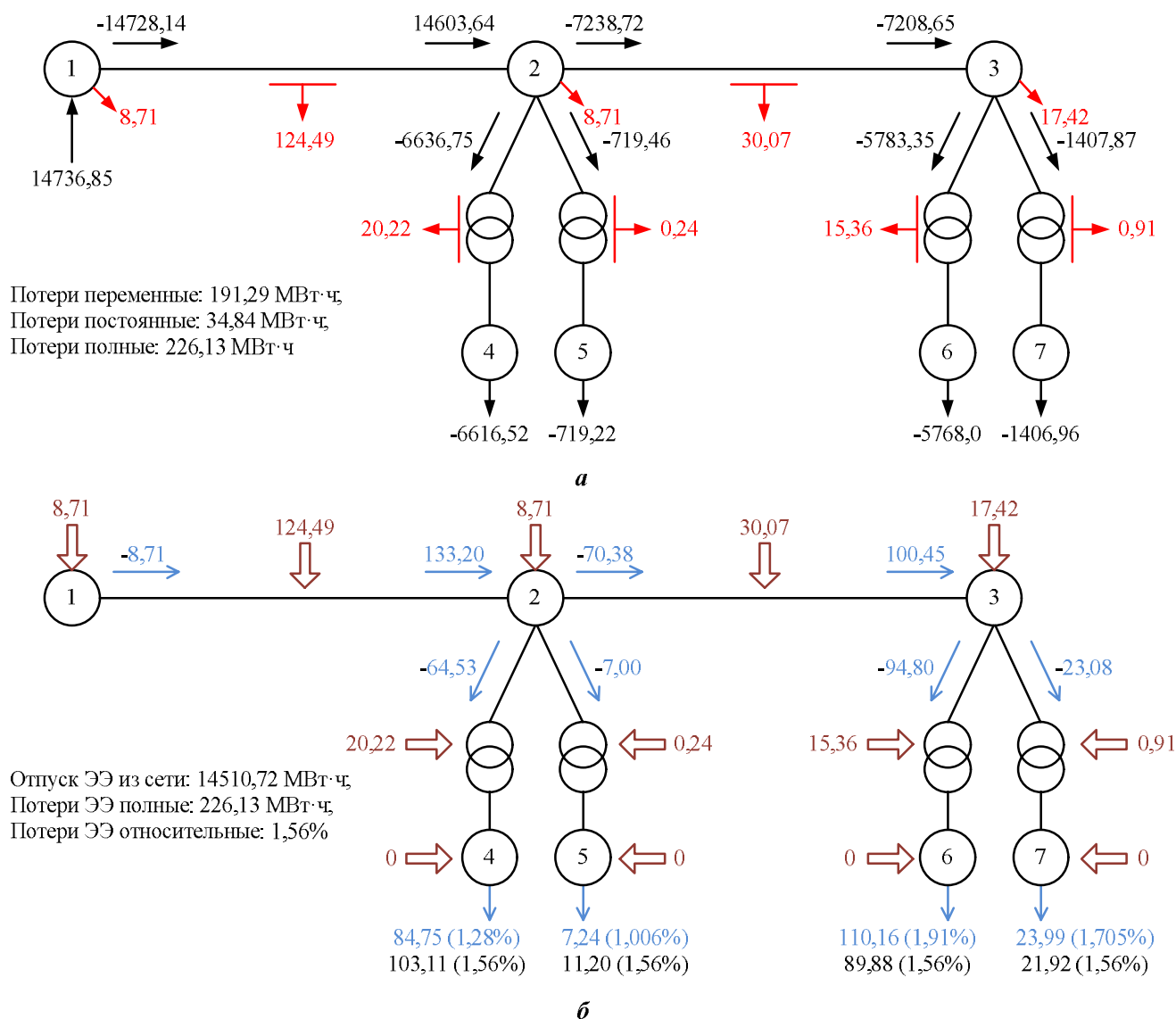


Рис. 1. Распределение на схеме электрической сети: а – расчетных потоков ЭЭ → и потерь ЭЭ ↓ (МВт·ч); б – элементных потерь ↓, потоковых потерь → (МВт·ч)

На **рис. 1, б** приведены результаты расчета потоко- распределения потерь на основе описанной балансовой

модели (3)–(5). Фигурными стрелками обозначены элементные технические потери ЭЭ для всех узлов и всех ветвей расчетной схемы, которые совпадают с расчетными потерями **рис. 1, а**. Для потоков ЭЭ (**рис. 1, а**) и потоков потерь (**рис. 1, б**) принято следующее правило: втекающие в узел потоки положительны, а вытекающие из узла потоки отрицательны. Это правило позволяет не задавать положительные направления для ветвей при формировании балансовых уравнений для потоков ЭЭ и потоков потерь.

Обычными стрелками на **рис. 1, б** обозначены потоковые потери ЭЭ. Потоковые потери ЭЭ в нагрузочных узлах 4–7 определяют распределение суммарных технических потерь 226,13 МВт·ч между узлами потребления. Потерям ЭЭ, распределенным между узлами отпуска, целесообразно поставить в соответствие термин «отпускные потери» $\Delta W_{pi}^{отп}$. На **рис. 1, б** отпускные потери расположены непосредственно под нагрузочными узлами (верхние значения). Сумма всех расчетных отпускных потерь равна суммарным техническим потерям 226,13 МВт·ч.

На **рис. 1, б** также приведены значения узловых потерь $\Delta W_{pi}^{\%}$, которые были получены путем распределения суммарных потерь пропорционально нагрузке каждого узла на основе среднего значения относительных потерь ЭЭ, которое составляет $226,13 / 14510 = 1,56 \%$. Такое распределение потерь в России применяется на практике для осуществления оплаты потерь ЭЭ. Оно не учитывает ни удаленность потребителя, ни режим работы сети. Значения потерь $\Delta W_{pi}^{\%}$, распределенных на основе относительной величины потерь в 1,56 %, расположены под значениями отпускных потерь $\Delta W_{pi}^{отп}$. Естественно, что сумма всех $\Delta W_{pi}^{\%}$ тоже равна 226,13 МВт·ч.

Следует отметить, что в узлах 5 и 6 расчетные отпускные потери $\Delta W_{pi}^{отп}$ меньше, чем потери $\Delta W_{pi}^{\%}$, полученные на основе пропорционального способа, а в узлах 7 и 8, наоборот, больше. Последнее можно объяснить тем, что представленная модель позволяет распределять потери ЭЭ между нагрузочными узлами с учетом физики процесса их возникновения, то есть с учетом режима работы сети, с учетом удаленности нагрузочных узлов от центров питания и с учетом путей протекания потоков ЭЭ, которые эти потери создают.

ПОПРАВочНЫЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ К ТАРИФУ

Поправочные коэффициенты к тарифу на передачу должны стимулировать потребителей снижать потери в сети. В основе подхода лежит положение о том, что за счет регулирования во времени своего электропотребления происходит снижение потерь ЭЭ у сетевой организации и получение ею дополнительных доходов. Определенная доля дохода η остается в распоряжении сетевой организации, а остальная доля $1-\eta$ тратится на снижение тарифа на передачу для этого потребителя. Такой механизм стимулирует к дальнейшему снижению потерь всех соседних потребителей сетевой организации.

Наиболее эффективной мерой является выравнивание во времени графика электропотребления, то есть уменьшение коэффициента формы графика нагрузки. Снижение стоимости нагрузочных потерь $\Delta C_{\Delta W}$ за счет снижения коэффициента формы графика нагрузки со

значения $k_{\phi 1}$ до значения $k_{\phi 2}$ можно представить как

$$\Delta C_{\Delta W} = (k_{\phi 1}^2 - k_{\phi 2}^2) \frac{W_p^2 + W_q^2}{t U_{cp}^2} R T_{\Delta W}, \quad (6)$$

где $T_{\Delta W}$ – тариф на компенсацию потерь; R – активное сопротивление участка сети; t – интервал времени; U_{cp} – среднее значение напряжения.

Для введения механизма надбавок и скидок за форму графика необходимо установить нормативное значение коэффициента формы $k_{\phi \text{ норм}}$, которое будет соответствовать поправочному коэффициенту к тарифу, равному единице. Если коэффициент формы потребителя $k_{\phi i}$ превышает $k_{\phi \text{ норм}}$, то такой потребитель вносит повышенный вклад в потери и по отношению к нему следует вводить надбавку к ТПЭ. В обратной ситуации потребитель способствует снижению потерь и может рассчитывать на скидку к ТПЭ. С учетом расчетных отпускных потерь $\Delta W_{pi}^{отп}$ надбавка / скидка к ТПЭ $\Delta T_i^{одн}$ за коэффициент формы будет определяться выражением

$$\Delta T_i^{одн} = \eta \alpha (k_{\phi \text{ норм}}^2 - k_{\phi i}^2) T_{\Delta W} \Delta W_{pi}^{отп}, \quad (7)$$

где коэффициент α определяет долю нагрузочных потерь в составе расчетных отпускных потерь ЭЭ.

Поправочный коэффициент к ТПЭ за коэффициент формы графика нагрузки на основе расчетных отпускных потерь i -го потребительского узла можно представить в виде

$$K_i^{\text{форм}} = 1 - \eta \alpha (k_{\phi \text{ норм}}^2 - k_{\phi i}^2) \frac{T_{\Delta W} \Delta W_{pi}^{отп}}{T_{одн} W_{pi}}. \quad (8)$$

ПОПРАВочНЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ ЗА ПОТРЕБЛЕНИЕ РЕАКТИВНОЙ ЭНЕРГИИ

По аналогии с (8) получено выражение для поправочного коэффициента, учитывающего отклонение фактического $\text{tg} \varphi_{\phi}$ от нормативного $\text{tg} \varphi_{\text{норм}}$.

$$K_i^{\text{tg} \varphi} = 1 - \eta \alpha (\text{tg}^2 \varphi_{\text{норм}} - \text{tg}^2 \varphi_{\phi i}) \frac{T_{\Delta W} \Delta W_{pi}^{отп}}{T_{одн} W_{pi}}. \quad (9)$$

В соответствии с Постановлениями Правительства РФ № 530 и № 861 покупатели электрической энергии должны соблюдать предельные соотношения потребления активной и реактивной энергии/мощности, то есть [15]

$$\text{tg} \varphi = \frac{W_q}{W_p}. \quad (10)$$

Предельные значения $\text{tg} \varphi$ установленные по классам напряжения, представлены в **таблице**.

ПРЕДЕЛЬНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ СООТНОШЕНИЯ ПОТРЕБЛЕНИЯ АКТИВНОЙ И РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

	Уровень напряжения в точке присоединения потребителя к электрической сети, кВ			
	110	35	6 – 20	0,4
$\text{tg} \varphi_{\text{нагр}}$	0,5	0,4	0,4	0,35

В случае превышения потребителем установлен-

ных значений $\text{tg}\varphi$ он устанавливает и обслуживает устройства, обеспечивающие регулирование реактивной мощности, либо оплачивает услуги по передаче ЭЭ с учетом соответствующего повышающего коэффициента к тарифу [16].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемая балансовая модель потокораспределения потерь позволяет распределять потери электроэнергии в схеме сети на основе режима энергораспределения с учетом путей протекания потоков электроэнергии конкретным потребителям и с учетом их удаленности от центров питания. На основе модели потокораспределения потерь разработаны методики введения поправочных коэффициентов к тарифам на передачу электроэнергии, которые должны стимулировать потребителей к снижению потерь.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Green R. Electricity transmission pricing: an international comparison // *Utilities Policy*. 1997. Vol. 6. №3. P. 177-184.
- ENTSO-E Overview of Transmission Tariffs in Europe: Synthesis 2016 – официальный сайт Европейского сообщества операторов магистральных сетей в области электроэнергетики (ENTSO-E European Network of Transmission System Operators for Electricity) [www.entsoe.eu].
- «Study on tariff design for distribution systems. Final Report» 20150313 Tariff report fina_revREF-E.PDF This is a document from the site ec.europa.eu.
- Baseem Khan, Ganga Agnihotri. A Comprehensive Review of Embedded Transmission Pricing Methods Based on Power Flow Tracing Techniques // *Chinese Journal of Engineering*. Volume 2013. Article ID 501587.
- Kharbas B., Fozdar M., Tiwari H. Transmission tariff allocation using combined MW-mile & postage stamp methods // *IEEE PES International Conference on Innovative smart grid Technologies – India*. Dec. 2011. P.6-11.
- Lo K.L., Hassan M.Y. Positive and negative aspects of MW-mile method for costing transmission transaction // *37th Int. Universities Power Engineering Conf. (UPEC)*. September 2002, vol.1, P. 358-362.
- Avinash D. MW-Mile method considering the cost of loss allocation for transmission pricing / D. Avinash, B. Chalapati // *2015 Conference on Power, Control, Communication and Computational Technologies for Sustainable Growth. PCCCTSG 2015*. 7503892. P. 128-131.
- Гамм А.З., Голуб И.И. Адресность передачи активных и реактивных мощностей в электроэнергетической системе // *Электричество*. 2003. № 3. С. 9.
- Бартоломей П.И., Паниковская Т.Ю. Новые процедуры распределения потерь мощности и электроэнергии // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2008. № 11-12/1. С. 50-56.
- Паздерин А.А., Паздерин А.В., Софьин В.В. Технико-экономическая модель передачи электрической энергии в сетях энергосистем // *Электричество*. 2017. №7. С. 4-12.
- Pazderin A.A., Pazderin A.V., Firsova D.A. Energy-cost flows model of electric energy distribution at an electric network // *The 11th IEEE International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering. CPE-POWERENG 2017*. Cadiz, Spain, 4-6 April 2017. №7915188. Pp. 308-312.
- Решение комплексной задачи распределения электроэнергии в энергосистеме / П.И. Бартоломей, А.О. Егоров, Е.В. Машалов, А.В. Паздерин // *Электричество*. 2007. №2. С. 8-13.
- Бартоломей П.И., Паздерин А.В. Наблюдаемость распределения потоков электрической энергии в сетях // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2004. № 9-10. С. 24-33.
- Паздерин А.В. Локализация коммерческих потерь электроэнергии на основе решения задачи энергораспределения // *Промышленная энергетика*. 2004. № 9
- Об утверждении основных положений функционирования розничных рынков электрической энергии: Постановление Правительства РФ от 31.08.2006 №530 // *Собрание законодательства РФ*. 11.09.2006. №37. С. 3876.
- Приказ Министерства энергетики РФ от 23 июня 2015 г. №380 «О Порядке расчета значений соотношения потребления активной и реактивной мощности для отдельных энергопринимающих устройств (групп энергопринимающих устройств) потребителей электрической энергии».

Поступила в редакцию 10 июля 2019 г.

INFORMATION IN ENGLISH

ELECTRIC ENERGY LOSS FLOW PROBLEM AND CORRECTION FACTORS FOR TRANSMISSION TARIFF

Petr I. Bartolomey

D.Sc. (Engineering), Professor, Automated Electrical Systems Department, Ural Federal University named after the first president of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia. E-mail: bpi@ural.ru

Andrey A. Pazderin

Graduand, Automated Electrical Systems Department, Ural Federal University named after the first president of Russia B.N. Yeltsin, the head of technological connection department of Urals branch of public joint-stock company «Federal Grid Company of Unified Energy System», Yekaterinburg, Russia. E-mail: paa_83@mail.ru

The article considers the method of distribution of losses between nodes of electricity supply from the network on the basis of the distribution of electricity flows. The approach is based on the balance equations for the nodes and branches of the design scheme, which are written for electricity flows and loss flows. The method makes it possible to obtain a loss distribution similar to the proportional sharing method without calculating the targeting coefficients. On the basis of the distributed losses,

correction factors are introduced for transmission tariffs that encourage consumers to further reduce losses.

Keywords: transmission tariff, electric energy losses, energy flow model, balance problem, correction factors.

REFERENCES

- Green R. Electricity transmission pricing: an international comparison. *Utilities Policy*. 1997, Vol. 6. No.3. Pp. 177-184.
- ENTSO-E Overview of Transmission Tariffs in Europe:

- Synthesis 2016 (ENTSO-E European Network of Transmission System Operators for Electricity) [www.entsoe.eu].
3. Study on tariff design for distribution systems. Final Report. 20150313 Tariff report fina_revREF-E.PDF This is a document from the site ec.europa.eu.
 4. Baseem Khan, Ganga Agnihotri. A Comprehensive Review of Embedded Transmission Pricing Methods Based on Power Flow Tracing Techniques Chinese Journal of Engineering. Vol. 2013. Article ID 501587
 5. Kharbas B., Fozdar M., Tiwari H. Transmission tariff allocation using combined MW-mile & postage stamp methods. IEEE PES International Conference on Innovative smart grid Technologies. India. Dec. 2011. Pp. 6-11.
 6. Lo K.L., Hassan M.Y. Positive and negative aspects of MW-mile method for costing transmission transaction. 37th Int. Universities Power Engineering Conf. (UPEC). September 2002. Vol.1. Pp. 358-362.
 7. D. Avinash, B. Chalapathi. MW-Mile method considering the cost of loss allocation for transmission pricing. 2015 Conference on Power, Control, Communication and Computational Technologies for Sustainable Growth. PCCCTSG 2015. 7503892. Pp. 128-131.
 8. Gamm A.Z., Golub I.I. Targeting of active and reactive power transfer in the electric power system. *Elektrichestvo* [Electricity]. 2003. No. 3. Pp. 9. (In Russian)
 9. Bartolomey P.I., Panikovskaya T.Y., Tihonov S.A. New procedures of distribution of power losses and electrical energy // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki*. [Proceedings of universities. Power engineering issues]. 2008. No. 11-12/1. pp. 50-56. (In Russian)
 10. Pazderin A.A., Pazderin A.V., Sofin V.V. Technical and economic model of electric energy transmission in power grid. *Elektrichestvo* [Electricity], 2017. No. 7. P. 4-12. (In Russian)
 11. Pazderin A.A., Pazderin A.V., Firsova D.A. Energy-cost flows model of electric energy distribution at an electric network. The 11th IEEE International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering. CPE-POWERENG 2017. Cadiz. Spain. P. 308-312.
 12. Bartolomey P.I., Egorov A.O., Mashalov E.V., Pazderin A.V. Solution of complex energy flow problem in an electrical network. *Elektrichestvo* [Electricity] 2007. No. 2. P. 8-13. (In Russian)
 13. Bartolomey P.I., Pazderin A.V. Observability of electric energy distribution in networks. *Izvestia vishih uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki*. [Proceedings of universities. Power engineering issues]. 2004. No. 9-10. P. 24-33. (In Russian)
 14. Pazderin A.V. Isolation of business losses of electrical energy on the basis of solving the problem of energy distribution. *Promishlennaya energetika*. [Industrial power engineering]. 2004. No. 9 (In Russian)
 15. Confirmation of the main provisions of performance of retail markets of electric energy: the Russian Federation Government regulation as of 31.08.2006 no. 530. Legislative Assembly of the RF. 11.09.2006. no. 37. Pp. 38-76. (In Russian)
 16. Order of the RF Ministry of Energy as of 23.06. 2015 no. 380 «Calculation of active and reactive power consumption for certain power receivers of electric energy consumers». (In Russian)

Бартоломей П.И., Паздерин А.А. Задача потокораспределения потерь электроэнергии и поправочные коэффициенты к тарифам на передачу // *Электротехнические системы и комплексы*. 2019. № 3(44). С. 4-9. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-3\(44\)-4-9](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-3(44)-4-9)

Bartolomey P.I., Pazderin A.A. Electric energy loss flow problem and correction factors for transmission tariff. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2019, no. 3(44), pp. 4-9. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-3\(44\)-4-9](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-3(44)-4-9)

Корнилов Г.П.¹, Баранкова И.И.¹, Лукьянов Г.И.¹, Карякин А.Л.²

¹ Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

² Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург

РАСЧЕТ КРАТКОВРЕМЕННОЙ ДОЗЫ ФЛИКЕРА В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Качество электрической энергии является составляющей электромагнитной совместимости и определяется совокупностью характеристик. Снижение качества электрической энергии приводит к причинению вреда электрооборудованию, повышает энергоемкость технологических процессов и воздействует на здоровье людей. Для предотвращения таких последствий необходимо проведение методических, технических и организационных мероприятий. Одним из показателей качества электрической энергии в соответствии с ГОСТ 32144-2013 является фликер. При этом доза фликера является наиболее сложным показателем качества электроэнергии с точки зрения вычисления. Существует отдельный государственный стандарт, в котором приведено описание структуры фликерметра, рассмотрены технические требования и методы испытания данного прибора. В статье проведен сравнительный анализ программно-аппаратных решений по оценке доз фликера на рынке РФ. Представлено разработанное программное обеспечение «Flicker» для расчета кратковременной дозы фликера и представлены основные модули работы программы. Рассмотрен алгоритм расчета по характеристикам дуговой сталеплавильной печи, позволяющий определить кратковременную дозу фликера на этапе проектирования электротехнического комплекса. Рассмотрен алгоритм ПО «Flicker» и методика расчета мгновенной и кратковременной дозы фликера по базе данных мгновенных напряжений. Представлен модуль визуального представления изменения напряжения и мгновенной дозы фликера в виде масштабируемых графиков. Дан анализ полученных результатов расчета, полученных с помощью разработанного ПО.

Ключевые слова: качество электроэнергии, колебания напряжения, фликер, мгновенная доза фликера, кратковременная доза фликера, взвешивающие фильтры, программное обеспечение «Flicker».

ВВЕДЕНИЕ

Электрическая энергия является одним из основных компонентов, необходимых для процесса производства. Качество электроэнергии оказывает значительное влияние на технико-экономические характеристики и надежность работы электрооборудования. Показатели, характеризующие качество электрической энергии, выходя за допустимые пределы в совокупности с другими факторами, приводят к экономическим потерям из-за неоптимальной работы электроприемников и увеличению брака продукции. Для оценки качества электроэнергии на территории РФ был разработан новый стандарт – ГОСТ Р 32144-13 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения», который вступил в силу с 1 мая 2014 года [1-3].

На данный момент рынок РФ представлен большим количеством анализаторов показателей качества электроэнергии, отечественных и зарубежных производителей с большим диапазоном стоимости и технических показателей. В статье рассмотрено сравнение этих анализаторов и представлен разработанный анализатор показателей фликера.

СРАВНЕНИЕ АНАЛИЗАТОРОВ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Принцип действия анализаторов качества электроэнергии (АКЭ) основан на вычислении значений измеряемых параметров путем аналого-цифрового преобразования массива мгновенных значений входных сигналов напряжения и тока. На сегодняшний день на рынке представлен широкий спектр таких приборов, которые разделяются на стационарные и переносные [3-6].

Для АКЭ, обеспечивающих проведение обследо-

ваний и оценки качества электрической энергии в соответствии с ГОСТ 30804.4.30-2013, существуют следующие классы точности:

«А» («advanced» – «повышенного типа»);

«S» («survey» – «для наблюдений»);

«B» («basic» – «начальный»).

Правильная оценка величин отдельных гармоник критична как для рынка, так и с технической точки зрения, поэтому очень важно иметь инструменты для достоверных измерений [7, 8]. Задача может быть решена при использовании анализаторов качества электроэнергии класса «А» [9, 10]. Поэтому для сравнительного анализа будем рассматривать приборы класса «А», как отечественного производства, так и зарубежного исполнения [11-14]. В **таблице** ниже представлено сравнение АКЭ, представленных на рынке.

Для рассмотрения взяты АКЭ фирм Sonel, Fluke Industrial и ООО «НПП Прорыв». Проведенный анализ показал, что АКЭ первых двух производителей имеют высокую стоимость, АКЭ PQM-702 ограничен комплектом поставки, а у FLUKE 435 II отсутствует первичная поверка, что, в свою очередь, повышает их базовую стоимость. В сравнении с ними Прорыв Т-АКТ800 имеет стоимость ниже, но конструктивные особенности, такие как металлический корпус, объем памяти и отсутствие дисплея, снижают удобство использования.

Проведенный анализ показал, что устройства представленные на рынке, имеют ряд своих недостатков, главным среди которых является цена. Поэтому предложено разработать программный продукт, позволяющий проводить измерение фликера в соответствии с требованиями нормативных документов, как в условиях эксплуатации действующего оборудования, так и на стадии проектирования, с минимальными затратами.

Анализаторы качества электроэнергии

№ п/п	Производитель	Модель	Стоимость (руб)	Преимущества	Недостатки
1	Sonel, Польша	PQM-702	> 328000	1.защита корпуса IP65; 2.возможна установка непосредственно на ЛЭП; 3.наличие внутреннего аккумулятора; 4.наличие первичной поверки; 5.диапазон рабочих температур; 6.синхронизация времени; 7.соответствие классу «А»	1.отсутствие полноценного дисплея; 2.большой размер корпуса; 3.токовые клещи приобретаются отдельно; 4.высокая стоимость
2	Fluke Industrial, США	FLUKE 435 II	>455000	1.высокая точность измерений; 2.высокое качество комплектующих; 3.синхронизация времени; 4.соответствие классу «А»	1.отсутствие первичной поверки; 2.диапазон рабочих температур; 3.высокая стоимость
3	ООО «НПП Прорыв», Россия	Прорыв Т-А-КТ800	>122000	1.наличие первичной поверки; 2.диапазон рабочих температур; 3.масса-габаритные показатели; 4.синхронизация времени; 5.соответствие классу «А»; 6.стоимость	1.отсутствие дисплея; 2.металлический корпус; 3.необходимо наличие ПК для задания параметров измерений; 4.упрощенный интерфейс ПО; 5.ограничение по памяти

АНАЛИЗАТОР ПОКАЗАТЕЛЕЙ ФЛИКЕРА «FLICKER»

Анализатор качества электроэнергии, а именно показателей фликера «Flicker» разработан на базе лабораторий «МГТУ им. Г.И. Носова». Пользовательский интерфейс представлен на **рис. 1**.

Для оценки кратковременной дозы фликера на стадии проектирования электросети предприятия данный программный продукт имеет вкладку «Мат. модель». В основу алгоритма работы этой вкладки заложена методика, разработанная Новоселовым Н.А., Николаевым А.А и Корниловым Г.П. [5]. Суть данной методики заключается в определении плотности распределения вероятности колебаний напряжения по исходным данным установки дуговой сталеплавильной печи (ДСП), таких как сопротивление системы, номинальное напряжение, мощность печного трансформатора и номинальный ток печи. Как заявлено авторами, данный метод расчета имеет максимальную погрешность 2,7%, что доказывает достаточную точность и возможность использования для оценки кратковременной дозы фликера. Стоит отметить, что, как видно на **рис. 1**, для расчета необходимы такие параметры, как временной интервал и требуемое количество значений. Из определения кратковременной дозы фликера первый параметр по умолчанию задается равным 10 мин, а рекомендуемое количество значений равно 6000. На **рис. 2** представлен результат работы вкладки «Мат. модель» разработанного ПО.

Данный расчет фликера не позволяет произвести оценку на введенном в эксплуатацию и функционирующем объекте. Для такого случая предусмотрена дополнительная вкладка «БД», которая позволяет производить расчет мгновенного и кратковременного фликера, по имеющейся базе напряжений. Базой данной для такого расчёта выступает таблица данных, записанная в виде Excel файлов с разрешением *.xls или *.xlsx. В алгоритм работы вкладки «БД» заложена методика, по которой вначале определяются мгновенный фликер для линейного напряжения, а затем с помощью блока статистической обработки (классификатора) рассчитывается кратковременная доза

фликера. На **рис. 3** представлена блок-схема расчета кратковременной дозы фликера по действующему линейному напряжению, реализованная в разработанном ПО «Flicker».

Рис. 1. Пользовательский интерфейс ПО «Flicker»

Рис. 2. Результат работы вкладки «Мат. модель»

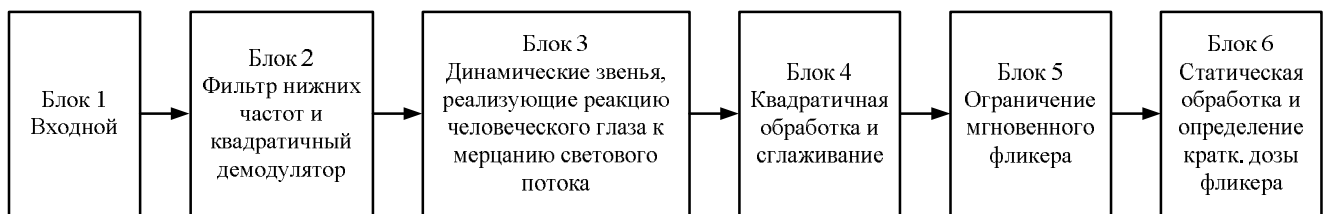


Рис. 3. Блок-схема расчёта кратковременной дозы фликера вкладки «БД»

Загрузка базы выполняется с помощью блока 1. При этом пользователю необходимо указать характеристики напряжения: действующее/мгновенное, линейное/фазное. После чего данный блок выполняет расчет приведения напряжения к действующему линейному и производит приведение значений к относительным единицам, рассчитываемых за половину периода питающего напряжения. Далее значения поступают на блок 2, где сначала производится фильтрация нижних частот с усреднением сигнала за 16 периодов промышленной частоты. В качестве фильтра выступает апериодическое звено с постоянной времени 0,32 с. Кроме того, блок 2 выполняет работу квадратичного демодулятора, после чего значения поступают на блок 3, который представлен взвешивающими фильтрами с эквивалентной передаточной функцией, представленной ниже.

$$W_{\text{рез}}(p) = \frac{1}{1 + \frac{p}{\omega_4}} \cdot \frac{1 + \frac{p}{\omega_2}}{1 + \frac{p}{\omega_3}} \cdot \frac{K\omega_1 p}{p^2 + 2\lambda p + \omega_1^2}, \quad (1)$$

где $\omega_1=2\pi 9,15494$; $\omega_2=2\pi 2,27979$; $\omega_3=2\pi 1,22535$; $\omega_4=2\pi 21,9$; $K=1,74802$; $\lambda=2\pi 4,05981$.

Частотная характеристика (рис. 4) блока 3 является центрированной относительно частоты 8,8 Гц, на которой восприятие человеком колебаний светового потока является максимальной. Таким образом, фильтры выполняют взвешивание колебаний напряжения в соответствии с чувствительностью цепи «лампа-глаз-мозг».

После блока 3 выполняется сглаживание с помощью фильтра в блоке 4, представленного апериодическим звеном с постоянной времени 0,3 с. И там же производится квадратичная обработка. На данном этапе происходит фиксация мгновенных значений фликера с необходимой функцией их ограничения, т.к. в первые секунды анализатора происходят чрезмерные всплески. За данное ограничение отвечает блок 5, в котором величина уставки ограничения принята на уровне 400 о.е. Следующий блок 6 отвечает за классификацию, определение интегральной вероятности и расчет кратковременной дозы фликера. Для выполнения классификации производится разбиение амплитуды сигнала, характеризующего уровень фликера, на 100 классов, которым соответствуют определенные диапазоны сигнала (рис. 5). Каждый раз, когда уровень фликера достигает определенного значения, счетчик соответствующего класса добавляет единицу к имеющемуся числу, таким образом, получается функция частотного распределения значений.

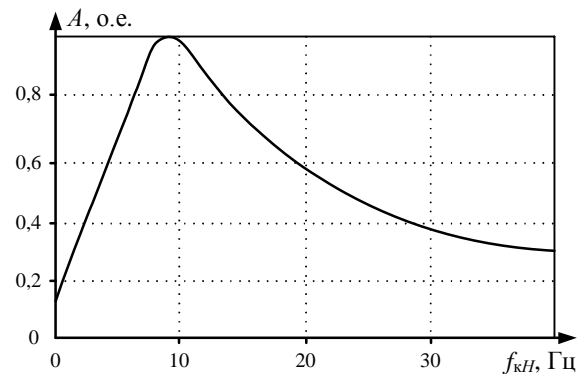


Рис. 4. Амплитудно-частотная характеристика блока 3

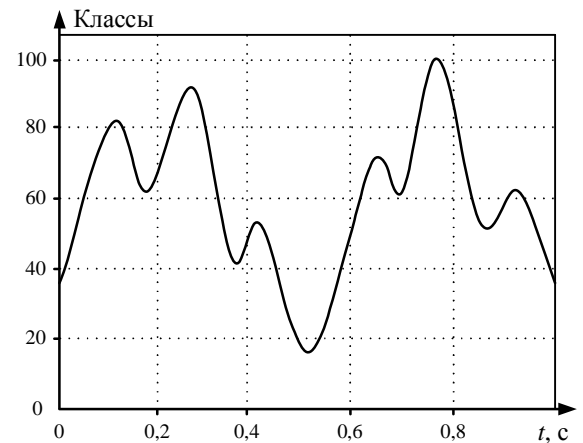


Рис. 5. Классификация значений мгновенного фликера

Выполнив классификацию, ПО «Flicker» производит определение интегральной вероятности функции частотного распределения мгновенного фликера и выполняет статистический анализ, который заключается в определении уровня фликера, соответствующего интегральной вероятности, равной: 0,1; 0,7; 1,0; 1,5; 2,2; 3,0; 4,0; 6,0; 8,0; 10,0; 13,0; 17,0; 30,0; 50,0; 80,0 %. Далее производится расчет сглаженных уровней фликера по следующим формулам:

$$\begin{aligned} P_{1s} &= \frac{P_{sti0,7} + P_{sti1,0} + P_{sti1,5}}{3}; \\ P_{3s} &= \frac{P_{sti2,2} + P_{sti3,0} + P_{sti4,0}}{3}; \\ P_{10s} &= \frac{P_{sti6,0} + P_{sti8,0} + P_{sti10} + P_{sti13} + P_{sti17}}{5}; \\ P_{50s} &= \frac{P_{sti30} + P_{sti50} + P_{sti80}}{3}, \end{aligned} \quad (2)$$

где P_{1s} , P_{3s} , P_{10s} , P_{50s} – значения сглаженного уровня фликера при интегральной вероятности, равной 1, 3, 10, 50 %, соответственно.

В завершении работы блок 6 определяет кратковременную дозу фликера:

$$P_{st} = \sqrt{P};$$

$$P = 0,0314P_{sti0,1} + 0,0525P_{1s} + 0,0657P_{3s} + 0,28P_{10s} + 0,08P_{50s}. \quad (3)$$

Результат работы вкладки «БД» представлен на рис. 6. Как видно из рисунка, для удобства представления и анализа результатов данные выводятся в табличном виде.

Для визуализации полученных результатов вкладки «БД» в ПО «Flicker» реализована демонстрация графиков (рис. 7), в которых отображаются исследуемое напряжение, мгновенный фликер и интегральная вероятность. Для упрощения исследования графиков добавлена функция масштабирования.

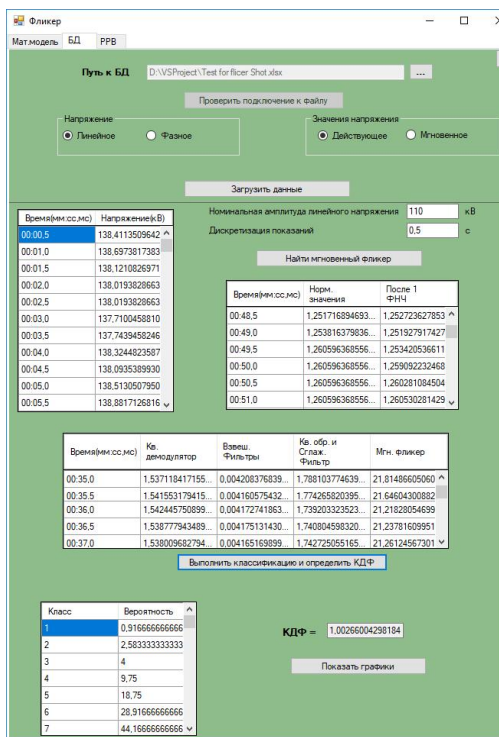


Рис. 6. Результат работы вкладки «БД»

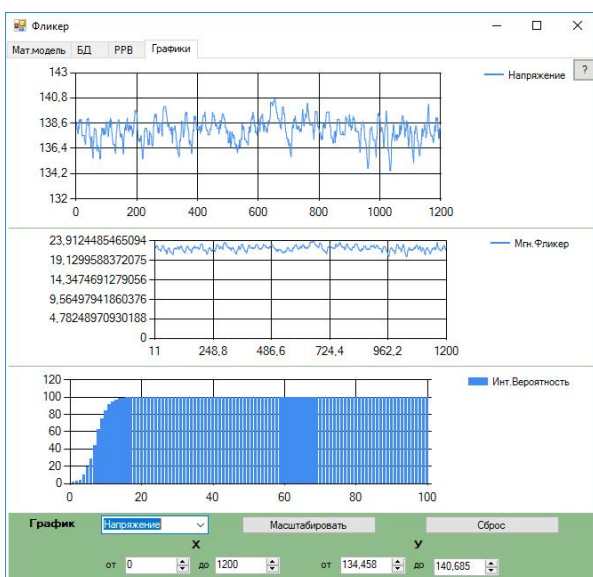


Рис. 7. Вкладка отображение графиков полученных результатов вкладки «БД»

Для проверки адекватности разработанного ПО проводилось сравнение полученных результатов с результатами моделирования в среде Matlab. Как показал анализ, представленное ПО полностью соответствует методике расчета кратковременной дозы фликера. Стоит отметить, что скорость работы ПО меняется в зависимости от входного массива, записанного в базу данных напряжений. Поэтому для расчета длительной дозы фликера рекомендуется произвести расчет кратковременной дозы фликера на последовательных интервалах времени и выполнить дальнейшее вычисление в соответствии с методикой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Источниками колебаний напряжения в большинстве случаев являются потребители с резкопеременным режимом работы, который характеризуется быстрыми изменениями активной и реактивной мощностей. Такое колебание напряжения может привести к появлению мерцаний освещения, находящихся в одной локальной электросети, и к появлению фликера. Влияние фликера на людей зависит не только от индивидуального восприятия данного явления человеком, но и от технических аспектов, например, характеристик ламп, которые подвергаются воздействию колебаний напряжения в электрической сети. Поэтому для оценки фликера был разработан ГОСТ, в соответствии с которым были разработаны и представлены на рынке различные устройства для оценки качества электроэнергии. Среди таких устройств можно отметить такие существенные недостатки, как цена и оценка показателей фликера только по эксплуатируемой сети. Поэтому разработано ПО «Flicker», позволяющее проводить оценку как по имеющейся базе значений напряжений, так и по параметрам комплекса ДСП. Представленное ПО в статье компенсирует известные имеющиеся недостатки оборудования. Стоит отметить, что заложенная методика не учитывает различную чувствительность ламп к колебаниям напряжения, кроме того алгоритмы, заложенные в программный продукт, не позволяют проводить измерение показателей фликера в реальном времени, поэтому продолжают работы по совершенствованию разработанного ПО «Flicker».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карташев И.И., Тульский В.Н. Управление качеством электроэнергии / под ред. Ю.В. Шарова. М.: Издательский дом МЭИ, 2006. 320 с.
2. ГОСТ Р 51317.4.15-2012. Совместимость технических средств электромагнитная. Фликерметр. Функциональные и конструктивные требования. М.: Стандартинформ, 2014. 38 с.
3. ГОСТ 30804.4.30-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Методы измерений показателей качества электрической энергии. М.: Стандартинформ, 2014. 57 с.
4. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Стандартинформ, 2014. 20 с.
5. Новоселов Н.А., Николаев А.А., Корнилов Г.П. Анализ показателей качества электроэнергии при проектировании систем электроснабжения дуговых сталеплавильных печей малой мощности [Электронное издание]. Магнитогорск, 2017.

6. Варианты построения системы автоматического регулирования распределения долей энергетических ресурсов в дуговых печах/ Г.П. Корнилов, А.А. Николаев, П.А. Шулепов, О.И. Петухова // Электротехнические системы и комплексы. 2017. №4(37). С. 32-37.
7. Храмшин Т.Р., Абдулвелеев И.Р., Корнилов Г.П. Обеспечение электромагнитной совместимости мощных электротехнических комплексов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2015. Т. 15. №1. С. 82-93.
8. Разработка математической модели анализатора качества электроэнергии в соответствии с ГОСТ 54149-2010 на базе программного пакета Matlab с приложением Simulink для анализа качества напряжения в системах электроснабжения мощных дуговых сталеплавильных печей / А.А. Николаев, Г.П. Корнилов, А.А. Карпеш, Е.Д. Спирова // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. 2014. Т. 2. С. 91-95.
9. Корнилов Г.П., Николаев А.А., Храмшин Т.Р. Моделирование электротехнических комплексов промышленных предприятий: учебное пособие. Магнитогорск: Магнитогорск гос. техн. ун-т им. Г.И. Носова, 2014. 239 с.
10. Ограничение провалов напряжения в системах электроснабжения промышленных предприятий/ Г.П. Корнилов, А.Ю. Коваленко, А.А. Николаев, И.Р. Абдулвелеев, Т.Р. Храмшин // Электротехнические системы и комплексы. 2014. №2(23). С. 44-48.
11. Экспериментальные исследования электромагнитной совместимости современных электроприводов в системе электроснабжения металлургического предприятия / А.А. Николаев, Г.П. Корнилов, Т.Р. Храмшин, Г.В. Никифоров, Ф.Ф. Муталлапова // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2016. Т. 14. №4. С. 96-105.
12. Особенности моделирования дуговой сталеплавильной печи как электротехнического комплекса / Г.П. Корнилов, А.А. Николаев, Т.Р. Храмшин, Т.Ю. Вахитов, И.А. Якимов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2015. №1. С. 76.
13. Лисицкий К.Е. Совершенствование методов оценки фликера в электрических сетях: дис. ... канд. техн. наук 05.14.02 / Лисицкий Константин Евгеньевич, Братск, 2017.
14. G. Shen, D. Xu, L. Cao, and X. Zhu. «An improved control strategy for grid-connected voltage source inverters with an LCL-filter», IEEE Trans. Power Electron., vol. 23, no. 4, pp. 1899–1906, Jul. 2008.

Поступила в редакцию 19 марта 2019 г.

INFORMATION IN ENGLISH

CALCULATION OF SHORT-TERM FLICKER VALUE IN ELECTRIC NETWORKS OF ENTERPRISES

Gennadiy P. Kornilov

D.Sc. (Engineering), Professor, Head of the Department of Electric Power Supply of Industrial Enterprises, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: korn_mgn@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2451-3850>

Inna I. Barankova

D.Sc. (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Computer Science and Information Safety Engineering, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: inna_barankova@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6077-6164>

Georgy I. Lukyanov

Post-graduate student, Computer Science and Information Safety Engineering Department, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: decorsi@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7010-2243>

Alexander L. Karyakin

D.Sc. (Engineering), Senior Research Scientist, Head of the Department of Mining Enterprise Electrification, the Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russia.

The quality of electrical energy is a component of electromagnetic compatibility and is determined by a set of characteristics. Deterioration in the quality of electrical energy causes damage to electrical equipment, increases the energy intensity of technological processes and affects people's health. To prevent such consequences, it is necessary to conduct methodological, technical and organizational measures. One of the indicators of the quality of electrical energy in accordance with GOST 32144-2013 is a flicker. In this case, the flicker value is the most difficult indicator of the quality of electricity in terms of calculation. There is a special state standard in which a description of the structure of the flickermeter is given, the technical requirements and test methods for this device are considered. The article provides a comparative analysis of software and hardware solutions for assessing the flicker value on the Russian market. The developed software "Flicker" for the calculation of the short-term flicker value is presented and the main modules of the program are presented. The algorithm of

calculation according to the characteristics of an electric steel-smelting furnace is considered, which allows determining the short-term flicker value at the design stage of an electrical engineering complex. The Flicker software algorithm and the method for calculating the instant and short-term flicker value using the database of instantaneous voltages were reviewed. A module for visual presentation of voltage changes and instantaneous flicker values in the form of scalable graphs is presented. The analysis of the obtained calculation results obtained using the developed software is given.

Keywords: power quality, voltage fluctuations, flicker, instantaneous flicker value, short-term flicker value, weighing filters, «Flicker» software.

REFERENCES

1. Kartashev I.I., Tulsy V.N. *Upravlenie kachestvom ehlektroehnergii* [Management of the quality of electricity] // un-

- der the editorship of Yu.V. Sharov. Moscow.: Publishing House of MEI, 2006. 320 p. (In Russian)
2. GOST R 51317.4.15-2012. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Flicker meter. Functional and structural requirements/ Moscow: Standardinform, 2014. 38 p. (In Russian)
 3. GOST 30804.4.30-2013. Electric Energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Methods for measuring the quality of electrical energy. Moscow: Standardinform, 2014. 57 p. (In Russian)
 4. GOST 32144-2013. Electrical energy. Electromagnetic hardware compatibility. Quality standards for electrical energy in general-purpose power supply systems. Moscow: Standardinform, 2014. 20 p. (In Russian)
 5. Novoselov N.A., Nikolaev A.A., Kornilov G.P. Analysis of power quality indicators when designing power supply systems for low-power arc steel-smelting furnaces [Electronic Edition] // Magnitogorsk, 2017. (In Russian)
 6. Kornilov G.P., Nikolaev A.A., Shulepov P.A., Petukhova O.I. Options for building a system of automatic control of the distribution of shares of energy resources in arc furnaces // *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical systems and complexes]. 2017. No. 4 (37). P. 32-37. (In Russian)
 7. Khamshin T.R., Abdulvelev I.R., Kornilov G.P. Ensuring electromagnetic compatibility of powerful electrical systems // *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika* [Bulletin of the South Ural State University. Series: Energy]. 2015. Vol. 15. No. 1. P. 82-93. (In Russian)
 8. Nikolaev A.A., Kornilov G.P., Karpesh A.A., Spierova E.D. Development of a mathematical model of an analyzer of power quality in accordance with GOST 54149-2010 based on the Matlab software package with simulink application for analyzing the voltage quality in power supply systems of high-power arc steel-smelting furnaces // *Aktualnye problemy sovremennoy nauki, tekhniki i obrazovaniya* [Actual problems of modern science, technology and education]. 2014. Vol. 2. P. 91-95. (In Russian)
 9. Kornilov G.P., Nikolaev A.A., Khamshin T.R. *Modelirovanie ehlektrotekhnicheskikh kompleksov promyshlennykh predpriyatij* [Modeling of electrotechnical complexes of industrial enterprises] // G. I. Nosov Magnitog. state tech. unty. Magnitogorsk: MSTU, 2014. 239 p. (In Russian)
 10. Kornilov G.P., Kovalenko A.Yu., Nikolaev A.A., Abdulvelev I.R., Khamshin T.R. Restriction of voltage dips in power supply systems of industrial enterprises // *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical systems and complexes]. 2014. No. 2(23). P. 44-48. (In Russian)
 11. Nikolaev A.A., Kornilov G.P., Khamshin T.R., Nikiforov G.V., Mutallapova F.F. Experimental studies of electromagnetic compatibility of modern electric drives in the power supply system of a metallurgical enterprise // *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta* [Vestnik of Magnitogorsk State Technical University]. 2016. Vol. 14. No. 4. P. 96-105. (In Russian)
 12. Kornilov G.P., Nikolaev A.A., Khamshin T.R., Vahitov T.Yu., Yakimov I.A. Features of modeling arc steel-smelting furnace as an electro-technical complex // *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta* [Vestnik of Magnitogorsk State Technical University]. 2015. No. 1. P. 76. (In Russian)
 13. Lisitsky K.E. *Sovershenstvovaniye metodov otsenki flikera v elektricheskikh setyakh. Kand. Diss.* [Improving methods for assessing flicker in electrical networks. Ph.D. Diss.]. Bratsk, 2017.
 14. G. Shen, D. Xu, L. Cao, and X. Zhu, «An improved control strategy for grid-connected voltage source inverters with an LCL-filter» IEEE Trans. Power Electron., vol. 23, no. 4, pp. 1899–1906, Jul. 2008.

Корнилов Г.П., Баранкова И.И., Лукьянов Г.И., Карякин А.Л. Расчет кратковременной дозы фликера в электрических сетях предприятий // *Электротехнические системы и комплексы*. 2019. № 3(44). С. 10-15. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-3\(44\)-10-15](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-3(44)-10-15)

Kornilov G.P., Barankova I.I., Lukyanov G.I., Karyakin A.L. Calculation of Short-Term Flicker Value in Electric Networks Of Enterprises. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2019, no. 3(44), pp. 10-15. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-3\(44\)-10-15](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-3(44)-10-15)

Николаев А.А., Ивекеев В.С., Ложкин И.А.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ РЕЗЕРВОВ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ СТАТИЧЕСКИХ ТИРИСТОРНЫХ КОМПЕНСАТОРОВ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ ДЛЯ КОМПЕНСАЦИИ ПРОВАЛОВ НАПРЯЖЕНИЯ

В рамках данной работы разработана методика оценки резервов реактивной мощности статических тиристорных компенсаторов (СТК) промышленных предприятий для компенсации внешних провалов напряжения, позволяющая на основе имеющихся исходных данных о системе электроснабжения (СЭС) и параметрах электрических нагрузок электроприемников определить среднестатистическую величину компенсируемого провала напряжения. При выполнении исследований в качестве исходной информации были использованы экспериментальные данные о провалах напряжения на действующем металлургическом предприятии ЗАО «ММК Metalurji», г. Искендерун, Турция. Так, на примере данного предприятия было исследовано негативное влияние провалов напряжения на надежность работы чувствительных электроприемников, таких как преобразователи частоты (ПЧ) с активными выпрямителями (АВ) и предложена методика их компенсации за счет использования резервов мощных СТК дуговых сталеплавильных печей (ДСП). Полученные результаты позволили ввести понятие коэффициента демпфирования, который определяется как среднее относительное отклонение между требуемой реактивной мощностью при однофазном и трехфазном провалах напряжения. Проведенный математический анализ зависимости требуемой реактивной мощности СТК от величины провалов напряжения позволил разработать новый подход в проектировании внутрицеховых систем электроснабжения. Полученные результаты исследований имеют большую практическую значимость для действующих компактных металлургических предприятий, включающих в себя электросталеплавильное и прокатное производство.

Ключевые слова: дуговая сталеплавильная печь, статический тиристорный компенсатор, провалы напряжения, компенсация реактивной мощности, качество электроэнергии.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из важнейших задач электроснабжения промышленных предприятий является обеспечение качества электроэнергии, отвечающего нормам ГОСТ 32144-2013 [1]. Несоответствие того или иного показателя качества допустимому значению влечет за собой выход из строя электрооборудования, увеличение потерь активной мощности, нарушение нормального технологического процесса, что приводит, в свою очередь, к значительному материальному ущербу. В частности, провалы напряжения, возникающие в энергосистеме металлургических предприятий, являются причиной аварийных остановок приводов листовых и сортовых прокатных станов, а также вспомогательных агрегатов непрерывной обработки полосы, которые чувствительны к изменению уровня напряжения в питающей сети [2]. С целью детальной проработки данной проблемы был проведен анализ влияния провалов напряжения на работу листового стана горячей прокатки 1750 ЗАО «ММК Metalurji» (г. Искендерун, Турция), где главные электроприводы клетей построены на базе многоуровневых преобразователей частоты с активными выпрямителями. В ходе исследований было выявлено, что провалы напряжения по одной фазе глубиной 30% и длительностью 200 мс могут привести к отключению ПЧ из-за снижения напряжения в звене постоянного тока, а также из-за увеличения токов, потребляемых АВ из питающей сети [3].

В настоящее время большинство электроприводов прокатных станов выполнены на базе мощных высоковольтных синхронных (асинхронных) двигателей и преобразователей частоты с активными выпрямителями (ПЧ-АВ). Имеющиеся на данный момент системы

управления преобразователей не адаптированы к несимметричным провалам напряжения, возникающим во внешней питающей сети. В выполненных ранее исследованиях были предложены мероприятия по компенсации провалов напряжения за счет использования резервов статических тиристорных компенсаторов, функционирующих в системах электроснабжения дуговых сталеплавильных печей, при условии параллельной работы электросталеплавильного комплекса и преобразователей частоты с активными выпрямителями прокатного стана. Также в предыдущих работах проводились исследования возможности параллельной работы ПЧ-АВ в условиях колебаний частоты, создаваемых ДСП [4]. Как показывает практика, заводом-изготовителем поставляются СТК с завышенным значением установленной реактивной мощности, что, в свою очередь, позволяет использовать их как средство компенсации провалов напряжения и поддержания номинального уровня напряжения во внутризаводской сети путем внесения изменений в алгоритмы системы управления СТК [5].

В данной статье приводится разработка общей методики оценки использования резервов реактивной мощности СТК промышленных предприятий для компенсации провалов напряжения на примере металлургического завода ЗАО «ММК Metalurji».

Основные сведения о системе электроснабжения металлургического завода ЗАО «ММК Metalurji»

Как известно, протекание переменного тока по ЛЭП сопровождается возникновением индуктивного сопротивления, которое обуславливает разность напряжений в начале и конце линий. Для определения потерь напряжения в ЛЭП рассмотрим однолинейную схему электроснабжения промышленного предприятия ЗАО «ММК Metalurji» (рис. 1).

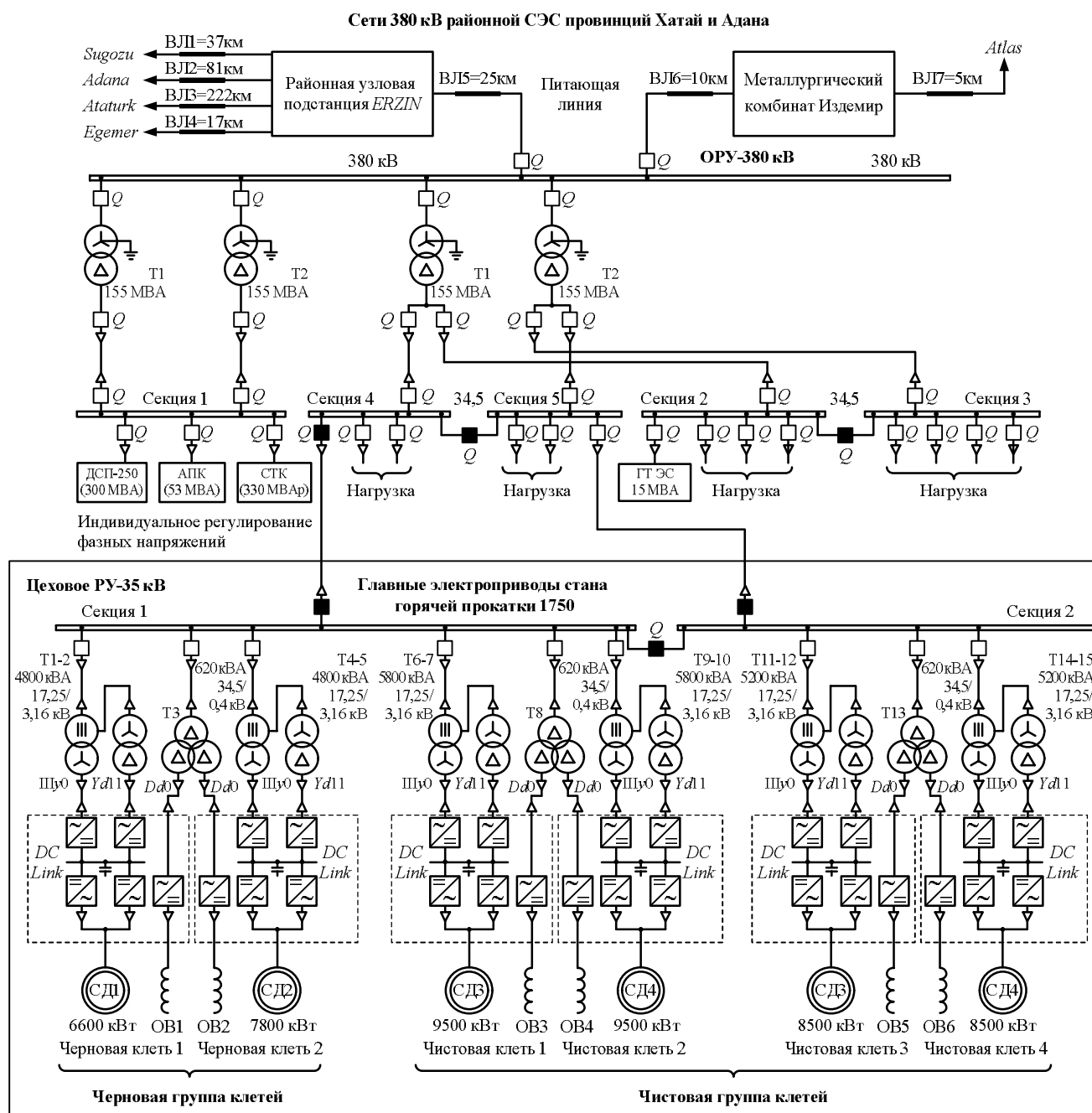


Рис. 1. Однолинейная схема электроснабжения металлургического завода ЗАО «ММК Metalurji»

Географически завод ЗАО «ММК Metalurji» расположен в районе провинций Хатай и Адана, где он получает питание от районной электроэнергетической системы посредством воздушных линий электропередач (ВЛЭП) напряжением 380 кВ. На главной понижающей подстанции (ГПП) завода установлены через 4 сетевых трансформатора 380/34,5 кВ номинальной мощностью 155 МВА. От данных трансформаторов запитаны основные производственные установки. Основными электроприемниками электросталеплавильного цеха (ЭСЦ) являются сверхмощная ДСП-250 (300 МВА) и агрегат печь-ковш (АПК) (45 МВА). Также на ГПП установлен СТК, присоединённый к распределительному устройству 34,5 кВ через 3 элегазовых выключателя, имеющий в своем составе тиристорно-реакторную группу (ТРГ) и фильтрокомпенсирующие цепи (ФКЦ), состоящие из фильтров высших

гармоник (2-й, 3-й, 4-й, 5-й и 6-й). Номинальная мощность ТРГ и ФКЦ составляет 330 МВАр.

Особенностью электроснабжения данного предприятия являются частые провалы напряжения, возникающие во внешней питающей сети. Данная проблема оказывает существенное влияние на бесперебойную работу электроприёмников прокатных станов и других агрегатов непрерывного действия. Стоит отметить, что возникновение провалов напряжения носит сезонный характер, поэтому для выявления основных причин отказов электрооборудования в предыдущих работах был проведен анализ зависимости провалов напряжения от возникающих грозных разрядов. В качестве исходных данных для анализа были использованы сведения о провалах напряжения, зафиксированные на шинах РУ-380 и 34,5 кВ ГПП, а также на цеховых распределительных пунктах (РП) прокатного стана 1750

ЗАО «ММК Metalurji» за несколько лет, по которым были восстановлены реальные осциллограммы мгновенных значений фазных напряжений на секциях 380 и 34,5 кВ. Также была получена информация о погодных условиях за аналогичный период времени. Результаты проведенных исследований показали, что возникновение аварийных ситуаций, связанных с перебоями в электроснабжении, в 50% случаев возникали по причине атмосферных осадков, сопровождающихся грозовыми разрядами [6].

При разработке мероприятий по компенсации провалов напряжения на шинах 34,5 кВ необходимо учитывать тот факт, что обмотки сетевых трансформаторов, установленных на ГПП завода имеют схему соединения «звезда-треугольник». В связи с этим характер провала напряжения, возникающего в сети 380 кВ, после трансформации на низкую сторону меняется. Векторные диаграммы напряжений на секциях 380 и 34,5 кВ, иллюстрирующие этот процесс, представлены на рис. 2.

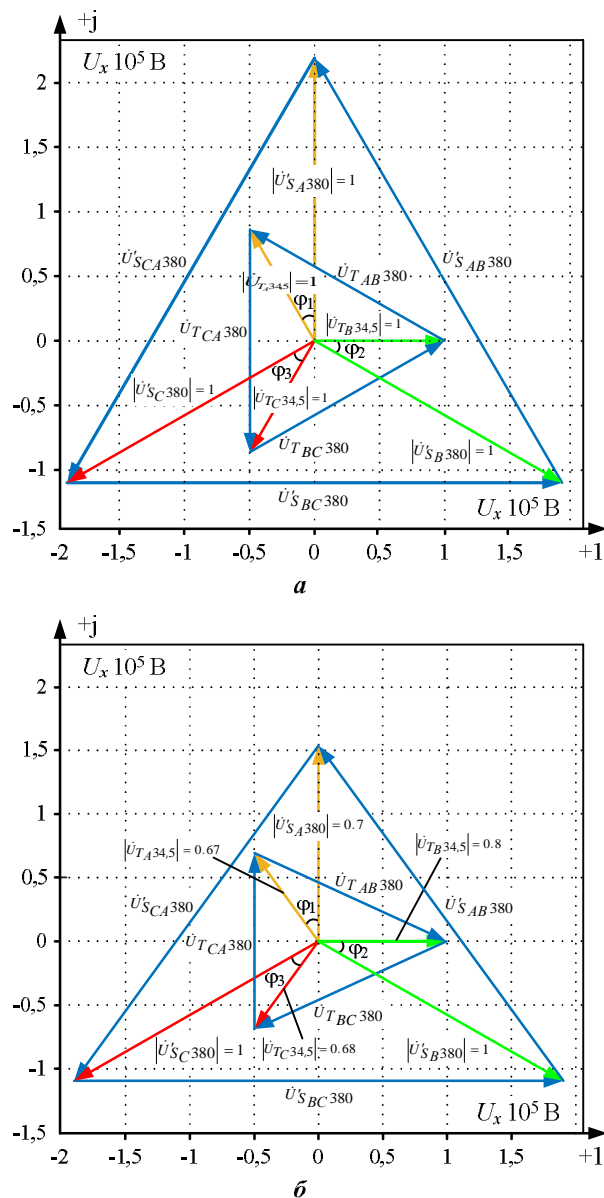


Рис. 2. Векторные диаграммы напряжений на секциях 380 и 34,5 кВ при нормальной работе сети (а) и при однофазном провале напряжения в питающей сети 380 кВ (б)

Из рис. 2 видно, что при переходе на секцию 34,5 кВ характер провала напряжения меняется: из однофазного провала с глубиной 30 % на напряжении 380 кВ в электрической сети 34,5 кВ возникает двухфазный провал напряжения глубиной 30 % и однофазный 20%. Численные значения представлены в таблице.

В предыдущих исследованиях при анализе уровней провалов напряжения были учтены статистические данные о погодных условиях в данном регионе и данные о частоте возникновения провалов напряжения. Было показано, что средняя величина $\delta U = 25,5 \%$, $t_{cp} = 67,5$ мс, при этом период времени с наибольшей частотой возникновения провала – февраль-июнь и сентябрь-декабрь [5].

Теоретические основы компенсации провалов напряжения за счёт СТК электродуговых печей

Для определения номинальной мощности СТК, необходимой для компенсации заданного провала напряжения, необходимо найти математическую зависимость $Q_{СТК} = f(\delta U)$. Схема замещения электросталеплавильного комплекса завода ЗАО «ММК Metalurji» представлена на рис. 3.

При исследовании демпфирующей способности СТК был использован метод математического моделирования. В программном пакете Matlab, в приложении Simulink, была реализована модель электросталеплавильного комплекса металлургического завода ЗАО «ММК Metalurji» (рис. 4), включающая в себя сеть 34,5 кВ с сетевыми трансформаторами 155 МВА, включенных на параллельную работу, СТК 330 МВАр и ДСП-250 с печным трансформатором 300 МВА и реактором. Также была реализована математическая модель усовершенствованной системы управления СТК с переключающейся структурой, в которой за счет активации индивидуальных контуров регулирования фазных напряжений с ПИД-регуляторами обеспечивается компенсация провалов напряжения [7].

Схема замещения электрического контура ДСП представлена на рис. 5. Электрическая дуга в данном случае представлена с использованием противоЭДС [8].

Действующие значения фазных и линейных напряжений на шинах 34,5 и 380 кВ при однофазном провале напряжения глубиной 30%, выраженные в абсолютных и относительных единицах

$U_{Ф_380}, В$		$U_{Л_380}, В$		$U_{Ф_34,5}, В$		$U_{Л_34,5}, В$	
U_A	154	U_{AB}	325	U_A	13,3	U_{AB}	25,9
U_B	219	U_{BC}	380	U_B	15,8	U_{BC}	26,2
U_C	219	U_{CA}	325	U_C	13,5	U_{CA}	21,6
$U_{Ф_380}, о.е.$		$U_{Л_380}, о.е.$		$U_{Ф_34,5}, о.е.$		$U_{Л_34,5}, о.е.$	
U_A	$0,7U_H$	U_{AB}	$0,86U_H$	U_A	$0,67U_H$	U_{AB}	$0,75U_H$
U_B	$1,0U_H$	U_{BC}	$1,0U_H$	U_B	$0,79U_H$	U_{BC}	$0,76U_H$
U_C	$1,0U_H$	U_{CA}	$0,86U_H$	U_C	$0,67U_H$	U_{CA}	$0,62U_H$

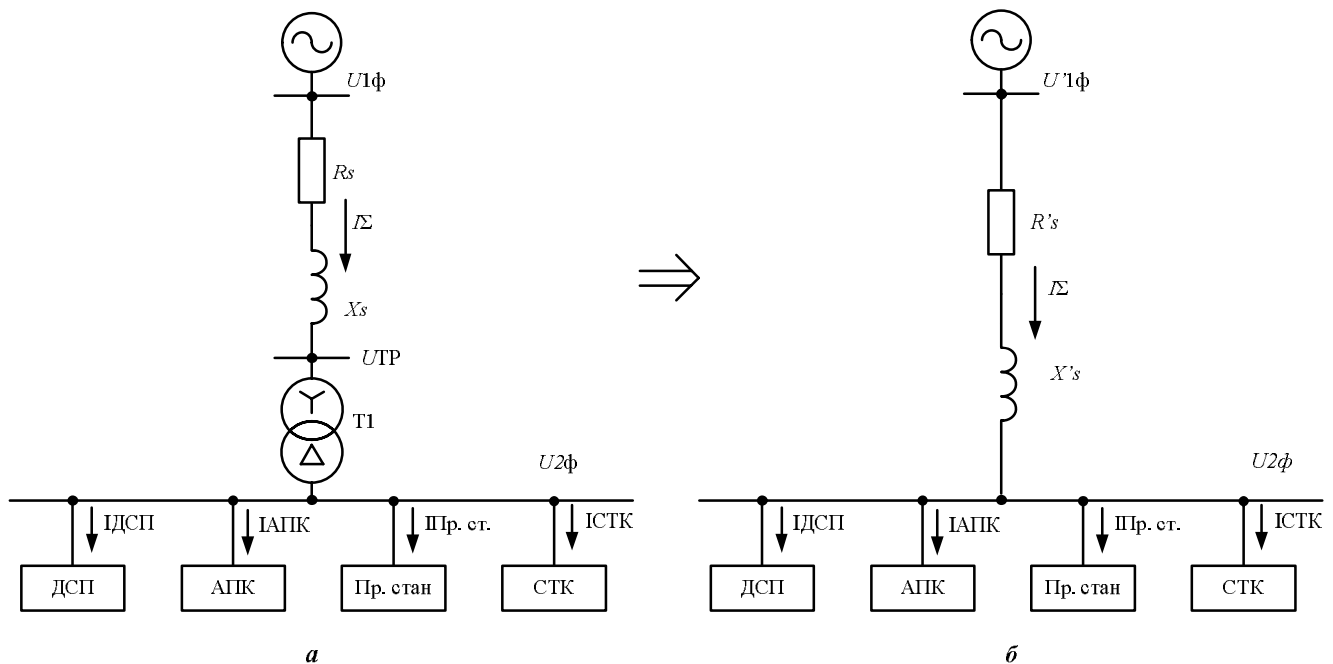


Рис. 3. Схема замещения электросталеплавильного комплекса завода ЗАО «ММК Metalurji»

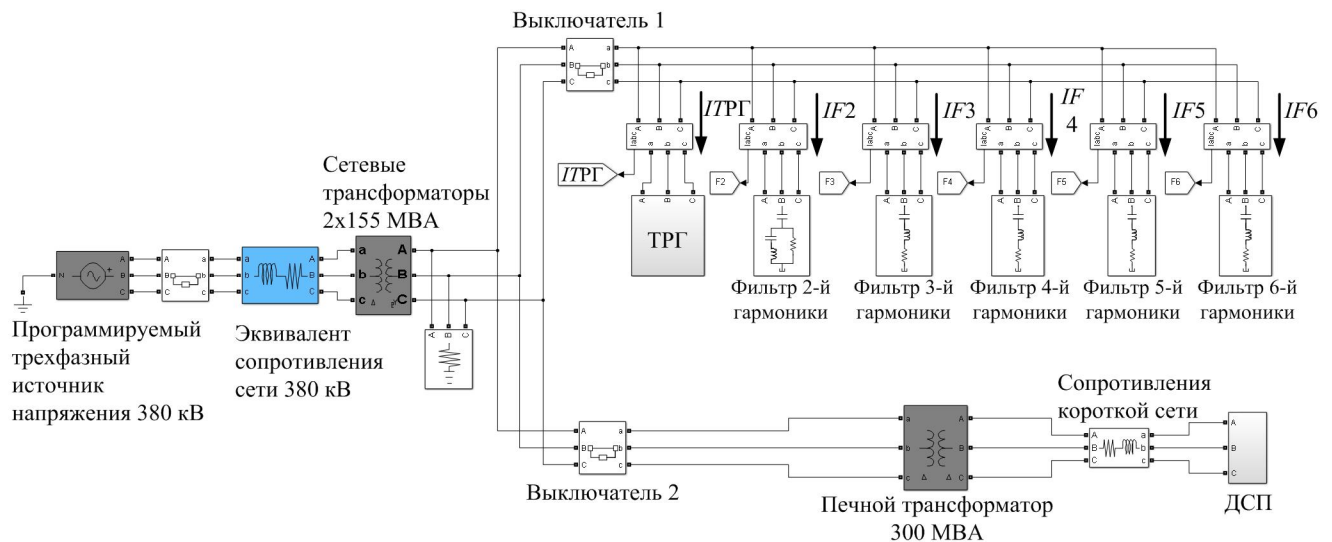


Рис. 4. Имитационная модель электротехнического комплекса «ДСП-СТК» завода ЗАО «ММК Metalurji», реализованная в математическом пакете MATLAB с приложением Simulink

С помощью представленной модели была получена векторная диаграмма, характеризующую потерю напряжения в ЛЭП (рис. 6). На диаграмме показаны вектор напряжения в конце линии ($\vec{U}_{2\phi_A}$) и под углом ϕ вектор тока нагрузки \vec{I}_{Σ_A} . Чтобы найти напряжение в начале линии, необходимо построить треугольник падений напряжения. Для этого из конца вектора $\vec{U}_{2\phi_A}$ параллельно току \vec{I}_{Σ_A} откладывается вектор падения напряжений на активной составляющей сопротивления ЛЭП – вектор $\vec{I}_{\Sigma_A} \cdot R'_S$ (отрезок ac). Перпендикулярно данному вектору строится вектор падения напряжения на реактивной составляющей сопротивления линии – вектор $\vec{I}_{\Sigma_A} \cdot X'_S$ (отрезок cb). Геометрическая сумма векторов $\vec{I}_{\Sigma_A} \cdot R'_S$ и $\vec{I}_{\Sigma_A} \cdot X'_S$ дает полное падение напряжения в линии $\vec{I}_{\Sigma_A} \cdot Z'_S$. Соединив точку o с концом вектора $\vec{I}_{\Sigma_A} \cdot Z'_S$, получим вектор напряжения в начале линии $\vec{U}_{1\phi_A}$. Таким образом, падение напряжения в линии

определяется как геометрическая разность между напряжениями в начале и конце линии.

Если пренебречь поперечной составляющей падения напряжения, то отрезок ae представляет собой алгебраическую разность между напряжением в начале и конце линии и называется потерей напряжения ΔU_ϕ .

Из векторной диаграммы видно, что вектор потерь напряжения состоит из отрезков ad и de :

$$\Delta U_\phi = ad + de, \quad (1)$$

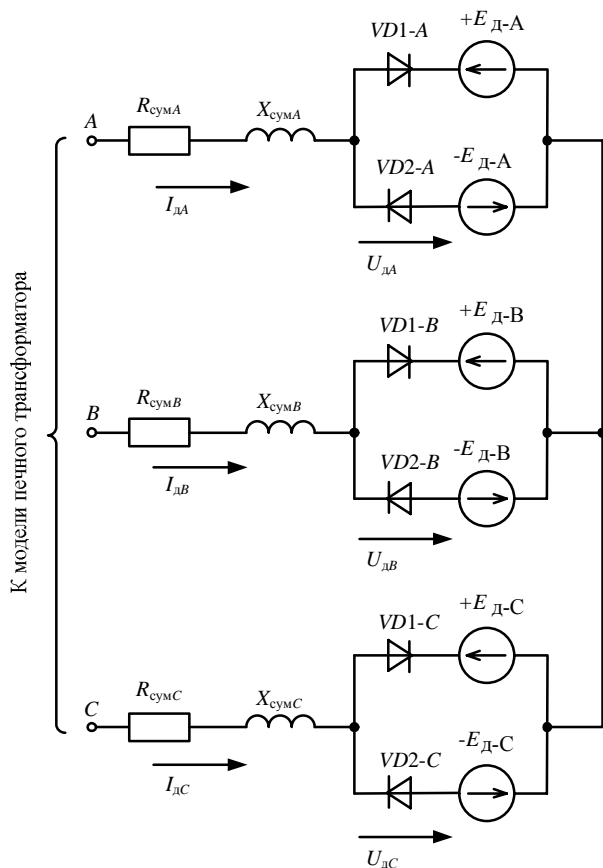
где

$$ad = IR_s \cos(\phi); \quad (2)$$

$$de = IX_s \sin(\phi). \quad (3)$$

Следовательно, получим следующее выражение:

$$\Delta U_\phi = IR_s \cos(\phi) + IX_s \sin(\phi). \quad (4)$$



$R_{кк}=0,27$ мОм, $X_{кк}=4,25$ мОм – активное и реактивное сопротивление короткой сети

Рис. 5. Схема замещения вторичного электрического контура ДСП-250 ЗАО «ММК Metalurji»

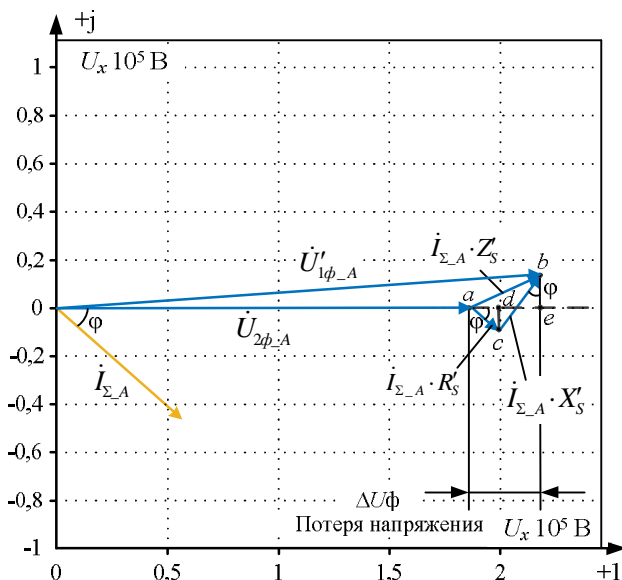


Рис. 6. Векторная диаграмма схемы замещения электросталеплавильного комплекса завода ЗАО «ММК Metalurji»

Переходя от фазных напряжений к линейным, а также умножив и поделив каждое слагаемое на $\sqrt{3}U$, получим окончательную формулу для определения потери напряжения в линии:

$$\Delta U = \sqrt{3} \left(\frac{PR_s}{\sqrt{3}U_s} + \frac{QX_s}{\sqrt{3}U_s} \right) = \frac{PR_s + QX_s}{U_s}. \quad (5)$$

Относительная потеря напряжения будет равна

$$\delta U = \frac{\Delta U}{U_s}. \quad (6)$$

Представим сопротивление сети как

$$X_s = \frac{U^2}{S_{кз}}. \quad (7)$$

Тогда получим

$$\Delta U = \frac{PR_s + Q \frac{U^2}{S_{кз}}}{U_s}. \quad (8)$$

Выражение для потери напряжения с учетом дополнительной активной нагрузки в относительных единицах будет иметь вид

$$\delta U = \frac{P_\Sigma R_s}{U_s^2} + \frac{Q_\Sigma}{S_{кз}}. \quad (9)$$

Выразим из полученной формулы суммарную реактивную мощность:

$$\frac{Q_\Sigma}{S_{кз}} = \delta U - \frac{P_\Sigma R_s}{U_s^2}; \quad (10)$$

$$Q_\Sigma = S_{кз} \left(\delta U - \frac{P_\Sigma R_s}{U_s^2} \right). \quad (11)$$

Определим требуемое значение реактивной мощности $Q_{СТК}$:

$$Q_{СТК} - Q_{ДСП} = S_{кз} \left(\delta U - \frac{P_\Sigma R_s}{U_s^2} \right); \quad (12)$$

$$Q_{СТК} = S_{кз} \left(\delta U - \frac{P_\Sigma R_s}{U_s^2} \right) + Q_{ДСП}. \quad (13)$$

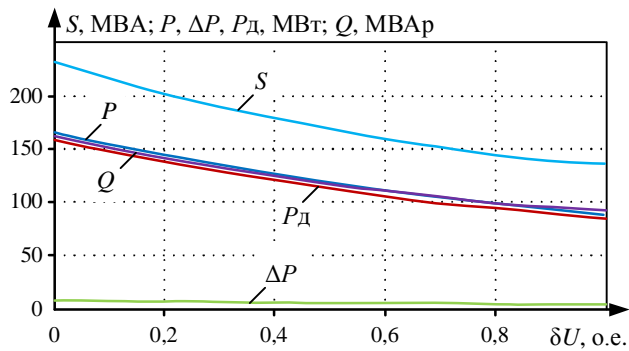
В представленной формуле:

$$P_\Sigma = P_{ДСП} + P_{АПК} + P_{ПР.СТАНА}; \quad (14)$$

$$Q_\Sigma = Q_{СТК} - Q_{ДСП}; \quad (15)$$

$$\cos(\phi) = 0,72 - 0,8. \quad (16)$$

На представленной выше математической модели (см. рис. 4) были смоделированы трехфазный и однофазный провалы напряжения в сети 380 кВ, при этом производился анализ зависимости активной, реактивной и полной мощности ДСП, мощности дуги и потерь активной мощности от провала напряжения, выраженного в относительных единицах (рис. 7, а, б). По данным характеристикам были получены соответствующие уравнения регрессии.



Уравнения регрессии: $P_d = 30,952x^2 - 105,5x + 158,48$;

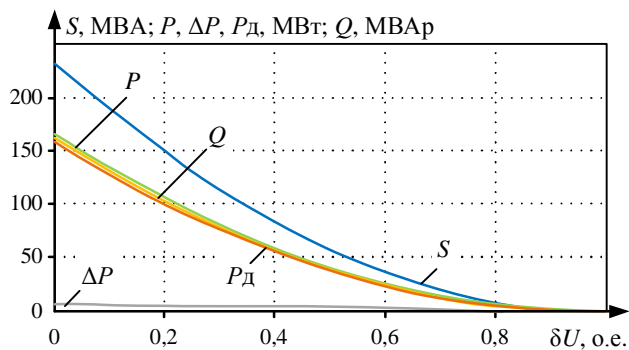
$Q = 37,872x^2 - 108,16x + 161,82$;

$P = 32,469x^2 - 110,42x + 165,87$;

$S = 57,005x^2 - 154,98x + 231,76$;

$\Delta P = 1,517x^2 - 4,9242x + 7,3837$

а



Уравнения регрессии: $P_d = 158,67x^2 - 317,35x + 158,67$;

$Q = 161,64x^2 - 323,27x + 161,64$;

$P = 166,06x^2 - 332,12x + 166,06$;

$S = 231,74x^2 - 463,47x + 231,74$;

$\Delta P = 7,3844x^2 - 14,769x + 7,3844$

б

Рис. 7. Зависимости активной (P), реактивной (Q) и полной мощности ДСП (S), мощности дуги (Pд), потерь активной мощности (ΔP) от однофазного (а) и трехфазного (б) провала напряжения (δU)

Подставим полученные уравнения в выведенную ранее формулу (13):

– для случая с однофазным провалом напряжения:

$$Q_{\text{СТК}} = S_{\text{кз}} \times \left(\delta U - \frac{R_s (32,469\delta U^2 - 110,42\delta U + 165,87)}{U_s^2} \right) + 37,872\delta U^2 - 108,16\delta U + 161,82;$$

– для случая с трехфазным провалом напряжения:

$$Q_{\text{СТК}} = S_{\text{кз}} \times \left(\delta U - \frac{R_s (166,06\delta U^2 - 332,12\delta U + 166)}{U_s^2} \right) + 161,64\delta U^2 - 323,27\delta U + 161,64.$$

После упрощения получим:

– для случая с однофазным провалом напряжения:

$$Q_{\text{СТК}} = \left(37,872 - 32,469 \frac{R_s S_{\text{кз}}}{U_s^2} \right) \delta U^2 + \left(S_{\text{кз}} - 108,16 + 110,42 \frac{R_s S_{\text{кз}}}{U_s^2} \right) \delta U + \left(161,82 - 165,87 \frac{R_s S_{\text{кз}}}{U_s^2} \right);$$

– для случая с трехфазным провалом напряжения:

$$Q_{\text{СТК}} = \left(161,64 - 166,06 \frac{R_s S_{\text{кз}}}{U_s^2} \right) \delta U^2 + \left(S_{\text{кз}} - 323,27 + 332,12 \frac{R_s S_{\text{кз}}}{U_s^2} \right) \delta U + \left(161,64 - 166 \cdot \frac{R_s \cdot S_{\text{кз}}}{U_s^2} \right).$$

Построим на одном графике зависимость $Q_{\text{СТК}} = f(\delta U)$, полученную с помощью математических формул для различных вариантов провалов напряжения (рис. 8).

Теперь представим на одном графике зависимость $Q_{\text{СТК}} = f(\delta U)$, полученную с помощью имитационной модели для различных вариантов провалов напряжения (рис. 9).

По результатам исследований, проведенных на математической модели, была определена разница между зависимостями $Q_{\text{СТК}} = f(\delta U)$ с однофазным и трехфазным провалами напряжения. Ошибка в данном случае меняется от 1 до 7% относительного отклонения и в среднем находится на уровне 4,45%. Данное обстоятельство обусловлено несимметричными режимами работы СТК.

Таким образом, при разработке инженерной методики определения требуемой величины реактивной мощности СТК можно использовать среднюю величину относительного отклонения между требуемой реактивной мощностью при однофазном и трехфазном провалах напряжения (4,45 %) и ввести поправочный коэффициент, равный 1,05. Например, для компенсации 30%-го однофазного провала напряжения необходимая номинальная мощность СТК может быть определена как произведение номинальной мощности СТК при 30%-м трехфазном провале и поправочного коэффициента 1,05.

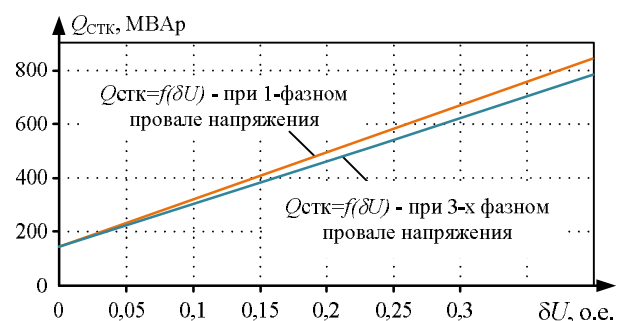


Рис. 8. Графики зависимостей требуемой реактивной мощности СТК от провалов напряжения при однофазном и трехфазном провалах, полученные с помощью математических формул

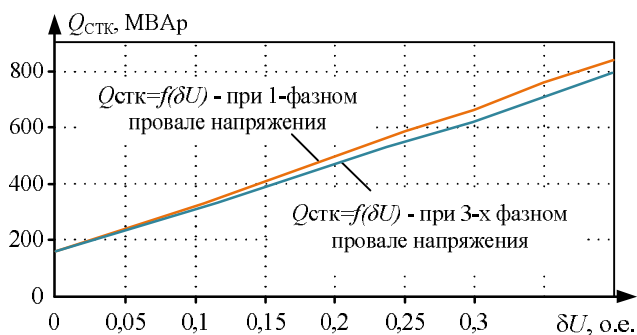


Рис. 9. Графики зависимостей требуемой реактивной мощности СТК от провалов напряжения при однофазном и трехфазном провалах, полученные с помощью имитационной модели комплекса «ДСП-СТК»

Анализ способности СТК по демпфированию провалов напряжения с учетом реального графика электрической нагрузки ДСП

Поскольку предложенная методика демпфирования провалов напряжения предполагает параллельную работу ДСП и стана горячей прокатки, то важно понимать, что помимо своих основных функций, выполняемых в процессе плавок металла, СТК должен отдавать часть своей реактивной мощности на поддержание заданного уровня напряжения в момент возникновения однофазного короткого замыкания в сети 380 кВ. Таким образом, необходимо знать, насколько часто провалы напряжения будут совпадать по времени с работой печи. Для этого рассмотрим график изменения мощности и тока дуги ДСП-250 завода ЗАО «ММК-Metalurji» (рис. 10). На данном графике обозначено время работы печи t_p и время пауз между началами и концами плавок и подвалкой скрапа $t_{\text{пауз}}$. Время всего цикла плавки равно $t_{\text{ц}} = t_p + t_{\text{пауз}}$.

Таким образом, для ДСП-250 среднее время от выпуска до выпуска металла составляет 60 мин ($t_{\text{цс}}$), суммарное время работы под током $t_{p\Sigma} = 46,8$ мин, а суммарное время пауз $t_{\text{пауз}\Sigma}$ равно 13,2 мин.

Найдем коэффициент включения, характеризующий степень использования ДСП во времени:

$$K_B = \frac{t_{p\Sigma}}{t_{p\Sigma} + t_{\text{пауз}\Sigma}} = \frac{46,8}{46,8 + 13,2} = 0,78.$$

Рассмотрим график, представленный на рис. 11, иллюстрирующий величину однофазного провала напряжения в сети 380 кВ, которую может скомпенсировать СТК при включенной и отключенной ДСП. Как видно из графика на рис. 11, минимальная глубина провала напряжения в периоды плавки с которой может справиться СТК, составляет 3%. В то же время, когда печь отключена, эта величина составляет 17%.

Рассмотрим другой случай, когда необходимо скомпенсировать провал 30% и определить величину требуемой реактивной мощности.

В представленную ранее формулу (17) подставим значения параметров сети и зададим $\delta U = 0,3$. В соответствии с приведенной методикой получается, что требуемая реактивная мощность при данном провале находится в диапазоне от 569,8 МВАр до 824,11 МВАр в зависимости от состояния ДСП. Графически результат расчетов показан на рис. 12.

Ниже приведены такие же графики для трехфазного провала напряжения в сети 380 кВ (рис. 13-14).

Таким образом, на основе проведенных исследований можно сделать вывод, что при работающей ДСП-250 СТК 330 МВАр с вероятностью 0,78 компенсирует провал напряжения глубиной 3% и с вероятностью 0,22 компенсирует провал напряжения глубиной 17%. В дальнейшем для обеспечения бесперебойного электроснабжения необходимо выбирать для установки СТК с большей установленной мощностью, рассчитанной согласно предложенной инженерной методике.

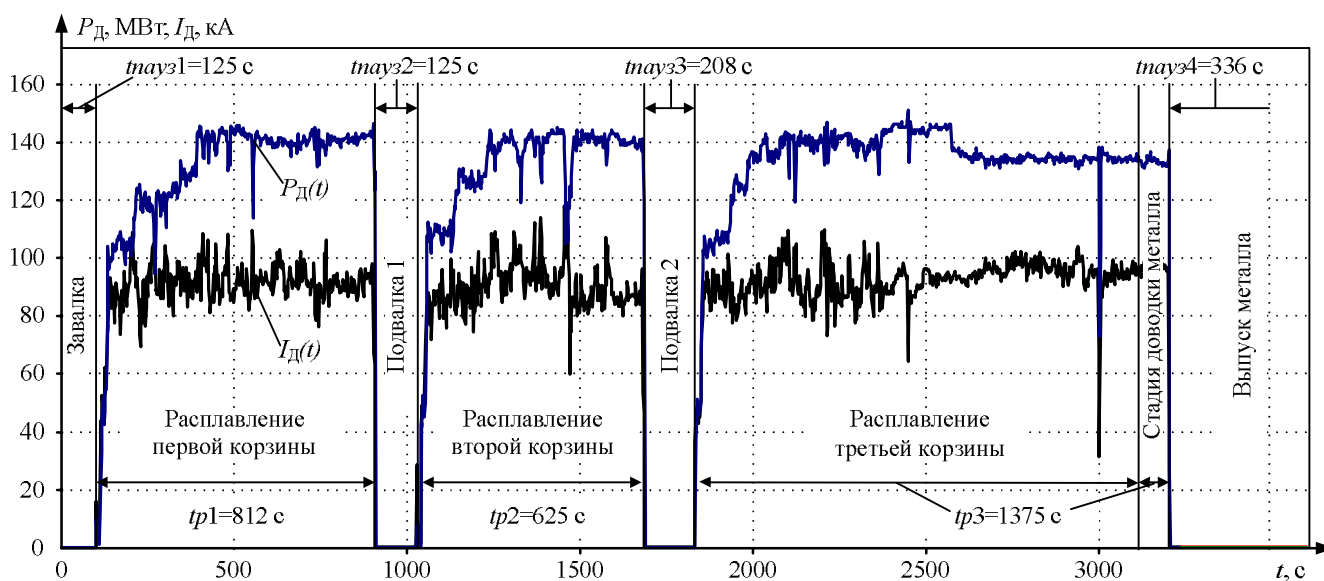


Рис. 10. Типовой график изменения мощности дуги и тока ДСП-250 ЗАО «ММК-Metalurji»

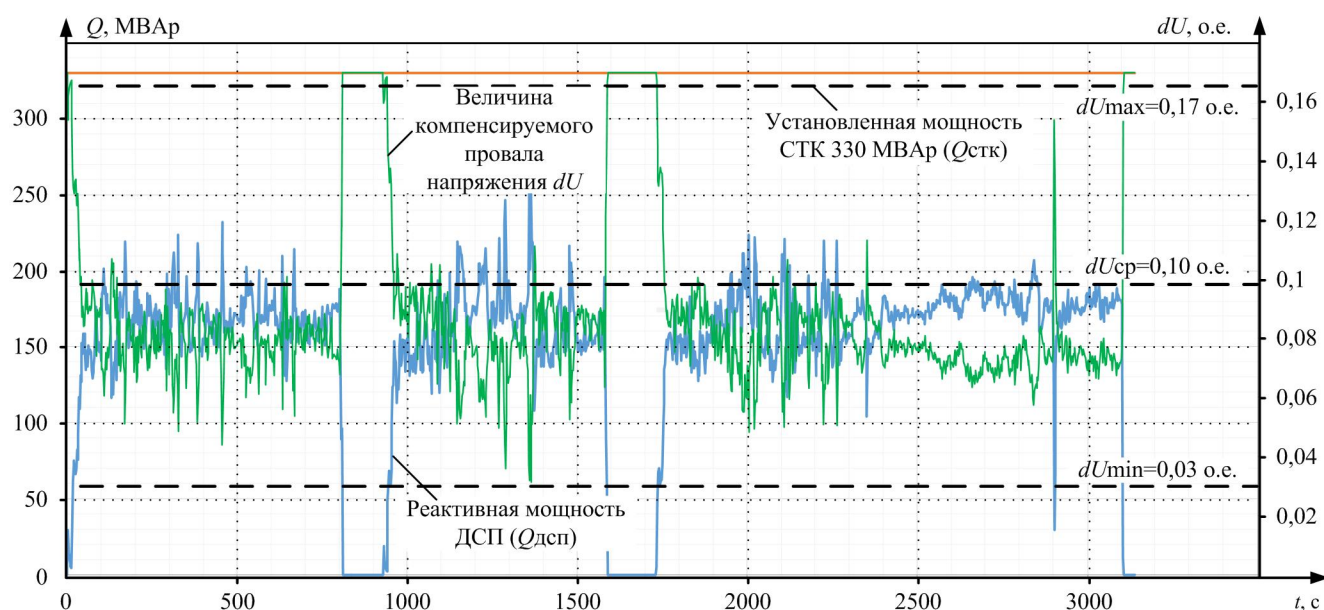


Рис. 11. Графики изменения мгновенных значений реактивной мощности ДСП-250 и максимальной компенсируемой величины однофазного провала напряжения за цикл плавки

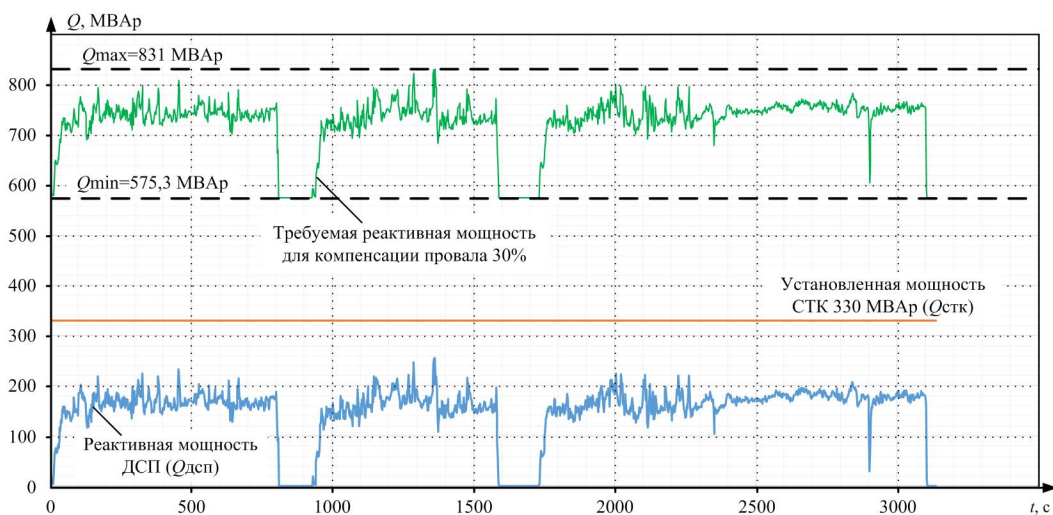


Рис. 12. График изменения требуемой реактивной мощности СТК при действующей ДСП-250 при однофазном провале напряжения глубиной 30 %

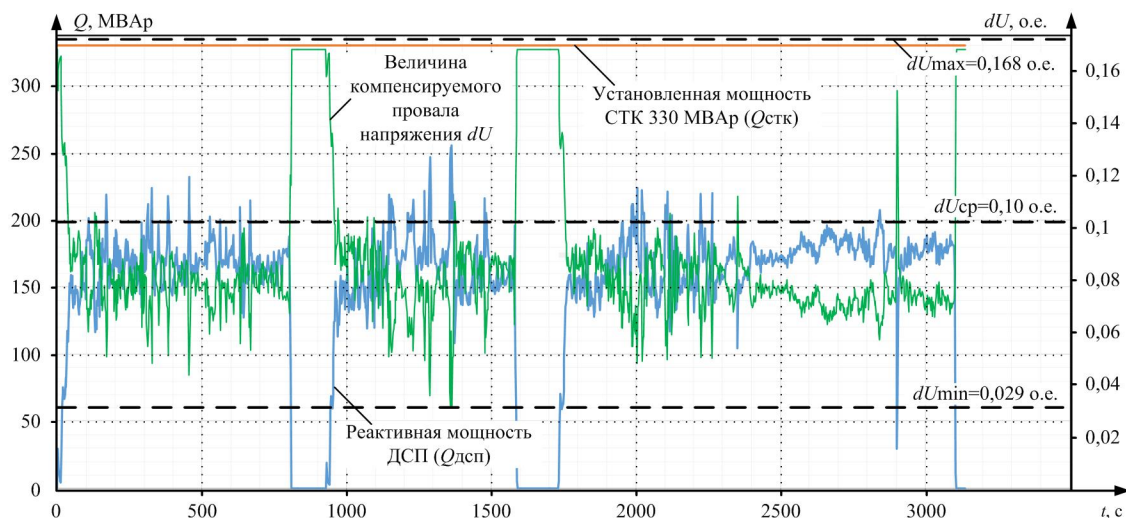


Рис. 13. Графики изменения мгновенных значений реактивной мощности ДСП-250 и максимальной компенсируемой величины трехфазного провала напряжения за цикл плавки

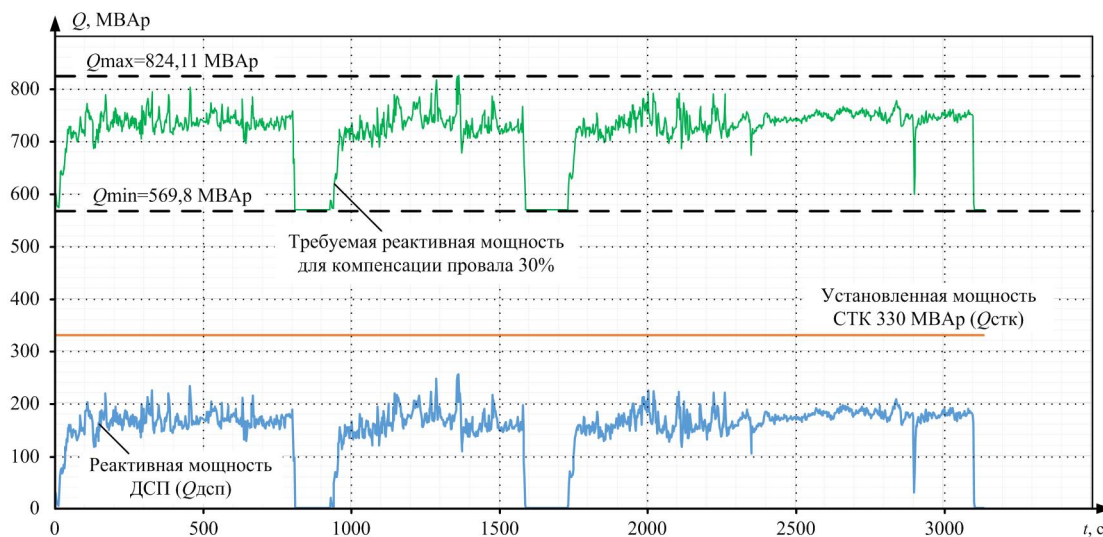


Рис. 14. График изменения требуемой реактивной мощности СТК при действующей ДСП-250 при трехфазном провале напряжения глубиной 30%

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана методика оценки резервов реактивной мощности СТК промышленных предприятий для компенсации внешних провалов напряжения, позволяющая на основе имеющихся исходных данных о СЭС и параметрах электрических нагрузок электроприемников определить среднестатистическую величину компенсируемого провала напряжения. Для рассматриваемого комплекса «ДСП-СТК» она равна 10%.

2. Проведен анализ зависимости требуемой реактивной мощности для компенсации провалов напряжения. Выведена формула для расчета $Q_{СТК}$ с эмпирическими коэффициентами, зависящими от мощности короткого замыкания сети $S_{кз}$, активного сопротивления сети R_s , уровня напряжения сети U_s , а также от глубины провала напряжения δU . По данному выражению были построены графики и получены уравнения регрессии для случая с однофазными и трехфазными провалами напряжения. Введено понятие коэффициента демпфирования, равному среднему относительному отклонению между требуемой реактивной мощностью при однофазном и трехфазном провалах. Как показали исследования, средняя величина относительного отклонения между требуемой реактивной мощностью при однофазном и трехфазном провалах напряжения отличается на 4,45%. Данная разница обусловлена несимметричным режимом работы СТК.

3. Для случая комплекса «ДСП-СТК» ЗАО «ММК Metalurji» показано, что в зависимости от того находится ДСП в работе или нет, посредством СТК можно скомпенсировать провалы напряжения глубиной от 3 до 17 %. Также с помощью разработанного подхода были получены требуемые значения реактивной мощности СТК для компенсации провала напряжения 30 % с учетом того, что печь функционирует. Анализ коэффициента включения позволил оценить, с какой вероятностью СТК сможет восстановить необходимый уровень напряжения на шинах 34,5 кВ ЗАО «ММК Metalurji».

Работа выполнена в рамках гранта Президента РФ для государственной поддержки молодых ученых (МК-3230.2018.8).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Стандартинформ, 2014.
- Nikolaev A.A., Kornilov G.P., Khrashin T.R., I. Ackay, Y. Gok. Application of static var compensator of ultra-high power electric arc furnace for voltage drops compensation in factory power supply system of metallurgical enterprises // Proceedings of the Electrical Power and Energy Conference EPEC-2014 – Calgary, Canada. 12-14 November 2014. P. 235-241.
- Исследование влияния провалов напряжения в системе электроснабжения завода ММК METALURJI на работу главных электроприводов стана горячей прокатки / А.А. Николаев, А.С. Денисевич, И.А. Ложкин, М.М. Тухватуллин // Электротехнические системы и комплексы. 2015. №3(28). С. 8-14.
- Николаев А.А., Денисевич А.С., Буланов М.В. Исследование параллельной работы автоматизированных электроприводов прокатного стана и дуговой сталеплавильной печи // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2017. №3. С. 59-69.
- Николаев А.А., Ложкин И.А., Ивекеев В.С. Улучшение динамических показателей статического тиристорного компенсатора мощной дуговой сталеплавильной печи в режиме демпфирования провалов напряжения, возникающих во внешней питающей сети // Материалы XLV международной научно-практической конференции «Фёдоровские чтения». М.: Изд-во Московского энергет. ун-та, 2015. С. 198-201.
- Николаев А.А., Ивекеев В.С., Ложкин И.А. Анализ провалов напряжения в районных электрических сетях 380 кВ провинций Хатай и Адана Турецкой республики // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. №1. С. 61-70.
- Использование статического тиристорного компенсатора сверхмощной дуговой сталеплавильной печи для обеспечения устойчивости электроэнергетической системы и повышения надежности внутривзводского электроснабжения / А.А. Николаев, Г.П. Корнилов, В.С. Ивекеев, Ложкин И.А., Котышев В.Е. // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2014. №1. С. 1-11.
- Тельный С.И. К теории трехфазной дуговой печи с непроводящей подиной // Электричество. 1954. №12. С. 38-42.
- Patent 6114841 United States of America, Int. Cl. G05F 1/70. Method and a device for compensation of reactive power [Text] / Hasler J-P, Johansson T., Angquist L; As-

- signee Asea Brown Boveri AB (Vasteras, Sweden). – Appl. No. 08/874,035; filed 12.06.1997; date of patent 5.09.2000.
10. Пупин В.М., Куфтин Д.С., Сафонов Д.О. Анализ провалов напряжений в питающих сетях предприятий и способы защиты электрооборудования // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2011. №4. С. 35-41.
 11. Карташев И.И., Плакида А.В., Хромышев Н.К. Анализ провалов напряжения в электрических сетях 100/220 кВ // Электричество. 2005. №4. С. 2-8.
 12. Шпиганович А.Н., Муров И.С. Провалы напряжения в электрических системах предприятий // Национальная Ассоциация Ученых. 2015. № 2-4(7). С. 6-7.
 13. Simulation of voltage sag events in distribution networks and utility-side mitigation methods / Mustafa S.S., Önder P., Kahraman Y., Ömer G., Necip E.A. // 2017 10th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO). IEEE Conferences. Year: 2017. Pages: 211–215.
 14. Mei Fei. Classification and recognition of voltage sags based on KFCM – SVM / Mei Fei, Zhang Chenyu, Sha Haoyuan, Zheng Jianyong // 2017 13th IEEE International Conference on Electronic Measurement & Instruments (ICEMI). IEEE Conferences Year: 2017. Pages: 432–437.
 15. Исследование взаимосвязи показателей качества электроэнергии и надёжности электроснабжения / Ю.В. Шаров, И.И. Карташев, В.Н. Тульский, О.В. Большаков // Энерго-эксперт. 2011. №6. С. 78-83.

Поступила в редакцию 23 июля 2019 г.

INFORMATION IN ENGLISH

DEVELOPMENT OF METHODS FOR ASSESSING RESERVES OF INDUSTRIAL STATIC VAR COMPENSATORS REACTIVE POWER FOR BALANCING OF VOLTAGE SAGS

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: alexniko@inbox.ru. ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5014-4852>.

Vladimir S. Ivekeev

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

Igor A. Lozhkin

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

The industrial static var compensator reacting power reserve assessment methodology for balancing internal voltage sags is developed in this paper. This methodology makes it possible to determine the average value of the compensated voltage sag based on the available source data on the power supply system (PSS) and the parameters of the electrical receiver loads. The experimental data on voltage sags at the metallurgical enterprise CJSC «MMK Metalurji» in Iskenderun, Turkey, is used as initial information. The effect of voltage sags on the sensitive electric receivers, such as frequency converters (FC) with active rectifiers (AR) reliability, is examined on the basis of this enterprise. The methodology for voltage sags compensation through the use of powerful SVC reserves of electric arc furnaces (EAF) is proposed. The results obtained allowed us to introduce the concept of damping coefficient, which is defined as the average relative deviation between the required reactive power at single-phase and three-phase voltage sags. A mathematical analysis of the SVC required reactive power on the magnitude of the voltage sags dependence is carried out. This analysis makes it possible to develop a new approach in the design of intra-shop power supply systems. The results obtained are of great practical importance for compact metallurgical enterprises, including electric steelmaking and rolling production.

Keywords: electric arc furnace, static var compensator, voltage sag, reactive power compensation, power quality.

REFERENCES

1. GOST 32144-2013. Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality limits in the public power supply systems. Moscow: Standartinform, 2014. (In Russian)
2. Nikolaev A.A., Kornilov G.P., Khrumshin T.R., Ackay I., Gok Y. Application of static var compensator of ultra-high power electric arc furnace for voltage drops compensation in factory power supply system of metallurgical enterprises // Proceedings of the Electrical Power and Energy Conference EPEC-2014 – Calgary, Canada, 12-14 November 2014. pp. 235-241.
3. Nikolaev A.A., Denisevich A.S., Lozhkin I.A., Tukhvatullin M.M. Investigation of Voltage Drops Influence in the Power Supply System of the "MMK Metalurji" Ironworks on the Main Electric Drives of the Hot Strip Mill // *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2015. No 3(28). P. 8-14. (In Russian)
4. Nikolaev A.A., Denisevich A.S., Bulanov M.V. Investigation of the parallel operation of automated electric drives of a rolling mill and an electric arc furnace // *Vestnik IGJeU* [Journal of ISPU], 2017. No 3. P. 59-69. (In Russian)
5. Nikolaev A.A., Lozhkin I.A., Ivekeev V.S. Improvement of dynamic indicators Static Var Compensator of the Ultra-High Power Electric Arc Furnace in the mode of damping of the voltage drops arising in an external power line // *Materialy XLV mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Fedorovskiye chteniya»* [Materials of the XLV International Scientific and Practical Conference "Fedorov Readings"]. 2015. P. 198-201. (In Russian)
6. Nikolaev A.A., Ivekeev V.S., Lozhkin I.A. Analysis of voltage fall in 380 kV regional electrical power networks of Hatay and Adana provinces, Turkey // *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Journal of MSTU], 2018. No 1. P. 61-70.
7. Nikolaev A.A., Kornilov G.P., Ivekeev V.S., Lozhkin I.A., Kotyishev V.E. Using of the Static Var Compensator of the Ultra-High Power Electric Arc Furnace for Supporting of Electrical Power System's Stability and Increasing Reliability of Factory Power Supply. *Mashinostroenie setevoy ehlektromyjnay nauchny zhurnal* [Russian Internet Journal of Industrial Engineering], 2014. No.1, P. 1-11. (In Russian)

8. Telny S.I. To the theory of a three-phase arc furnace with a non-conductive hearth // *Electricity*. 1954. No. 12. P. 38–42.
9. Patent 6114841 United States of America, Int. Cl. G05F 1/70. Method and a device for compensation of reactive power [Text] / Hasler J-P, Johansson T., Angquist L; Assignee Asea Brown Boveri AB (Vasteras, Sweden). Appl. No. 08/874,035; filed 12.06.1997; date of patent 5.09.2000.
10. Pupin V.M., Kuftin D.S., Safonov D.O. Analysis of voltage failures in the supply networks of enterprises and methods of protecting electrical equipment // *Elektrooborudovanie: ehk-spluatatsiya i remont*. [Electrical equipment: operation and repair.] 2011. No. 4. pp. 35-41. (In Russian.).
11. Kartashev I.I., Plakida A.V., Khromyshev N.K. Analysis of voltage dips in electrical networks 100/220 kV // *Elektrich-estvo* [Electricity.] 2005. No. 4. pp. 2-8. (In Russian)
12. Shpiganovich A.N., Murov I.S. Voltage dips in the electrical systems of enterprises // *Nacionalnaya Associatsiya Uchenyh* [National Association of Scientists.] 2015. No. 2-4(7). P. 6-7. (In Russian)
13. Mustafa Selim Sezgin, Önder Polat, Kahraman Yumak, Ömer Gul, Necip Erman Atilla. Simulation of voltage sag events in distribution networks and utility-side mitigation methods // 2017 10th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO). IEEE Conferences. Year: 2017. Pages: 211–215.
14. Mei Fei, Zhang Chenyu, Sha Haoyuan, Zheng Jianyong. Classification and recognition of voltage sags based on KFCM – SVM // 2017 13th IEEE International Conference on Electronic Measurement & Instruments (ICEMI). IEEE Conferences Year: 2017. Pages: 432–437.
15. Sharov Yu.V., Kartashev I.I., Tulskey V.N., Bolshakov O.V. The study of the relationship of indicators of quality of electric energy and reliability of power supply // *Energoekspert* [Energy Expert]. 2011. No. 6. P. 78-83. (In Russian)

Николаев А.А., Ивекеев В.С., Ложкин И.А. Разработка методики оценки резервов реактивной мощности статических тиристорных компенсаторов промышленных предприятий для компенсации провалов напряжения // *Электротехнические системы и комплексы*. 2019. № 3(44). С. 16-26. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-3\(44\)-16-26](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-3(44)-16-26)

Nikolaev A.A., Ivekeev V.S., Lozhkin I.A. Development of Methods for Assessing Reserves of Industrial Static Var Compensators Reactive Power for Balancing of Voltage Sags. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electro-technical Systems and Complexes], 2019, no. 3(44), pp. 16-26. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-3\(44\)-16-26](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-3(44)-16-26)

Федорова С.В.¹, Шеметов А.Н.^{1,2}

¹ Технический университет УГМК, г. В. Пышма, Свердловская область

² Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

РАЗВИТИЕ ДИСПЕТЧЕРИЗАЦИИ ЭЛЕКТРОХОЗЯЙСТВА ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ КАК ШАГ К ЕГО ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ

В статье представлены успешные практики развития диспетчеризации электрохозяйства на примере ряда промышленных предприятий горно-металлургического комплекса, реализованные через цифровую трансформацию. Сформулированы основные направления совершенствования системы диспетчеризации электрохозяйства предприятий с учетом успешных практик по реализации систем управления энергоресурсами. Описаны результаты пилотного проекта построения системы диспетчерского контроля на одном из цинковых предприятий на уровне подразделения – сернокислотного цеха. Достигнуто сокращение времени простоя технологического оборудования более, чем на 25%. Представлен пример построения элементов экспертной системы оценки состояния силового оборудования подстанций, а также значимого технологического оборудования предприятия на основе индикативного метода, дающий возможность формировать данные для прогнозирования состояния оборудования и управлять затратами на ремонт и обслуживание оборудования. Даны рекомендации по замене силового оборудования подстанции при цифровой трансформации и обоснованию развития системы АСТУЭ на основе оценки устойчивости технотенденции.

Ключевые слова: диспетчеризация, электрохозяйство, алгоритм, технотенденция, индикативный метод, оценка состояния оборудования, цифровая трансформация.

ВВЕДЕНИЕ

Создание современной системы диспетчеризации является одним из инструментов цифровой трансформации предприятия с целью повышения его конкурентоспособности. Основные задачи, которые необходимо при этом решить, могут быть представлены тремя тезисами:

- тотальная автоматизация предприятия, в т.ч. всех его технологических и бизнес-процессов;
- интеллектуализация (цифровизация) управленческих решений, принимаемых во всех бизнес-процессах;
- повышение скорости принятия оптимальных решений [1].

Учитывая, что приоритетным энергоресурсом на крупных предприятиях горно-металлургического комплекса является электроэнергия, прежде всего необходимо акцентировать задачу совершенствования систем диспетчеризации электрохозяйства (СДЭ) предприятий [2-7].

Примеры успешных практик по реализации систем управления энергоресурсами [8-14] демонстрируют следующие направления развития СДЭ:

- создание современного организационно-технического уровня диспетчеризации электрохозяйства предприятия с оперативным контролем и анализом работы для принятия управленческих решений, направленных на сокращение энергетических затрат при высоком качестве выпускаемой продукции;
- предотвращение или снижение ущерба от аварий на электросетях за счет оперативного выявления мест возникновения и характера аварии и, следовательно, сокращения времени на локализацию и ликвидацию аварийной ситуации и устранения ее последствий;
- накопление статистических данных для планирования и формирования режимов электропотребления, разработки удельных норм электропотребления;
- экономия текущего потребления электроэнергии и исключение штрафных санкций со стороны энерго-

снабжающей организации;

- обеспечение оптимальных режимов ведения электроемких технологических процессов;
- уменьшение времени на оперативные переключения в целях сокращения внеплановых простоев технологического оборудования;
- контроль за оптимальным использованием технологического оборудования с целью сокращения работы в режиме холостого хода и внеплановых простоев.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

На ряде металлургических предприятий по результатам исследования текущего состояния их систем диспетчерского контроля и управления электрохозяйством был разработан алгоритм по совершенствованию диспетчеризации. На уровне деятельности предприятия данный алгоритм преобразуется в предпроектное исследование с разработкой технического задания на реализацию предлагаемых технических решений.

В качестве пилотного проекта для обоснования эффективности СДЭ приведем результаты ее реализации для одного из значимых в технологической и экологической цепочке производств – сернокислотного цеха предприятия цветной металлургии. Одной из важнейших проблем, возникающих в ходе его эксплуатации, является обеспечение бесперебойного электрообеспечения, оценка ресурса и прогнозирование надежности действующего электрооборудования.

На первом этапе было проанализировано время простоев технологического оборудования за 4 года (табл. 1) и связанный с этим ущерб производству (недовыпуск серной кислоты) и экологии (выброс сернистого газа в атмосферу).

Как показали результаты обследований, основной причиной длительных нарушений электрообеспечения является недостаточная информированность оперативного персонала электрослужбы о состоянии (ресурсе) высоковольтных коммутационных аппаратов.

Анализ выпуска серной кислоты за 4 года

№ п/п	Год	Выпуск серной кислоты, т		Часовая производительность серной кислоты, т/ч	Время простоя, ч/год	Недовыпуск серной кислоты, т
		План	Факт			
1	2014	77381	79198	10,00	4,3	43,00
2	2015	83132	82926	10,47	3,25	34,03
3	2016	90840	116807	14,75	3,7	54,57
4	2017	115518	126179	15,93	1,6	25,49

Постановка экспериментов с моделированием действий по восстановлению работы силового оборудования подстанции в условиях получения информации только при появлении оперативно-выездной бригады непосредственно на объекте и при внедренной системе диспетчеризации электрохозяйства цеха показала снижение времени устранения аварии на 25%.

В результате было принято решение о пилотной разработке и внедрении на предприятии системы диспетчерского контроля (СДК) состояния коммутационных аппаратов сернокислотного цеха (рис. 1).

Впоследствии внедрение проекта на уровне цеха подтвердило результаты постановочных экспериментов и действительно значительно сократило время простоев технологического оборудования в 2017 г. за счет увеличения оперативности принятия решений по восстановлению работоспособности системы электропитания (см. табл. 1). Это позволило обосновать целесообразность развития диспетчеризации электрохозяйства на уровне всего предприятия [14].

На примере этого и других успешно реализованных пилотных проектов развития диспетчеризации электрохозяйства на ряде промышленных предприятий горно-металлургического комплекса разработан алгоритм действий, начиная с проведения анализа оборудования, на базе которого целесообразно развитие системы диспетчеризации, и заканчивая разработкой предложений по организации обмена технологической информацией с единым диспетчерским центром предприятия [14-16].

На этапе формирования элементной базы системы диспетчеризации одной из главных задач стал выбор между возможностями частичной замены (ретрофита) и полной модернизации силового оборудования подстанции. В частности, компания «Таврида Электрик» для обеспечения цифровых каналов связи предлагает компромиссный вариант – ретрофит существующих ячеек с заменой масляных выключателей на быстродействующие вакуумные ВВ/TEL [12]. Однако анализ затрат для двух этих вариантов показал их соизмеримость, поэтому целесообразным было признано решение в пользу установки новых цифровых ячеек.

На первом этапе построения системы диспетчеризации необходимо осуществить описание информационных потоков, контролирующих режимы работы значимого технологического оборудования. В части удельных расходов электроэнергии, степени загрузки и ресурса приемников электроэнергии информация может быть получена из двух источников – от автоматизированной системы управления технологическим процессом (АСУТП) и автоматизированной системы технического учета электроэнергии (АСТУЭ).

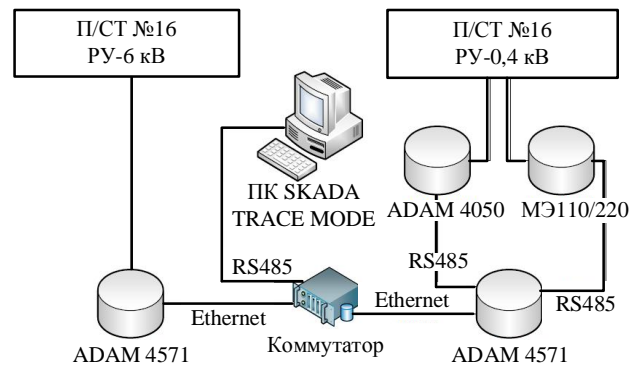


Рис. 1. Структурная схема сбора информации данных для СДК

Методика техноценологического обоснования развития систем АСТУЭ на основе оценок устойчивости техноценоза успешно апробирована в различных отраслях [17, 18]. Она позволяет сделать вывод о построении корректной структуры и необходимом количестве планируемых для установления точек учета электрической энергии, а также об отсутствии избыточности информации в создаваемой информационной системе техноценоза при развитии АСТУЭ.

Вторым важным этапом развития СДЭ предприятия в процессе цифровой трансформации является создание экспертной системы оценки состояния силового электрооборудования подстанций, а также наиболее значимых технологических электроприемников.

Крупные интеграторы современных цифровых систем, такие как Siemens, ABB, Schneider Electric, предлагают такие системы «под ключ» с использованием мощных информационно-аналитических платформ. Элементы системы оценки основных параметров оборудования можно построить, используя имеющуюся SCADA-систему на базе АРМ СДК на основе индикативного метода, предложенного в работах [19-21].

Суть метода состоит в том, что оценка работоспособности системы производится согласно разработанной классификации состояний с разделением их по степени аварийности по каждому индикатору, индикативному блоку и в целом по обобщенному состоянию. Анализ состояний выполняется путем сопоставления индикатора или группы индикаторов с соответствующими пороговыми значениями [19].

Для оценки работоспособности в рамках данного исследования были введены три состояния: «нормальное», «предаварийное» и «аварийное» (рис. 2). Комплексная оценка состояния формируется по трем индикативным блокам: «Надежность», «Качество» и «Экологичность». Для определения пороговых уровней индикативных показателей при формировании системы оценки может применен экспертный метод или данные статистического анализа эксплуатационных параметров оборудования.

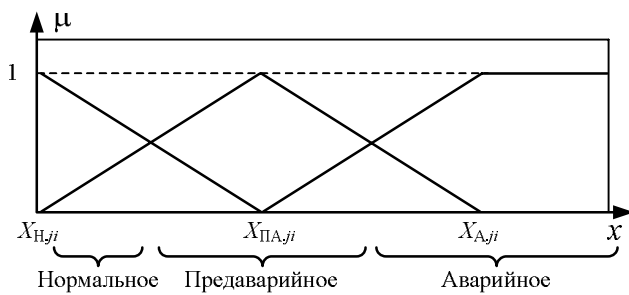


Рис. 2. Примерные характеристические функции состояний [19]

Блок «Надежность» характеризует состояние электрического оборудования по эксплуатационным показателям наработки на отказ и необходим для оптимального планирования всех регламентных работ: технического осмотра, текущего и капитального ремонта. На примере высоковольтных выключателей по данному блоку введено три индикативных показателя (табл. 2):

1. Ресурс коммутационной стойкости выключателя при номинальном токе включения/отключения – определяется по паспортным данным оборудования или экспертным методом.
2. Количество отказов срабатывания вакуумных выключателей – вычисляется на основании статистики аварийных событий.
3. Ресурс до проведения очередного текущего ремонта выключателя – после определенного количества аварийных событий оперативный персонал обязан провести ряд мероприятий, направленных на вывод оборудования из работы и восстановление его характеристик до регламентных значений.

Для оценки характеристик надёжности действующего проведен сбор и обработка статистической отчетности по отказам системы электроснабжения. Среднегодовое количество аварий (параметр потока отказов) определялся как отношение числа отказавших однотипных элементов $n(t)$ к исходному их количеству N_0 при условии, что все вышедшие из строя элементы восстанавливаются [22-24]:

$$\omega(t) = \frac{n(t)}{N_0 t}, \quad (1)$$

где t – расчетный период времени осреднения (в нашем случае 1 год).

Таблица 2

Пороговые значения индикативных показателей по блоку «Надежность»

Индикативный показатель	Состояние	Пороговые значения
1. Ресурс коммутационной стойкости выключателей (кол-во циклов)	нормальное	$0 \leq N \leq 20000$
	предаварийное	$20000 < N \leq 28000$
	аварийное	$28000 < N \leq 30000$
2. Количество отказов срабатывания (ед./год)	нормальное	$0 \leq n \leq 3$
	предаварийное	$3 < n \leq 5$
	аварийное	$5 < n \leq 8$
3. Межремонтный интервал (ч/год)	нормальное	$0 \leq n \leq 7500$
	предаварийное	$7500 < n \leq 8200$
	аварийное	$8200 < n \leq 8760$

Межремонтный интервал T_B рассчитывался как среднее время восстановления [22]:

$$T_B = \frac{\sum_{i=1}^r \tau_i}{r}, \quad (2)$$

где r – зафиксированное число отказов системы за отчетный период; τ_i – время восстановления после i -го отказа.

Анализ полученных данных показал, что среднее количество отказов по разным присоединениям составляет от 3 до 5 случаев в год. Значения $\omega(t) = 5 \dots 8$ ед./год признаны аномальными и приняты в качестве пороговых значений аварийного режима (см. табл. 1). Соответственно, $\omega(t) = 3 \dots 5$ ед./год указаны как пороговые значения предаварийного режима.

Аналогичный анализ, проведенный относительно времени восстановления, показал, что принятая система планово-предупредительных ремонтов с периодичностью в один год ($T_B = 8760$ ч) не удовлетворяет требованиям надежности. При существующей интенсивности коммутаций граничным значением нормального режима признан максимальный межремонтный период 7500 ч, а для предаварийного режима – 8200 ч (см. табл. 1).

Блок «Качество» позволяет осуществлять оценку состояния системы электроснабжения по показателям качества электрической энергии на границах балансовой принадлежности согласно ГОСТ 32144-2013 [25]. Соответственно, индикаторы формируются по показателям, указанным в этом стандарте: частоте переменного тока, абсолютной величине, форме и симметрии напряжения и т.д.

Поскольку абсолютную электромагнитную совместимость на реальных производственных объектах обеспечить практически невозможно, максимально допустимый уровень отклонений показателей качества принимают на уровне $\pm 5\%$ (табл. 3). Например, индикативный показатель отклонений (в ГОСТ – «медленных изменений») напряжения в пределах $\pm 5\%$ позволяет контролировать пороги напряжения и своевременно принимать необходимые решения по восстановлению нормального режима.

Пример интерфейса АРМ диспетчера, реализованного через встроенную SCADA-систему, приведен на рис. 3.

Таблица 3

Пороговые значения индикативных показателей по блоку «Качество»

Индикативные показатели	Пороговые значения	
	предаварийного состояния	аварийного состояния
1. Отклонение частоты	$\pm 0,2$ Гц	$\pm 0,4$ Гц
2. Отклонение напряжения	$\pm 5\%$	$\pm 10\%$
3. Коэффициент несимметрии напряжений	2%	4%



Рис. 3. Интерфейс системы оценки состояния параметров оборудования

Допустимый уровень отклонений напряжения и соответствующих им токовых нагрузок фидера визуально выполнен в виде цветных линеек-шкал. Кроме того, для оповещения диспетчера о критических изменениях режима предусмотрена световая сигнализация. Тем самым достигается возможность своевременного реагирования и устранения нежелательных режимов работы оборудования.

При отклонении величины от заданного значения контролируемый параметр и время отклонения автоматически заносятся в отчетную форму. В зависимости от настроек программы сводный отчет автоматически формируется раз в смену или сутки.

Блок «Экологичность» определяет степень воздействия цеха или предприятия (при отказах системы электроснабжения) в целом на экологическую ситуацию [19-20].

Данный блок контролирует время простоя технологических потребителей, связанное с отсутствием напряжения на фидерах, которые обеспечивают электроснабжение сернокислотного цеха. Запрограммировать SCADA-систему необходимо на время появления нагрузки на данных фидерах. Пороги пределов состояний (табл. 4) определены экспертным методом.

Таблица 4

Пороговые значения индикативных показателей по блоку «Экологичность»

Индикативный показатель	Состояние	Пороговые значения
Время простоя (мин)	нормальное	$0 \leq n \leq 8$
	предаварийное	$8 < n \leq 12$
	аварийное	$12 < n$

Наработка статистики о состоянии оборудования позволяет осуществлять прогнозирование и управлять затратами на ремонт и обслуживание оборудования на предприятии.

Внедрение в 2018 г. новой системы диспетчеризации с мониторингом указанных индикативных показателей в рамках развития диспетчеризации цинкового завода обеспечило сокращение в 2 раза (с 1,5 ч/год до 45 мин/год) времени простоя силового оборудования по причине просадки напряжения и, как следствие, – снижение недоотпуска готовой продукции (серной кислоты) и уменьшение аварийных выбросов сернистого ангидрида в атмосферу. Учитывая, что ставки платы за негативное воздействие на окружающую среду для аварийных и сверхнормативных выбросов возрастают в 25 раз [26], суммы ежегодных «экологических» платежей предприятия после внедрения предложенных мероприятий сократились в 3-4 раза (табл. 5).

Таким образом итоговый среднегодовой ущерб предприятия сократился на 37%, а экономический эффект от внедрения системы составил 1,2 млн руб. /год.

В дальнейшем развиваемые локальные подсистемы диспетчеризации электрохозяйства – СДК коммутационных аппаратов подстанций, АСТУЭ, система планирования и прогнозирования электропотребления – интегрированы в единую информационно-аналитическую платформу предприятия.

Выводы

1. Развитие системы диспетчеризации электрохозяйства является реальным шагом к цифровой трансформации предприятия.

2. Разработанный алгоритм действий по разработке развития системы диспетчеризации электрохозяйства предприятия преобразуется в предпроектное исследование с разработкой технического задания на реализацию предлагаемых технических решений и может быть использован при планировании пилотного локального проекта на уровне подразделения.

3. Элементы системы оценки основных параметров оборудования подстанций можно построить, используя имеющуюся SCADA-систему на базе АРМ СДК на основе индикативного метода.

4. Разработка системы экспертной оценки состояния оборудования подстанций, а также значимого технологического оборудования предприятия дает возможность формировать данные для прогнозирования состояния оборудования и управлять затратами на ремонт и обслуживание оборудования.

Таблица 5

Укрупненный расчет экономического эффекта

Год	Время простоя, ч/год	Недовыпуск серной кислоты, т	Цена продукта, руб./т	Упущенная выгода, тыс. руб.	Плата за выбросы, тыс. руб.	ИТОГО издержки, тыс. руб.
До внедрения	2014	4,3	2100,00	90,297	126,291	216,583
	2015	3,25	2763,00	94,022	81,153	175,175
	2016	3,7	3286,94	179,365	92,389	271,754
После внедрения	2017	1,6	3785,40	96,485	39,950	136,437

Примечание. Выброс сернистого газа при аварийной остановке цеха – 22 т/ч; норма оплаты за выброс сернистого ангидрида – 45,4 руб./т; дополнительный повышающий коэффициент – 25.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шехтман М.Б. Цифровое предприятие: семь отличительных признаков // Информационный портал по энергосбережению «EnergoAtlas.ru». 29.05.2018. URL: <http://www.energoatlas.ru/2018/05/29/shekhtman-digital-company>.
2. ИТС 48-2017. Повышение энергетической эффективности при осуществлении хозяйственной и (или) иной деятельности. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. М.: Бюро НДТ, 2017. URL: <http://docs.cntd.ru/document/456096365>.
3. Bernow S., Biewald B., Marron D. Full-cost dispatch: Incorporating environmental externalities in electric system operation // The Electricity Journal. Vol. 4, Issue 2. March 1991. P. 20-33.
4. Zhang B.M. Development of power system control facilities in China // Electric Power Systems Research. Vol.44, Issue 1. January 1998. P. 27-33.
5. Bogaschewsky R. Prozeß-orientiertes Management / R. Bogaschewsky, R. Rollberg. Berlin: Springer, 1998. 340 p. [<https://doi.org/10.1007/978-3-642-58918-8>]
6. Osztarmayer J., Feser K. Enhanced Competitiveness with a Modern Asset Management System // Int. Symp. «Modern Electric Power Systems». Wroclaw, Sept. 2002. P. 64-69.
7. The Industrial Internet of Things, Volume B01: Business Strategy and Innovation Framework. ICS: PUB:B01:V1.0:PB: 20161115, 2016. P. 20-28.
8. Строгий Т.А., Трофимов А.В., Трофимов В.А. Опыт автоматизации проектирования подсистемы регистрации аварийных событий // Электрические станции. 2016. №7. С. 51-55.
9. Гаглоева И.Э. Управление электроэнергетическими объектами на основе оценки их состояния // Главный энергетик. 2016. №8. С. 34-42.
10. Трофимов К.С. Система диспетчеризации электроснабжения Комсомольского НПЗ // Территория Нефтегаз. 2016. №5. С. 12-14.
11. Белоусенко И.В., Егоров А.В., Малиновская Г.Н. Некоторые вопросы создания АСУ электроснабжением объектов нефтегазового комплекса // Промышленная энергетика. 2016. №8. С. 10-15.
12. Кравцов Н., Афанасьев В. Новые решения для повышения эффективности систем технического учета для крупных и средних производственных предприятий // Технологии в электронной промышленности. 2016. №8. С. 52-56.
13. Современные проблемы и перспективы формирования модели управления энергохозяйством на предприятиях горно-металлургического комплекса / А.Н. Шеметов, С.В. Федорова, Р.Н. Ляпин, С.В. Кузнецов // Электротехнические системы и комплексы. 2016. №4 (33). С. 41-48.
14. Федорова С.В., Худяков П.Ю., Томилин Д.А. Построение диспетчеризации электрохозяйства металлургического предприятия // Интеллектуальная энергетика на транспорте и в промышленности: материалы всероссийской молодежной научно-практической конференции с международным участием. 2018. С.305-311.
15. Golovinski I.A. Methods of automatic control of the topological state of the equipment of electrical substations // Modern Applied Science. 2015. T.9. №4. P. 53-66.
16. Таврида-электрик. Plug & Play engineering. Принципиально новый подход к инжинирингу. URL: <https://www.tavrida.com/ter/solutions/>
17. Кудрин Б.И. Математика ценозов: видовое, ранговидовое, ранговое по параметру гиперболические Н-распределения и законы Лотки, Ципфа, Парето, Мандельброта // Философские основания технетики. Ценологические исследования. Вып. 19. М.: Центр системных исследований, 2002. С. 357-412.
18. Федорова С.В., Третьяков А.П. Применение технотеннологического подхода к анализу электропотребления и энергосбережения предприятий Свердловской области // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2012. № 16(275). С. 92-97.
19. Мошинский О.Б. Разработка модели оценки функционального состояния системы электроснабжения мегаполисов: автореф. дис. ... канд. тех. наук / Урал. федер. ун-т им. первого Президента России Б.Н. Ельцина. Екатеринбург, 2015. 24 с.
20. Кокин С.Е. Энергоинформационные модели функционирования и развития систем электроснабжения больших городов: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Урал. федер. ун-т им. первого Президента России Б. Н. Ельцина. Екатеринбург, 2013. 44 с.
21. Хальясмаа А.И., Дмитриев С.А., Кокин С.Е. Система управления техническими активами предприятий электросетевого комплекса // Промышленная энергетика. 2014. №2. С. 36-40.
22. Шеметов А.Н. Надежность электроснабжения. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. тех. ун-та им. Г.И. Носова, 2007. 138 с.
23. Brown R.E., Hanson A.P., H.L. Willis, F.A. Luedtke, Assessing the reliability of distribution systems // IEEE Computer Applications in Power, Jan. 2001, vol. 14. P. 44-49.
24. Allan R., Billinton R. Power System Reliability and its Assessment: Part 3, distribution systems and economic considerations // Power Engineering Journal. Vol. 7. Issue 4. Aug. 1993. P. 185-192.
25. ГОСТ 32144-2013. Нормы качества электроэнергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Стандартинформ, 2014. 20 с.
26. Постановление Правительства РФ от 13.09.2016 №913 «О ставках платы за негативное воздействие на окружающую среду и дополнительных коэффициентах» – URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_204671/

Поступила в редакцию 11 апреля 2019 г.

INFORMATION IN ENGLISH

DEVELOPMENT OF ELECTRIC FACILITIES DISPATCHING OF INDUSTRIAL ENTERPRISE AS A STEP TO ITS DIGITAL TRANSFORMATION

Svetlana V. Fedorova

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, the Head of the Department of Power Engineering, UMMC technical University, Verkhnyaya Pyshma, Russia. E-mail: s.fedorova@ugmk.com.

Andrey N. Shemetov

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, the Head of the Information and Analytical Department, Strategic Planning Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: a.shemetov@magtu.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7184-2190>

The article presents the successful practices of development of dispatching of electric facilities on the example of a number of industrial enterprises of mining and metallurgical complex, implemented through digital transformation. The main directions of improvement of system of dispatching of electric facilities of the enterprises taking into account successful practices on implementation of systems of management of energy resources are formulated. The results of the pilot project of building a dispatching control system at one of the zinc enterprises at the level of the Department – sulfuric acid shop-are described. Reduced downtime of process equipment by more than 25% has been achieved. According to the results of the study at a number of metallurgical enterprises of the current state of their dispatching control system and management of electric facilities, an algorithm for improving dispatching as a new step towards its digital transformation has been developed. The work on the algorithm is transformed into a pre-project study with the development of technical specifications for the implementation of the proposed technical solutions and is a preparation for the planning of a pilot local project at the unit level. The article provides recommendations for replacement of the power equipment of the substation with the digital transformation and justification for the development of system collapse based on the assessment of the sustainability of technocenosis. The paper presents an example of constructing elements of expert system for condition assessment of power equipment of substations, as well as significant technological equipment of enterprises on the basis of the indicative method enabling to generate data to predict equipment condition and control the cost of repairs and maintenance of equipment.

Keywords: dispatching, electrical equipment, algorithm, technocenosis, indicative method, equipment condition assessment, digital transformation.

REFERENCES

- Shekhtman M.B. Digital enterprise: seven distinguishing features // Data portal on energy saving «Energoatlas.ru». 29.05.2018. URL: <http://www.energoatlas.ru/2018/05/29/shekhtman-digital-company>.
- Information and reference book 48-2017. Energy efficiency improvement in business and other activities. Information and reference book on the best available technologies. M.: NDT OFFICE, 2017. URL: <http://docs.cntd.ru/document/456096365>.
- Bernow S., Biewald B., Marron D. Full-cost dispatch: Incorporating environmental externalities in electric system operation // The Electricity Journal. Vol. 4, Issue 2. March 1991. P. 20-33.
- Zhang B.M. Development of power system control facilities in China // Electric Power Systems Research. Vol. 44. Issue 1. January 1998. P. 27-33.
- Bogaschewsky R., Rollberg R. Prozeß-orientiertes Management. Berlin: Springer, 1998. 340 p. [<https://doi.org/10.1007/978-3-642-58918-8>]
- Osztermayer J., Feser K. Enhanced Competitiveness with a Modern Asset Management System // Int. Symp. «Modern Electric Power Systems». Wrocław, Sept. 2002. P. 64-69.
- The Industrial Internet of Things, Volume B01: Business Strategy and Innovation Framework. IIC:PUB:B01:V1.0:PB:20161115, 2016. P. 20-28.
- Strogniy T.A., Trofimov A.V., Trofimov V.A. Practical experience of automation of design of failure monitoring system // *Elektricheskie stantsii* [Power stations]. 2016. No. 7. P. 51-55. (In Russian)
- Gagloeva I.E. Control of electrical power plants on the basis of assessment of their state // *Glavnyi energetik* [Chief power engineer]. 2016. No. 8. P. 34-42. (In Russian)
- Trofimov K.S. *Sistema dispetcherizatsii elektrosnabzheniya Komsomolskogo NPZ* [Dispatching system of electric power supply of Komsomolsk oil processing plant] // Oil and gas territory. 2016. No. 5. pp. 12-14. (In Russian)
- Belousenko I.V., Egorov A.V., Malinovskaya G.N. Some issues of developing automatic control systems of electric power supply for oil and gas enterprises // *Promyshlennaya energetika* [Industrial power engineering]. 2016. No. 8. P. 10-15. (In Russian)
- Kravtsov N., Afanasiev V. New solutions to improve the efficiency of technical record-keeping systems for large and medium industrial enterprises // *Tehnologii v elektronnoy promyshlennosti* [Technology in electronics manufacturing industry]. 2016. No.8. P. 52-56. (In Russian)
- Shemetov A.N., Fedorova S.V., Lyapin R.N., Kuznetsov S.V. Modern issues and prospects of forming a control model of the power department at mining and smelting enterprises // *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical systems and complexes]. 2016. No.4(33). P. 41-48. (In Russian)
- Fedorova S.V., Hudyakov P.Yu., Tomilin D.A. Development of dispatching control of the power supply department of a smelter // *Intellektualnaya energetika na transporte i v promyshlennosti* [Smart power engineering in transportation and industry]: papers of all-Russian youth scientific conference. 2018. P. 305-311. (In Russian)
- Golovinskii I.A. Methods of automatic control of the topological state of the equipment of electrical substations // Modern Applied Science. 2015. Vol. 9, No. 4. P. 53-66.
- Tavrida-electrician. Plug & Play engineering. Conceptually new approach to engineering. URL: <https://www.tavrida.com/ter/solutions/>
- Kudrin B.I. Mathematics of cenosis: kinds, ranks, ranks in accordance with the parameter of hyperbolical H-distribution and Lotka's law, Zipf's law, the Pareto principle, Mandelbrot's law // *Filosofskie osnovaniya tekhniki. Tsenologicheskie issledovaniya* [Philosophic fundamentals of technetics. Cenological investigations]. Issue. 19. M.: Center of system research, 2002. P. 357-412. (In Russian)
- Fedorova S.V., Tretyakov A.P. Making use of technocenological approach to analysis of power consumption and energy saving of Sverdlovsk region enterprises // *Vestnik Yuzno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of the South-Ural state University]. Series: Power engineering. 2012. No. 16(275). P. 92-97. (In Russian)
- Moschinskiy O.B. *Razrabotka modeli otsenki funktsionalnogo sostoyaniya sistemy elektrosnabzheniya megapolisov* [Development of the model to assess the state of the power supply systems of metropolitan cities Разработка модели оценки функционального состояния системы электро-снабжения мегаполисов]: abstract of a Ph.D. diss. / Ural Federal University named after the first president of Russia B.N. Yeltsin. Yekaterinburg, 2015. 24 p.
- Кокин С.Е. *Energo-informatsionnye modeli funktsionirovaniya i razvitiya sistem elektrosnabzheniya bolshih gorodov* [Power and information models of operation and development of electric power supply systems of large cities]: abstract of a Ph.D. diss. / Ural Federal University named after the first president of Russia B.N. Yeltsin. Yekaterinburg, 2013. 44 p.
- Halyasmaa A.I. Control system of technical assets of electricity supply network companies / A.I. Halyasmaa, S.A. Dmitriev, S.E. Kokin A.I. // *Promyshlennaya energetika* [Industrial power engineering]. 2014. No. 2. P. 36-40. (In Russian)
- Shemetov A.N. *Nadezhnost elektrosnabzheniya* [Reliability of electric power supply]. Magnitogorsk: Publishing center of Nosov State Technical University, 2007. 138 p. (In Russian)

23. Brown R.E., Luedtke F.A., Born M.F. Assessing the reliability of distribution // IEEE Computer Applications in Power, Jan. 2001. Vol. 14. P. 44-49.
24. Allan R., Billinton R. Power System Reliability and its Assessment: Part 3, distribution systems and economic considerations // Power Engineering Journal, Vol. 7. Issue 4. Aug. 1993. P. 185-192.
25. GOST 32144-2013. Quality standards of electric energy in general purpose electric power supply systems. M.: Standartinform publ., 2014. 20 p. (In Russian)
26. RF Government Ordinance as of 13.09.2016 no. 913 «The rates of charge for negative influence on environment and extra coefficients» – URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_204671/

Федорова С.В., Шеметов А.Н. Развитие диспетчеризации электрохозяйства промышленного предприятия как шаг к его цифровой трансформации // Электротехнические системы и комплексы. 2019. № 3(44). С. 27-33. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-3\(44\)-27-33](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-3(44)-27-33)

Fedorova S.V., Shemetov A.N. Development of Electric Facilities Dispatching of Industrial Enterprise as a Step to its Digital Transformation. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2019, no. 3(44), pp. 27-33. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-3\(44\)-27-33](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-3(44)-27-33)

Панарина М.С., Кушмилъ О.Е., Патшин Н.Т.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ВЫБОР И ПРОВЕРКА КАБЕЛЕЙ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ ПОДСТАНЦИЙ СРЕДСТВАМИ САПР

Проект электрической подстанции представляет из себя комплексную задачу, которая подразумевает выполнение серии однотипных расчетов, отнимающих значительное время. Рационально для выполнения таких операций использовать специализированное программное обеспечение САПР. В настоящее время существующие САПР объектов электроэнергетики либо предназначены для расчетов электрических сетей, либо позволяют выполнять только один или несколько этапов проекта подстанции. Данная работа посвящена разработке алгоритма САПР электрических подстанций, осуществляющей автоматизированное проектирование в комплексе, от технического задания до формирования комплекта проектной документации. В статье описан алгоритм автоматизированного выбора и проверки кабелей высокого напряжения, реализованный в данной САПР. Алгоритм учитывает требования ПУЭ и действующих руководящих указаний к условиям работы кабелей в нормальном, утяжеленном и аварийном режимах.

Ключевые слова: САПР, кабельная линия, подстанция, термическая стойкость, нагрев, утяжеленный режим, короткое замыкание, проектирование, автоматизация.

ВВЕДЕНИЕ

При проектировании понизительных подстанций рационально использовать САПР для выполнения отдельных этапов проекта. В частности, выбор и проверка электрооборудования связаны с выполнением большого количества однотипных расчетов, и использование САПР для выполнения данного этапа проекта позволит значительно сократить время, затрачиваемое проектировщиком, на выполнение расчетов и оформления связанной с ними проектной документации.

Наиболее широко САПР используются при выполнении электротехнических чертежей, так как содержат библиотеки элементов электрических схем, выполненных в соответствии с требованиями ЕСКД [1], что снижает вероятность ошибок и позволяет проектировщику выполнять чертежи однолинейных схем затрачивая меньше времени. Однако такой подход не избавляет проектировщика от необходимости выполнения расчетов. Более совершенными являются САПР, позволяющие проектировщику автоматизировать, например, расчет режима электрической сети [2-4]. Таким образом, проектировщик затрачивает время на принятие проектных решений, а не на выполнение рутинных расчетов.

При проектировании электроустановок, в частности, при выполнении раздела проекта, связанного с выбором и проверкой проводников воздушных и кабельных линий электропередачи, проектировщику приходится ориентироваться в большом объеме каталожных данных, а также выполнять однотипные расчеты для каждого присоединения и каждого проводника. В этом случае эффективно использовать САПР, содержащие базы данных электрооборудования [5].

Разработаны САПР, предназначенные для выбора проводников и проектирования сетей напряжением до 1 кВ. Это могут быть промышленные сети [6-8], сети жилых и общественных зданий [5]. Также автоматизированный выбор проводников может быть выполнен с помощью САПР общего назначения [9].

Ряд работ посвящены алгоритмам САПР электрических сетей [10], в частности, [11] реализует алгоритм оптимального распределения материала проводника в проектируемой распределительной сети, основанный на теории графов.

САПР используются для проектирования конструкции кабелей [12, 13], оптимизации конструктивного исполнения опор воздушных линий электропередачи [14]. Также задача выбора и проверки сечений проводов и кабелей может быть решена средствами САПР [15]. Существуют работы, посвященные автоматизированному выбору и проверке гибкой ошиновки распределительных устройств [16], а также проводников вторичных цепей в цепях релейной защиты [17].

Все предложенные на настоящий момент решения не позволяют реализовать комплексный подход к проектированию электрических подстанций, а автоматизируют только один из этапов проекта. Таким образом, актуальной является задача разработки САПР [18], позволяющей в автоматическом режиме выполнять проектирование подстанции и создавать комплект проектной документации, используя встроенную базу данных электрооборудования [19]. Данная работа посвящена описанию алгоритма автоматизированного выбора и проверки сечений кабелей высокого напряжения, входящего в состав САПР электрических подстанций.

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ВЫБОР КАБЕЛЕЙ

Исходными данными для выбора и проверки кабелей высокого напряжения являются класс напряжения проектируемого распределительного устройства $U_{рв}$, типы присоединений, ток нормального ($I_{нар}$) и утяжеленного режимов $I_{нар.мах}$ для каждого присоединения распределительного устройства и начальное значение периодической составляющей тока трехфазного короткого замыкания на шинах распределительного устройства $I_{п0}$. Напряжение распределительного устройства и типы присоединений на нем задаются проектировщиком через пользовательский интерфейс САПР в качестве технического задания на проектирование. Токи

нормального и утяжеленного режимов определяются в зависимости от вида присоединения. Так, для присоединений силовых трансформаторов учитывается их номинальная мощность $S_{Т.ном}$, число параллельных ветвей каждой обмотки n_b , а также перегрузочная способность $k_{з.Т}$. Для линий питающих и потребительских электропередачи учитываются протекающая нагрузка и требования к взаимному резервированию. Для присоединений, отходящих к высоковольтным двигателям и компенсирующим устройствам в качестве утяжеленного рассматривается режим при работе с номинальной мощностью.

После ввода исходных данных программно проверяется условие соответствия изоляции кабелей классу напряжения сети

$$U_{ном.i} \geq U_{ру}, \quad (1)$$

где $U_{ном.i}$ – номинальное напряжение i -го кабеля из базы данных.

Далее для каждого i -го присоединения определяется ток нормального и утяжеленного режима. В соответствии с током нормального режима проектировщику в качестве рекомендации выдается значение экономически целесообразного сечения жилы кабеля $S_{эк}$ для каждого присоединения, определяемое методом экономической плотности тока по известному выражению:

$$S_{эк} = \frac{I_{нагр}}{j_{эк}}, \quad (2)$$

где $j_{эк}$ – экономическая плотность тока, А/мм², которая определяется в соответствии с ПУЭ.

По току утяжеленного режима определяется допустимое сечение жилы кабеля

$$I_{ном.i} \geq I_{нагр.мах}. \quad (3)$$

Алгоритм определения тока утяжеленного режима представлен на **рисунке**, на котором использованы следующие обозначения:

$S_{дв}$ – номинальная полная мощность двигателя, кВА;

$P_{дв}$ – номинальная мощность двигателя, кВт;

$S_{тсн}$ – номинальная мощность трансформатора собственных нужд, кВА;

n_p – число взаимно резервируемых линий;

$\cos\varphi_{ном}$ – номинальный коэффициент мощности двигателя;

$\eta_{ном}$ – номинальный КПД двигателя, о.е.;

$Q_{КУ.ном}$ – номинальная мощность компенсирующего устройства, квар.

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ПРОВЕРКА КАБЕЛЕЙ ПО УСЛОВИЯМ РЕЖИМА КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

Для проверки кабеля на термическую стойкость необходимо знать величину $I_{п0}$ при трехфазном коротком замыкании на сборных шинах проектируемого распределительного устройства, а также длительность его протекания. Длительность протекания тока короткого замыкания определяется временем отключения цепи $t_{отк}$, которое складывается из полного времени

отключения выключателя на данном присоединении $t_{о.в}$ и времени срабатывания релейной защиты $t_{рз}$. В **таблице** приведены принятые в алгоритме времена срабатывания релейной защиты для различных видов присоединений, основанные на требованиях ПУЭ к оснащению распределительных устройств средствами РЗА.

Способ проверки кабеля на термическую стойкость зависит от вида изоляции.

Термическая стойкость кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена оценивается по величине односекундного тока короткого замыкания. Причем проверке подлежит не только токопроводящая жила, но и экран кабеля. Жила проверяется по току трехфазного короткого замыкания, а экран – по току двухфазного короткого замыкания.

Для проверки жилы значение допустимого односекундного тока короткого замыкания, взятое из базы данных, необходимо привести к действительной продолжительности аварийного режима:

$$I_{терм} = \frac{I_{к1}}{\sqrt{t_{кз}}}, \quad (4)$$

где $I_{к1}$ – допустимое значение односекундного тока трехфазного короткого замыкания по жиле кабеля (из базы данных), кА.

Условием проверки жилы на термическую стойкость будет выражение

$$I_{терм} \geq I_{п0}. \quad (5)$$

Для проверки экрана на термическую стойкость алгоритмом предусмотрено упрощенное определение двухфазного тока короткого замыкания:

$$I_{п0.2} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{п0}. \quad (6)$$

Допустимое значение односекундного тока короткого замыкания по экрану определяется следующим образом:

$$I_{терм.экp} = \frac{0,203S_{экp}}{\sqrt{t_{кз}}}, \quad (7)$$

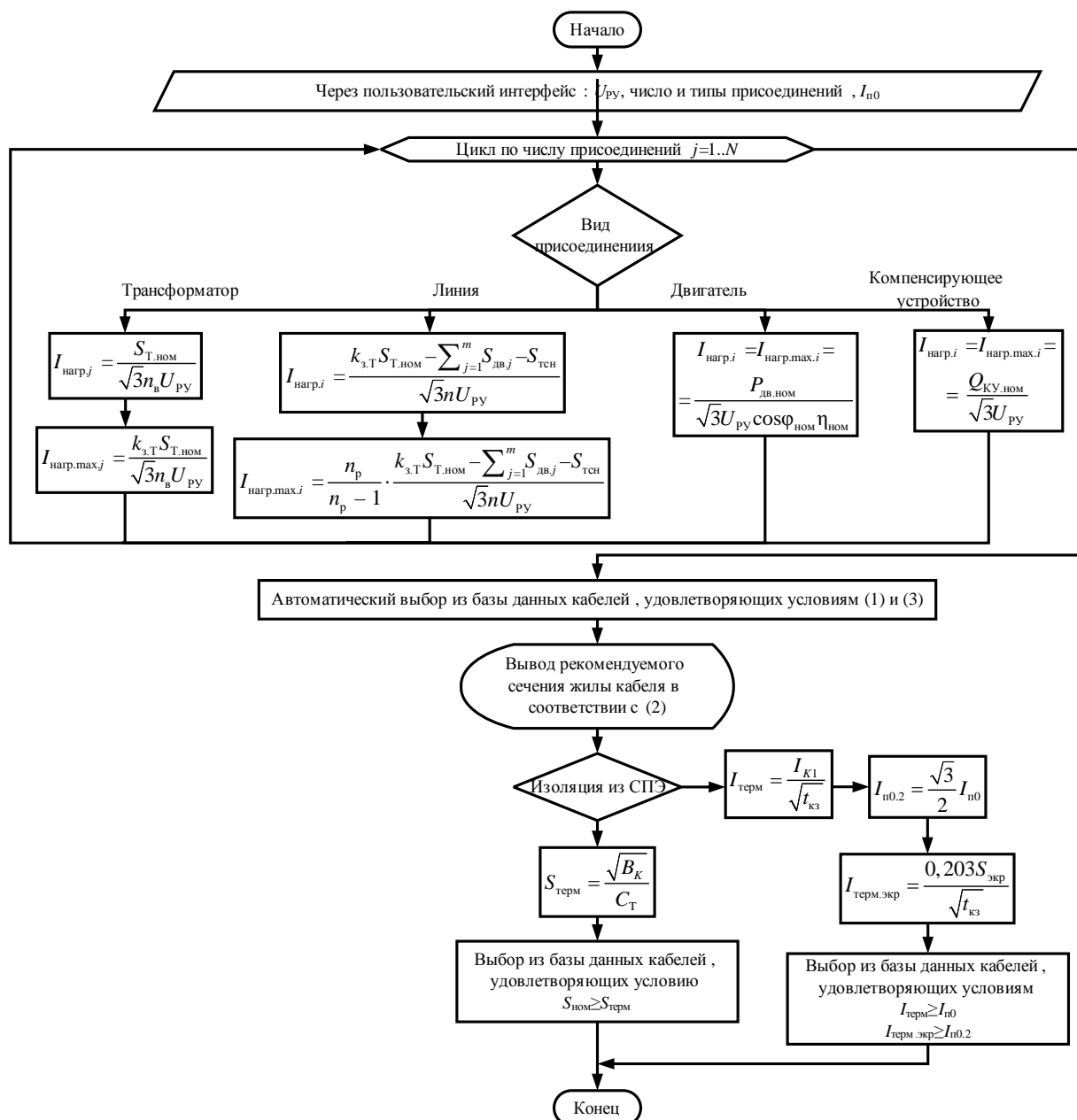
где $S_{экp}$ – сечение экрана, мм².

Условие проверки экрана на термическую стойкость:

$$I_{терм.экp} \geq I_{п0.2}. \quad (8)$$

Время срабатывания РЗ на различных присоединениях

Присоединение	$t_{рз}$, с
Линия с односторонним питанием	0,5
Трансформатор с высшим напряжением 6-10 кВ	
Трансформатор с высшим напряжением 35 кВ и выше (выводы НН)	
Двигатель	0,2
Трансформатор с высшим напряжением 35 кВ и выше (выводы ВН, СН)	
Компенсирующее устройство	
Линия с двухсторонним питанием	



Алгоритм автоматизированного выбора и проверки кабелей высокого напряжения

Кабели с другими видами изоляции проверяются по термическому сечению. Для этого для каждого типа присоединения рассчитывается тепловой импульс

$$B_K = I_{п0}^2 (t_{отк} + T_a), \quad (9)$$

где T_a – постоянная времени цепи, с.

В соответствии с требованиями руководящих указаний по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования термическое сечение определяется по формуле

$$S_{терм} = \frac{\sqrt{B_K}}{C_T}, \quad (10)$$

где C_T – постоянная, зависящая от материала жилы, $A \cdot c^{1/2}/mm^2$.

Для кабелей с алюминиевой жилой $C_T = 90 A \cdot c^{1/2}/mm^2$, для кабелей с медной жилой $C_T = 170 A \cdot c^{1/2}/mm^2$.

Условие проверки кабеля в таком случае

$$S_{ном} \geq S_{терм}, \quad (11)$$

где $S_{ном}$ – сечение жилы проверяемого кабеля (из базы данных), mm^2 .

По результатам выполнения описанного алгоритма проектировщику доступны для выбора из базы данных те кабели, которые удовлетворяют условиям (1), (3), (5) и (8) или (11).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описанный в статье алгоритм позволяет в автоматическом режиме выбирать и проверять кабельные линии по условиям их работы в нормальном, утяжеленном и аварийном режимах. Данный алгоритм выполнен с учетом действующих требований ПУЭ и руководящих указаний по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования.

Алгоритм реализован в оригинальном программном

обеспечении САПР электрических подстанций, которое позволяет проектировщику выполнять рутинные расчеты при выполнении проекта в автоматическом режиме, вносить изменения в проект на любом его этапе и формировать комплект проектной документации и рабочие чертежи.

Работа выполняется при поддержке гранта Президента РФ для молодых ученых – кандидатов наук МК-939.2019.8.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кувшинов Н.С. Компьютерные технологии выполнения схем электрических принципиальных с учетом требований ГОСТ ЕСКД // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2016. Т. 16. №1. С. 5-20.
2. Малафеев А.В., Панова Е.А. Алгоритм расчета сложно-несимметричных режимов систем электроснабжения промышленных предприятий // Главный энергетик. 2011. №3. С. 35-39.
3. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RUS 2013616847 09.01.2013. Комплекс автоматизированного режимного анализа КАТРАН 7.0 / Игуменцев В.А., Малафеев А.В., Газизова О.В., Кондрашова Ю.Н., Панова Е.А., Кочкина А.В., Зиновьев В.В. №2013610067; заявл. 09.01.2013; опублик. 24.07.2013.
4. Оптимизация режимов промышленных электростанций с учетом зависимых ограничений по условиям статической устойчивости и длительной несимметрии / А.В. Малафеев, А.В. Кочкина, О.В. Газизова, Е.А. Панова Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2014. 119 с.
5. Добродей А.О., Воронович А.А. Автоматизация расчетов при проектировании систем электроснабжения жилых домов // Агротехника и энергообеспечение. 2018. №1(18). С. 35-46.
6. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RUS 201961205 8.02.2019. «SMART ENERGY CAD» / Рагуткин А.В., Винокуров О.Е., Магомедов Ш.Г., Тарланов А.Т. № 2018664386; заявл. 06.12.2018; опублик. 08.02.2019.
7. Dawson, Philhower, "Computer-Aided Design of Plant Electrical Systems," in IEEE Computer Graphics and Applications, vol. 2, no. 1, pp. 31-37, Jan. 1982.
8. Бершадский И.А., Ковалев А.П., Згарбул А.В. Разработка САПР для проектирования электроснабжения цеха на напряжении 0,4 кВ // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2015. №4. С. 47-52.
9. Программа выбора аппаратуры, кабелей и защит в сетях 0,4 кВ / В.И. Готман, С.Г. Сносаренко, А.В. Скорцов, С.Н. Аверин, А.Д. Кадай // Проблемы и перспективы развития Томского нефтехимического комбината. Тезисы докладов 10-го отраслевого совещания. Томск: Научно-исследовательский центр ОАО «ТНХК», 1996. С. 89-90.
10. K.L. Lo, I. Nashid, "Interactive expert system for optimal design of electricity distribution systems," in IEE Proceedings – Generation, Transmission and Distribution, vol. 143, no. 2, pp. 151-156, March 1996.
11. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RUS 2018613378 23.01.2018. Программа для исследования топологии и оптимизации распределения проводящего материала при проектировании электрической сети / Лоскутов А.Б., Мартынюк М.В., Зырин Д.В., Лоскутов А.А., Бедретдинов Р.Ш., Демидова А.С. №2018610411; заявл. 23.01.2018; опублик. 13.03.2018.
12. T. Carton, A. H. Peyrot, "Computer aided structural and geometric design of power lines," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 7, no. 1, pp. 438-443, Feb. 1992.
13. A.N. Peyrot, E.M. Peyrot, T. Carton, "Interaction and integration in power line design," in IEEE Computer Applications in Power, vol. 5, no. 4, pp. 19-23, Oct. 1992.
14. Смазнов Д.Н. Использование САПР для решения исследовательских задач при проектировании опор воздушных линий электропередачи // Инженерно-строительный журнал. 2009. №1(3). С. 6-12.
15. Елисеев Д.С. Алгоритмы САПР для выбора проводов и кабелей. Волгоград: Волгоградский государственный аграрный университет, 2012. 184 с.
16. Воронин А.А., Одрозова В.А., Наурзов Т.Б. Система автоматизированного выбора гибких сборных шин распределительных устройств // Электроэнергетика глазами молодежи: материалы VIII Международной научно-технической конференции, 02 – 06 октября 2017, Самара. В 3 т. Т.1. Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2017. С. 154-157.
17. Рыбалкин А.Д., Иванченко А.Н., Шурупов А.А. Программа выбора сечения кабеля в токовых цепях релейной защиты // Электрические станции. 2016. №1(1014). С. 35-38.
18. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RUS 2018660517 30.07.2018. ОРУ CAD / А.В. Варганова, Е.А. Панова, Т.В. Хатюшина, В.С. Кононенко, Х.М. Багаева.
19. Разработка базы данных электрооборудования 35-220 кВ для САПР "ОРУ CAD" / А.В. Варганова, Е.А. Панова, Т.В. Хатюшина, В.С. Кононенко, Х.М. Багаева // Электротехнические системы и комплексы. 2018. №2(39). С. 28-33.

Поступила в редакцию 4 июня 2019 г.

INFORMATION IN ENGLISH

AUTOMATED SELECTION AND CHECK OF HIGH VOLTAGE CABLES WHEN DESIGNING DISTRIBUTION DEVICES OF SUBSTATIONS BY CAD

Mariya S. Panarina

Graduate student, Department of Electric Power Supply of Industrial Enterprises, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: panarina.m0507@gmail.ru.

Oleg E. Kushmil'

Graduate student, Department of Electric Power Supply of Industrial Enterprises, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Nikolay T. Patshin

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Electric Power Supply of Industrial Enterprises Department, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

The design of an electrical substation is a complex task, which involves the execution of a series of the same type of calculations, which take considerable time. It is rational to use specialized CAD software to perform such operations. Currently, the existing CAD systems of electric power facilities are either designed for calculating electric networks, or they allow only one or several stages of the substation project to be performed. This paper is devoted to the development of a CAD algorithm for electrical substations that carries out computer-aided design in a complex, from the terms of reference to the formation of a set of design documentation. The article describes the algorithm for the automated selection and verification of high voltage cables implemented in this CAD system. The algorithm takes into account the requirements of the rules for the operation of electrical utilities and the current guidelines for the operation of cables in normal, heavy and emergency conditions.

Keywords: CAD, cable line, substation, thermal stability, heating, heavy duty, short circuit, design, automation/

REFERENCES

1. Kuvshinov N.S. Computer technology of implementation of schemes electrical schematic on the basis of Russian state standard of unified system of design documentation. *Vestnik YuUrGU. Seriya: Komp'yuternye tekhnologii, upravlenie, radioelektronika* [Bulletin of the South Ural State University. Computer Technologies, Automatic Control & Radioelectronics], 2016, vol. 16, no. 1, pp. 5-20 (In Russian).
2. Malafeev A.V., Panova E.A. Calculation algorithm for complex out-of-balance modes of electrical supply systems of industrial enterprises. *Glavnyy energetik* [Chief power engineer], 2011, no. 3, pp. 35-39 (In Russian).
3. Igumenshchev V.A., Malafeev A.V., Gazizova O.V., Kondrashova Yu.N., Panova E.A., Kochkina A.V., Zinov'ev V.V. *Kompleks avtomatizirovannogo rezhimnogo analiza KATRAN 7.0* [A complex of automated mode analysis KATRAN 7.0]. Software RF 2013616847, 2013.
4. Malafeev A.V., Kochkina A.V., Gazizova A.V., Panova E.A. *Optimizatsiya rezhimov promyshlennykh elektrostantsiy s uchetom zavisimyykh ogranicheniy po usloviyam staticheskoy ustoychivosti i dlitel'noy nesimmetrii* [Industrial Power Stations Conditions Optimization Taking Into Account Dependent Limitations of Steady State Stability and Unbalanced Conditions]. Magnitogorsk, NMSTU, 2014, 119 p. (In Russian).
5. Dobrodey A.O., Voronovich A.A. Automation of calculations in the designing of power supply systems of residential buildings. *Agrotekhnika i energoobespechenie* [Agrotechnics and energy supply], 2018, no. 1 (18), pp. 35-46 (In Russian).
6. Ragutkin A.V., Vinokurov O.E., Magomedov Sh.G., Tarlanov A.T. «SMART ENERGY CAD». Software RF 201961205, 2019.
7. Dawson and Philhower, "Computer-Aided Design of Plant Electrical Systems," in *IEEE Computer Graphics and Applications*, vol. 2, no. 1, pp. 31-37, Jan. 1982.
8. Bershadskiy I.A., Kovalev A.P., Zgarbul A.V. CAD design for the design of power supply of the workshop at a voltage of 0.4 kV. *Elektro. Elektrotehnika, elektroenergetika, elektrotekhnicheskaya promyshlennost'* [Electro Electrical engineering, electric power industry, electrical industry], 2015, no. 4, pp. 47-52 (In Russian).
9. Gotman V.I., Slyusarenko S.G., Skvortsov A.V., Averin S.N., Kaday A.D. The program for the selection of equipment, cables and shields in 0.4 kV networks. *Problemy i perspektivy razvitiya Tomskogo neftekhimicheskogo kombinata* [Problems and development prospects of the Tomsk Petrochemical Plant], Tomsk, TNKhK Publ., 1996, pp. 89-90 (In Russian).
10. K.L. Lo, I. Nashid, "Interactive expert system for optimal design of electricity distribution systems," in *IEEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*, vol. 143, no. 2, pp. 151-156, March 1996.
11. Loskutov A.B., Martynyuk M.V., Zyrin D.V., Loskutov A.A., Bedretdinov R.Sh., Demidova A.S. *Programma dlya issledovaniya topologii i optimizatsii raspredeleniya provodyashchego materiala pri proektirovanii elektricheskoy seti* [A program for studying topology and optimizing the distribution of conductive material in the design of an electrical network]. Software RF 2018613378, 2018.
12. T. Carton, A.H. Peyrot, "Computer aided structural and geometric design of power lines," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 7, no. 1, pp. 438-443, Feb. 1992.
13. A.N. Peyrot, E.M. Peyrot, T. Carton, "Interaction and integration in power line design," in *IEEE Computer Applications in Power*, vol. 5, no. 4, pp. 19-23, Oct. 1992.
14. Smaznov D.N. The use of CAD for solving research problems in the design of the supports of overhead power lines. *Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal* [Magazine of Civil Engineering], 2009, no. 1(3), pp. 6-12 (In Russian).
15. Eliseev D.S. *Algoritmy SAPR dlya vybora provodov i kabeley* [CAD algorithms for selecting wires and cables], Volgograd State Agrarian University Publ, 2012, 184 p. (In Russian).
16. Voronin A.A., Odruzova V.A., Naurzov T.B. System of automated selection of flexible busbars of switchgears. *Elektroenergetika glazami molodezhi* [Electricity through the eyes of youth], 2017, vol. 1, pp. 154-157 (In Russian).
17. Rybalkin A.D., Ivanchenko A.N., Shurupov A.A. The program for selection cross section of cable into the current circuit of relay protection. *Elektricheskie stantsii* [Power Technology and Engineering], 2016, no. 1 (1014), pp. 35-38 (In Russian).
18. Varganova A.V., Panova E.A., Khatyushina T.V., Kononenko V.S., Bagaeva Kh.M. *ORU CAD* [ORU CAD]. Software, no. RUS 2018660517. 30.07.2018.
19. Varganova A.V., Panova E.A., Khatyushina T.V., Kononenko V.S., Bagaeva Kh.M. [Development of Electrical Equipment Database of 35-220 kV for "ORU CAD"]. *Electrotechnical Systems and Complexes*, 2018, no. 2(39), pp. 28-33 (In Russ.).

Панарина М.С., Кушмилъ О.Е., Патшин Н.Т. Автоматизированный выбор и проверка кабелей высокого напряжения при проектировании распределительных устройств подстанций средствами САПР// *Электротехнические системы и комплексы*. 2019. № 3(44). С. 34-38. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-3\(44\)-34-38](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-3(44)-34-38)

Panarina M.S., Kushmil' O.E., Patshin N.T. Automated Selection and Check of High Voltage Cables when Designing Distribution Devices of Substations by CAD. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2019, no. 3(44), pp. 34-38. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-3\(44\)-34-38](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-3(44)-34-38)

СПОСОБ КОМПЕНСАЦИИ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПРОКАТНОЙ КЛЕТИ ЗА СЧЕТ ОПЕРЕЖАЮЩЕГО УВЕЛИЧЕНИЯ СКОРОСТИ

Целью исследования является ограничение динамических нагрузок электромеханических систем валков клетей прокатных станов, работающих с ударным приложением нагрузки. Исследования выполнены на примере электропривода реверсивной клетки толстолистового стана 5000 ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (ПАО «ММК»). Отмечена актуальность решения данной проблемы, обусловленная расширением сортамента за счет производства проката из труднодеформируемых марок стали. Раскрыта причина недопустимых динамических нагрузок при захвате металла валками вследствие наличия угловых зазоров в механических передачах. Рассмотрен механизм возникновения ударов в шпиндельных соединениях при замыкании углового зазора. Показано, что основным известным способом их ограничения является захват металла в режиме ускорения электропривода. Выполнен анализ осциллограмм моментов двигателей и моментов валу шпинделей реверсивной клетки стана 5000 при захвате металла валками. Сделан вывод, что, несмотря на существенное ограничение нагрузок, известный способ не обеспечивает необходимого снижения динамического момента. В качестве основной причины названо перерегулирование момента, обусловленное настройкой двухконтурной системы автоматического регулирования (САР) скорости электропривода. С целью ограничения данной составляющей предложен способ опережающего увеличения скорости на величину динамической ошибки регулирования скорости при ударном приложении нагрузки. Предложены эмпирические зависимости для вычисления ошибки регулирования скорости при ударе приложении нагрузки. Представлены осциллограммы координат электропривода при захвате металла валками при реализации разработанного алгоритма управления на стане 5000. Показано снижение ударной нагрузки в 1,45 раза, что подтверждает техническую эффективность разработанного способа. Для дальнейшего снижения динамических нагрузок рекомендовано формирование тахограмм электропривода, предусматривающих торможение двигателя с заданным темпом после захвата.

Ключевые слова: толстолистовой прокатный стан, реверсивная клеть, главная линия, шпиндельное соединение, угловой зазор, нагрузка, ударное приложение, момент, перерегулирование, ограничение, электропривод, скорость, способ, система, разработка, экспериментальные исследования, рекомендации.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема ограничения динамических нагрузок электромеханических систем клетей актуальна для всех прокатных станов, работающих с ударным приложением нагрузки, в том числе для толстолистового стана 5000 ПАО «ММК» (далее – стан 5000). Реверсивная клеть этого стана является самой мощной в Европе, ее фотография представлена на **рис. 1**. Основной продукцией толстолистовых станов является заготовка для труб большого диаметра, необходимых для строительства газопроводов.

В последние годы проблема ограничения нагрузок приобрела особую актуальность в связи расширением сортамента за счет производства проката из труднодеформируемых марок стали [1].



Рис. 1. Фотография реверсивной клетки стана 5000

В этих условиях увеличиваются нагрузки электромеханических систем в установившемся и динамических режимах. Так, на стане 5000 установившиеся моменты двигателей верхнего и нижнего валков достигают 150–200% номинального значения. Динамические броски момента, возникающие при входе заготовки в клеть, превышают номинальный момент в 2–2,5 раза и выходят на уровень ограничения [2].

Одной из основных причин недопустимых динамических нагрузок при захвате металла валками является наличие угловых зазоров в механических передачах. Основными «заворообразующими» узлами главной линии реверсивной клетки толстолистового стана являются шпиндельные соединения, в большей степени со стороны рабочего валка. Их близость к клетю, наклонное положение, высокая температура, попадание окалины и воды вызывают повышенный износ валковых муфт и бронзовых вкладышей.

В реверсивной клетю стана 5000 установлены шпиндели слипперного типа (slipper type), конструкция которых показана на **рис. 2, а**. Непосредственно сочленение валка со шпинделем осуществляется с помощью головки специальной конструкции, которая крепится к рабочему валу. Аналогичная головка смонтирована со стороны двигателя электропривода. Вал шпинделя имеет шлицевую конструкцию для компенсации осевого смещения при сдвиге валков системой CVC^{plus} [3]. Опорный подшипник шпинделя расположен в районе середины вала. Каждый шпиндель уравнивается индивидуально с помощью гидроцилиндра, рычагов и штоков в вертикальном и горизонтальном направлениях [4, 5].

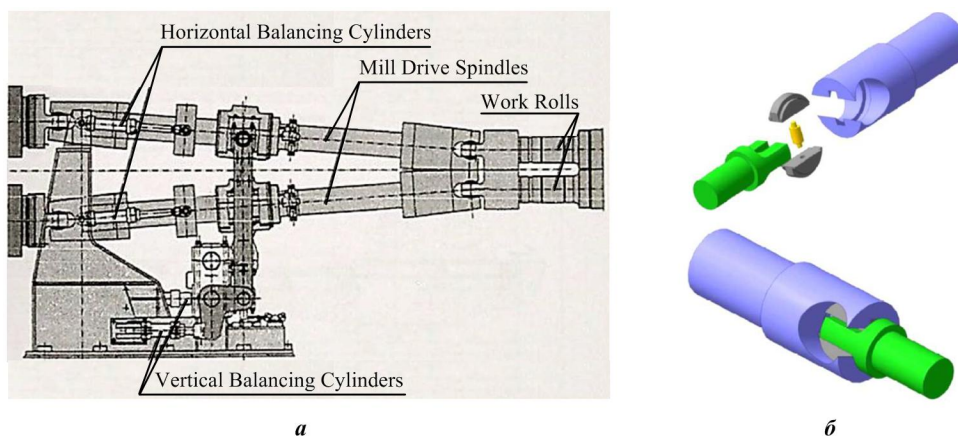


Рис. 2. Конструкция главной линии клетки стана 5000 (а), изображение деталей шпиндельного соединения и пояснение к возникновению ударов (б)

Механизм возникновения ударов при закрытии (замыкании) зазора поясняет рис. 2, б [6]. В процессе вращения происходит периодическое соударение головок шпинделя с хвостовиком вала. В результате возникают колебательные динамические процессы в передачах. Динамические удары в момент захвата заготовки приводят к преждевременному износу и поломкам механического оборудования. Одной из наиболее опасных аварий является поломка шпиндельных соединений, поскольку она приводит к длительным простоям стана и значительным затратам на устранение последствий. Это подтверждает актуальность решения проблемы снижения динамических нагрузок электро-механических систем клетки за счет совершенствования алгоритмов управления электроприводами. Представленная публикация посвящена рассмотрению данного вопроса.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Авторским коллективом от ЮУрГУ и МГТУ в течение нескольких лет выполняются исследования по совершенствованию алгоритмов управления электроприводами, обеспечивающих снижение нагрузок в динамических режимах. Основные результаты опубликованы в статьях и докладах, в том числе в [7–10].

С целью замыкания углового зазора рекомендуется осуществлять захват металла в режиме ускорения валков. Для этого должен быть обеспечен предварительный разгон (предразгон) электропривода. Переходные процессы при захвате металла в этом режиме исследованы в работах [11, 12]. Доказано, что в главных линиях, выполненных по безредукторной схеме, при правильном выборе времени предразгона обеспечивается гарантированное замыкание углового зазора. В публикациях [13, 14] подтверждена эффективность применения данного способа на широкополосных станах горячей прокатки.

На рис. 3 представлены осциллограммы момента $M_{дв}$ и скорости n двигателя электропривода, а также момента M_B , измеренного на валу шпинделя верхнего вала реверсивной клетки стана 5000. Осциллограммы на рис. 3, а получены в режиме захвата металла при полностью открытых угловых зазорах. Это обеспечивается путем замедления электропривода в интервале времени t_1-t_2 . Зависимости на рис. 3, б получены при

предварительно закрытых зазорах за счет ускорения электропривода в аналогичном интервале времени. Замыкание углового зазора происходит в момент времени t_3 , это подтверждают небольшие увеличения (всплески) на осциллограммах моментов двигателя и шпинделя.

Из осциллограмм следует, что динамические отклонения моментов $M_{дв}$ и M_B идентичны, их амплитуды отличаются незначительно. Поэтому ниже анализируется только электромагнитный момент двигателя, а полученные результаты могут быть отнесены к динамическим показателям момента на валу шпинделя.

Динамические отклонения момента и скорости для сравниваемых случаев приведены в столбцах таблицы со ссылкой на рис. 3. Здесь же показаны параметры процесса захвата, осциллограммы которого приведены ниже на рис. 7. Амплитуду ударного момента характеризует кратность k_m , которая определяется как отношение максимального значения M_{max} к установившемуся $M_{ст}$. Для оценки динамического снижения скорости приведена ошибка регулирования (просадка Δ , %), которая определяется как процентное отношение минимальной скорости n_{min} к ее значению перед захватом n_3 .

Анализ осциллограмм и данных таблицы позволяет сделать следующие выводы:

- амплитуда ударного момента при захвате с разомкнутым зазором (рис. 3, а) в 1,9 раза превышает установившийся момент прокатки (максимальное значение $M_{max}=3250$ кН·м, установившееся $M_{ст}=1750$ кН·м);
- динамическое отклонение скорости электропривода благодаря замыканию зазора уменьшается в 1,5 раза от 13,4 % на рис. 3, а до 9,2 % на рис. 3, б;
- аналогично, кратность динамического момента $M_{дв}$ снижается в 1,2 раза (от 1,9 на рис. 3, а до 1,6 на рис. 3, б).

Динамические отклонения моментов и скоростей при захвате

Параметр	Величина на осциллограммах								
	рис. 3, а			рис. 3, б			рис. 7		
Момент двигателя	$M_{ст}$	M_{max}	k_m	$M_{ст}$	M_{max}	k_m	$M_{ст}$	M_{max}	k_m
	кН·м	ед.		кН·м	ед.		кН·м	ед.	
	1750	3250	1,9	1750	2850	1,6	1400	1550	1,1
Скорость	n_3	n_{min}	Δ	n_3	n_{min}	Δ	n_3	n_{min}	Δ
	об/с		%	об/с		%	об/мин		%
	0,82	0,71	13,4	0,76	0,69	9,2	43	41	4,6

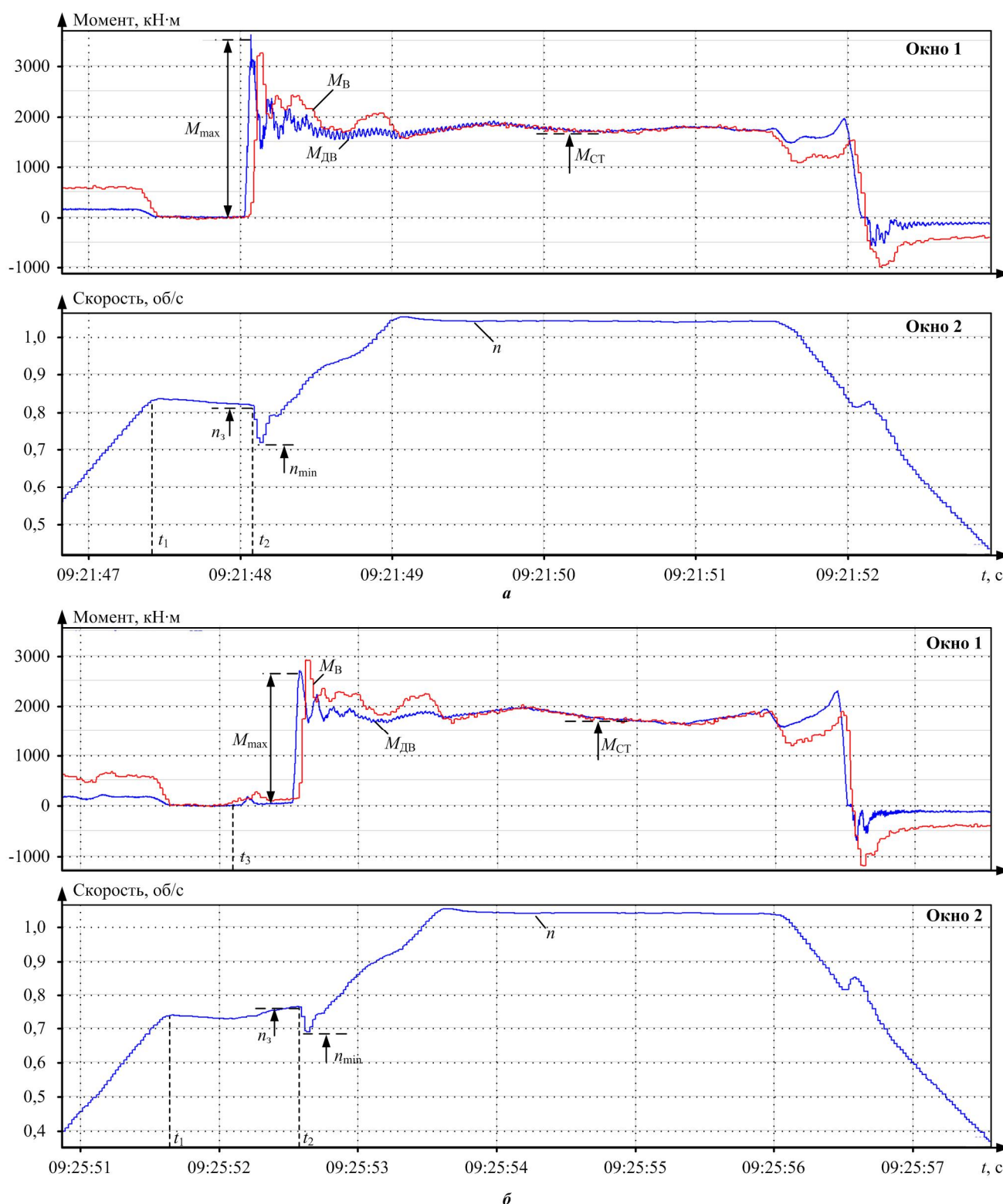


Рис. 3. Осциллограммы при захвате металла валками: окно 1 – моменты двигателя $M_{дв}$ и на валу шпинделя $M_{в}$; окно 2 – скорость двигателя n

В целом, по результатам экспериментальных исследований сделаны два основных вывода:

1. Известный способ предварительного выбора зазора в механических передачах обеспечивает значительное ограничение динамического момента двигателя и, соответственно, момента на передающем валу в режиме захвата.

2. При реализации известного способа перерегулирование момента и просадка скорости устраняются не

полностью. Это значит, что одного только предварительного разгона для полной компенсации динамического момента недостаточно.

Динамические показатели скорости и момента при ударном приложении нагрузки определяются быстродействием двухконтурной системы автоматического регулирования (САР) скорости. Известно, что при настройке этой системы на симметричный оптимум перерегулирование момента двигателя при ударном

приложении нагрузки составляет 43% [15]. Это вызывает аналогичные динамические увеличения момента на передающем валу шпинделя. В связи с этим ставится задача снижения составляющей динамического момента, связанной с настройкой САР скорости электропривода.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Схема системы задания и регулирования скоростей электроприводов верхнего и нижнего валков клетки стана 5000 представлена на **рис. 4** [11]. Электроприводы выполнены на основе синхронных двигателей М1, М2 с частотным регулированием скорости. Траектория прохода формируется моделью АСУ ТП по критериям производительности стана и получения заданного температурного режима прокатки. Задание на скорость $V_{\text{акт}}(t)$ в автоматическом режиме поступает из контроллера первого уровня, который формирует таблицу из точек желаемой траектории движения $S_{\text{акт}}(t)$. Основной темп разгона-торможения формируется интерполятором. С его выхода сигнал линейной скорости $v(t)$ подается на вход задатчика интенсивности (ЗИ), который служит для аварийного ограничения темпа задания. Выходной сигнал ЗИ преобразуется с учетом диаметров валков в задания угловых скоростей и поступает на входы контуров регулирования скорости.

В системе реализован принцип предварительного разгона электроприводов перед захватом. Он обеспечивается за счет включения в существующую схему дополнительных блоков, выделенных на **рис. 4** контуром. Для определения момента начала ускорения используется информация из системы слежения за металлом на рольгангах. Она поступает с выхода блока «Контроль положения заготовки относительно клетки». Для формирования приращения скорости используется дополнительный задатчик интенсивности ЗИ предразгона, выходной сигнал которого суммируется с выходным сигналом интерполятора. Максимальная линейная скорость принята равной 0,3 м/с, темп дополнительного уско-

рения установлен экспериментально и составляет 0,22 м/с² [12]. Указанные функции реализованы в виде алгоритма в управляющем контроллере.

ТРЕБОВАНИЯ К РАЗРАБАТЫВАЕМОЙ СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

С целью решения поставленной задачи выполнен анализ частотных свойств двухмассовой электромеханической системы валка реверсивной клетки стана 5000. Дана оценка влияния упругой связи на показатели регулирования момента двигателя при воздействии по каналам управления и возмущения. Для этого разработана модель, учитывающая упругую связь в валопроводе, зазор в шпиндельных соединениях и затухание процессов под действием диссипативных сил. Система автоматического регулирования скорости настроена на симметричный оптимум. Более подробно разработанная модель рассмотрена в публикациях [16, 17].

На **рис. 5** приведены графики переходных процессов момента двигателя, полученные с помощью модели. Они рассчитаны для ударного приложения номинальной нагрузки при различных постоянных времени интегральной части регулятора. Перерегулирование момента составляет от 44 до 63%, это подтверждает необходимость разработки решений по его ограничению.

В разрабатываемых способе и системе управления необходимо обеспечить выполнение следующих требований:

- предварительный разгон электропривода (чтобы сохранить его преимущества);
- компенсацию динамической просадки скорости при захвате с целью ограничения влияния настройки САР скорости на динамический момент (основной отличительный признак);
- возможность применения алгоритма управления как для однократно-интегрирующей, так и двукратно-интегрирующей системы регулирования скорости.

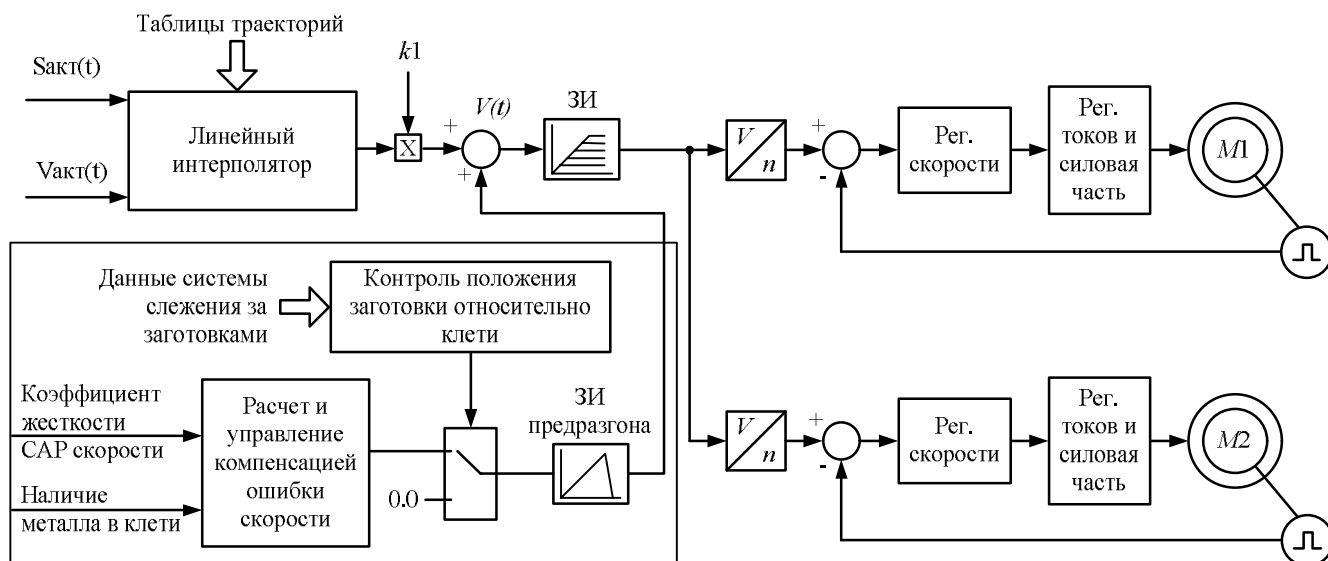


Рис. 4. Функциональная схема системы формирования тахограмм электроприводов клетки

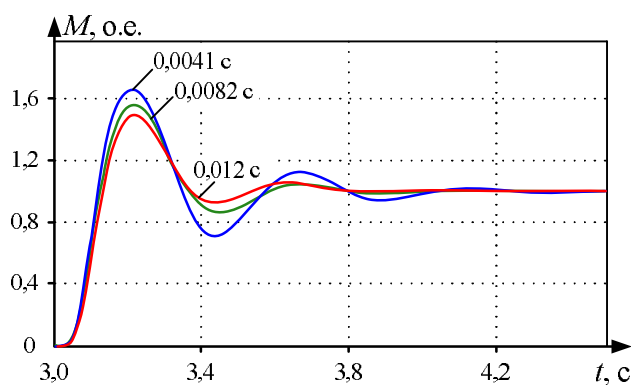


Рис. 5. Переходные процессы момента при различных постоянных времени регулятора скорости

СПОСОБ КОМПЕНСАЦИИ ДИНАМИЧЕСКОЙ ОШИБКИ СКОРОСТИ ЗА СЧЕТ ЕЕ ОПЕРЕЖАЮЩЕГО УВЕЛИЧЕНИЯ

Разработан способ управления электроприводом прокатного стана, являющийся развитием разработок [18, 19]. Суть способа заключается в ограничении динамического момента электропривода посредством упреждающего увеличения задания скорости на величину динамической ошибки регулирования скорости при ударном приложении нагрузки.

На рис. 6 представлены переходные процессы скорости и тока якоря в однократно-интегрирующей (кривые 1, 3) и двукратно-интегрирующей (кривые 2, 4) САР скорости электропривода в режиме ударного приложения нагрузки [20].

В однократно-интегрирующей системе имеет место статическая ошибка регулирования скорости $\Delta\omega_c$. Ее величина приближенно определяется по формуле

$$\Delta\omega_c = \left(\frac{2T_{mc}}{J_{пр}} \right) \Delta M_c, \quad (1)$$

где $J_{пр}$ – момент инерции электропривода, приведенный к валу двигателя; ΔM_c – прикладываемый момент статической нагрузки; T_{mc} – электромеханическая постоянная времени.

В двукратно-интегрирующей системе статическая ошибка регулирования скорости отсутствует. Максимальную динамическую ошибку скорости в такой системе можно оценить по эмпирической формуле:

$$\Delta\omega_d = \left(\frac{1,9T_{mc}}{J_{пр}} \right) \Delta M_c. \quad (2)$$

Таким образом, для компенсации динамического снижения скорости согласно разработанному способу скорость к моменту приложения нагрузки должна быть увеличена на составляющие, рассчитанные по выражениям (1) либо (2) в зависимости от настройки САР скорости электропривода.

Этот вывод справедлив как для синхронных электроприводов с частотным регулированием скорости, так и для тиристорных электроприводов постоянного тока, которые установлены на действующих прокатных станах.

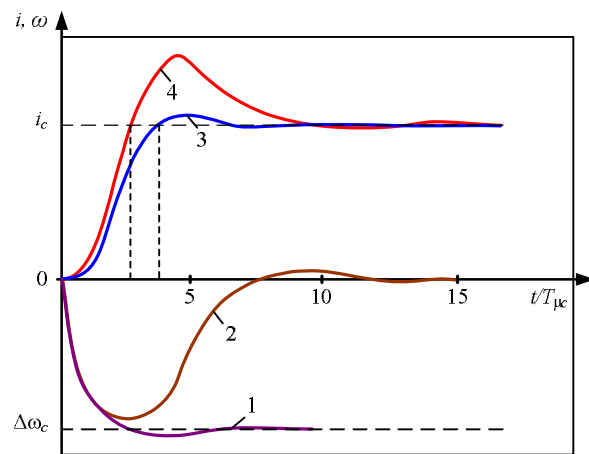


Рис. 6. Идеализированные переходные процессы электропривода при ударном приложении нагрузки

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

На рис. 7 приведены осциллограммы заданий скоростей n_0 , фактических (актуальных) скоростей $n_{ВГП}$, $n_{НГП}$ и моментов двигателей $M_{ВГП}$, $M_{НГП}$ главных приводов верхнего и нижнего валков (ВГП и НГП) клетки стана 5000. Они получены при испытаниях алгоритма, реализующего предложенный способ.

С этой целью до захвата металла валками к основному заданию скорости прибавляется величина динамического приращения скорости электропривода, рассчитанная по выражению (2). Она компенсирует динамическую просадку скорости при захвате. Это обеспечивается за счет предварительного ускорения электропривода в интервале t_1-t_2 .

При появлении усилия прокатки в момент t_2 сигнал компенсации просадки из основного задания скорости вычитается. Происходит снижение задания (и, соответственно, скорости) в интервале t_2-t_3 с заданным замедлением. Затем регулирование скорости осуществляется согласно технологии (происходит разгон до рабочей скорости и дальнейшее торможение).

Динамические отклонения скорости и момента представлены выше в столбцах таблицы с обозначением «рис. 7». Результаты их сравнения с показателями, соответствующими режиму предразгона без компенсации динамической ошибки скорости (см. рис. 3, б), позволили сделать следующие выводы:

1. Кратность ударного момента в предложенной системе составляет 1,1, в то время как в системе с предразгоном – 1,6. Таким образом, максимальный динамический момент снижен в 1,45 раза.

2. Динамическое отклонение скорости электропривода снижается в 2 раза, от 9,2 до 4,5 %.

3. На представленных осциллограммах предразгон осуществляется на 4,6% от $n_3 = 43$ об/мин до $n_{min} = 41$ об/мин. Динамическое снижение скорости при захвате $\Delta n_d = n_3 - n_{min}$ происходит практически на ту же величину, что наглядно демонстрируют осциллограммы. Это подтверждает справедливость расчета приращения скорости по зависимости (2).

Представленные результаты подтверждают техническую эффективность разработанного способа ограничения динамического момента за счет компенсации ошибки регулирования скорости при ударном приложении нагрузки.

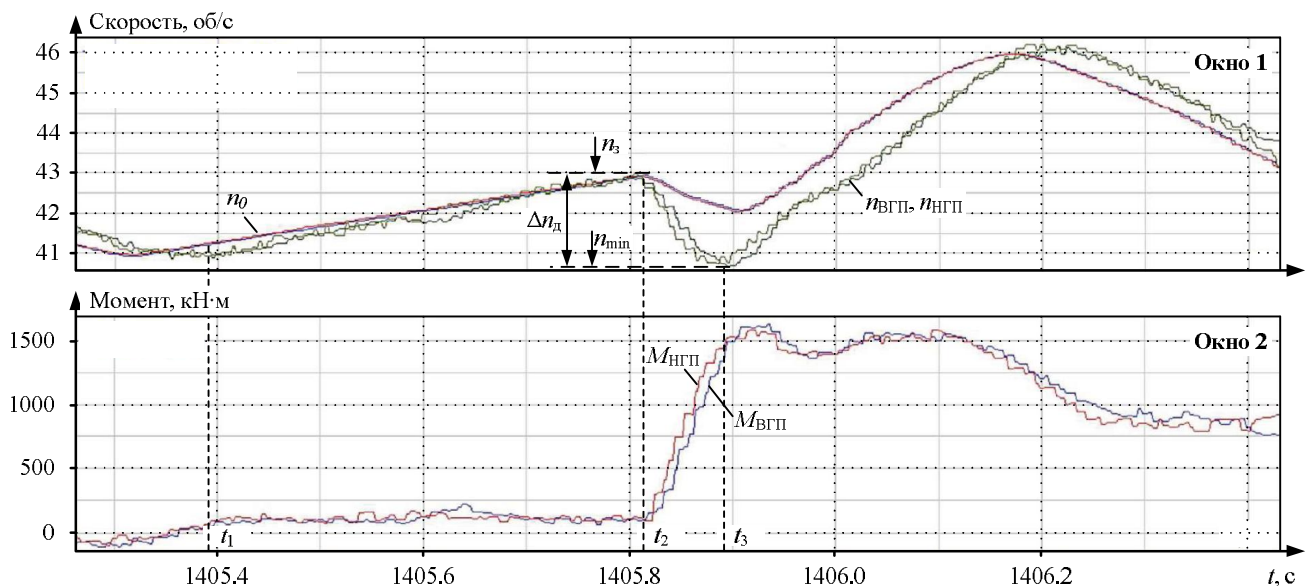


Рис. 7. Осциллограммы скоростей и моментов при захвате металла в разработанной системе: окно 1 – скорости двигателей ВГП и НГП; окно 2 – моменты двигателей

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Разработанный способ позволяет добиться снижения момента двигателя и, соответственно, упругого момента в передающем механизме за счет предварительного ускорения электропривода перед захватом и последующего снижения скорости после захвата.

Преимуществом данного способа является то, что не нужно формировать отдельно сигнал на ускорение для выбора угловых зазоров. Сигнал задания на предразгон формируется таким образом, чтобы приращение скорости в момент захвата соответствовало величине, необходимой для компенсации предварительно рассчитанной динамической просадки скорости.

Вместе с тем экспериментальные исследования показали, что данный способ не является абсолютно эффективным. При его реализации обеспечивается компенсация приращения момента, вызванного настройкой электропривода. Вместе с тем динамический момент при захвате в значительной степени зависит от упругих свойств валопроводов клетки.

Добиться компенсации влияния упругой составляющей момента можно за счет формирования тахограмм электропривода, предусматривающих торможение двигателя после захвата с заданным отрицательным ускорением (замедлением). Этот вывод принят за основу при разработке способа управления электроприводом, который рассматривается в публикациях [12, 21]. Сочетание преимуществ этих разработок и рассмотренного способа компенсации просадки скорости позволит получить максимальное снижение динамических нагрузок при захвате металла валками.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gasiyarov V.R., Radionov A.A., Karandaev A.S., Khramshin V.R. Method of Limiting the Dynamic Loads on Hot Plate Mill's Mechatronics System. IEEE 10th International Conference on Mechanical and Intelligent Manufacturing Technologies (ICMIMT). 2019. P. 43-47. DOI: 10.1109/ICMIMT.2019.8712076.
2. Обоснование способов ограничения динамических нагрузок электромеханических систем клетки прокатного стана / А.Г. Шубин, Б.М. Логинов, В.Р. Гасияров,

Е.А. Маклакова // Электротехнические системы и комплексы. 2018. №1(38). С. 14-25. DOI: 10.18503/2311-8318-2018-1(38)-14-25.

3. Karandaev A.S., Loginov B.M., Gasiyarov V.R., Khramshin V.R. Force limiting at roll axial shifting of plate mill // Procedia Engineering. 2017. Vol. 206. P. 1780-1786. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.10.713 (англ).
4. Karandaev A.S., Loginov B.M., Radionov A.A., Gasiyarov V.R. Setting Automated Roll Axial Shifting Control System of Plate Mill. Procedia Engineering, 2017. Vol. 206. P. 1753-1750. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.10.709.
5. Gasyarov V.R., Radionov A.A., Loginov B.M., Voronin S.S., Khramshin V.R. Improvement of Work Roll Bending Control System Installed at Plate Mill Stand. Proceedings of the 9th International Conference on Computer and Automation Engineering (ICCAE 2017). Sydney, Australia. 2017. P. 269-273. DOI: 10.1145/3057039.3057105.
6. Чертков Г.В. Оборудование прокатных и прессовых цехов. Электронный атлас конструкций и деталей изучаемого оборудования. Учебное пособие / Г.В. Чертков. Самара: Изд-во Самар, гос. аэрокосм, ун-та, 2012. 100 с.
7. Khramshin V.R., Karandaev A.S., Evdokimov S.A., Andryushin I.Yu., Shubin A.G., Gostev A.N. Reduction of the Dynamic Loads in the Universal Stands of a Rolling Mill. Metallurgist. Vol. 59. No 3-4, July 2015. P. 315-323. DOI:10.1007/s11015-015-0103-8.
8. Khramshin V.R., Gasiyarov V.R., Karandaev A.S., Shubin A.G. Method of Reduction of an Edging and Horizontal Rolls Electromechanical Interrelation in Universal Stand of a Rolling Mill. Procedia Engineering, 2017, Vol. 206. P. 1761-1767. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.10.710.
9. Gasiyarov V.R., Radionov A.A., Karandaev A.S., Khramshin V.R. Method of Load Calculation of Electrical Drives of Rolling mills During Heavy Plate Manufacturing. 9th International Conference on Mechatronics and Manufacturing (ICMM 2018). IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 361 (2018) 012014. DOI:10.1088/1757-899X/361/1/012014.
10. 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 (ME-ACS). 2015. 6 p. DOI: 10.1109/MEACS.2015.7414858.
11. Karandaev A.S., Gasiyarov V.R., Maklakova E.A., Loginov B.M., Khramshina E.A. Method limiting dynamic

- loads of electromechanical systems of plate mill stand, 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), Moscow and St. Petersburg, Russia, 2018, pp. 651-656. DOI: 10.1109/EIConRus.2018.8317180.
12. Radionov A.A., Gasiyarov V.R., Karandaev A.S., Khrashin V.R., Maklakov A.S. Use of Automated Electric Drives for Limiting Dynamic Loads in Shaft Lines of Roll Mill Stands. The Journal of Engineering. The 9th International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2018). 2018. 4 p. DOI: 10.1049/joe.2018.8135.
 13. Диденко Е.Е. Способы снижения динамических нагрузок трансмиссий рабочих валков при входе полосы в клетки чистовой группы стана горячей прокатки // Автоматизированные технологии и производства. 2017. №1. С. 25-27.
 14. Экспериментальные исследования и промышленное опробование способов снижения динамических нагрузок в редукторных линиях приводов черновых клетей НТЛС 1680 / П.В. Крот, А.Ю. Путники, О.М. Клевцов, А.А. Ермоленко // Труды V Конгресса прокатчиков, Череповец, 21-23 октября 2003 г. М.: ОАО «Черметинформация», 2004. С. 523-529.
 15. Бычков В.П. Электропривод и автоматизация металлургического производства: учебное пособие для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. школа, 1977. 392 с.
 16. Radionov A.A., Gasiyarov V.R., Baskov S.N., Karandaev A.S., Khrashin V.R. Mathematical Modeling of Mechatronics System Hydraulic Screwdown Mechanism – Electric Drive of Rolling Mill Stand 9th International Conference on Mechatronics and Manufacturing (ICMM 2018). IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 361 (2018) 012020. DOI:10.1088/1757-899X/361/1/012020.
 17. Разработка математической модели взаимосвязанных электротехнических систем клетки толстолистового прокатного стана / С.Н. Басков, В.Р. Гасияров, Б.М. Логинов, В.Р. Храмшин, К.Э. Одинцов // Известия вузов. Электромеханика. 2017. Т. 60. № 6. С. 55-64.
 18. Karandaev A.S., Khrashin V.R., Andryushin I.Yu., Petryakov S.A., Khrashin R.R. Method for correction of gauge interference of the head-strip section in a system for automated controlling of the thickness of a broad-strip hot-rolling mill (2013) Russian Electrical Engineering, 84 (8), pp. 441-445.
 19. Краус Б.А. Регулирование скорости электропривода чистовой клетки стана горячей прокатки при заходе металла в валки // Известия вузов. Электромеханика. 1980. №10. С. 1079-1081.
 20. Казанцев, В.П. Системы управления исполнительными механизмами. Пермь: РИО ПГТУ, 2010. https://studopedia.ru/13_38492_ispolnitelnimi-mehanizmami.html
 21. Constraining the Dynamic Torque of a Rolling Mill Stand Drive / V.R. Khrashin, V.R. Gasiyarov, A.S. Karandaev, S.N. Baskov, B.M. Loginov // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2018. Т. 18, №1. С. 101-111. DOI: 10.14529/power180109

Поступила в редакцию 23 июля 2019 г.

INFORMATION IN ENGLISH

COMPENSATION OF DYNAMIC LOADS OF THE ROLLING STAND ELECTRIC DRIVE BY MEANS OF ANTICIPATORY SPEED INCREASE

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. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9635-4716>.

The aim of the research work is to limit dynamic loads of electro-mechanical systems of rolling mill stand rolls operating with impact application of load. The investigations were carried out using data from the electric drive of a reverse stand of the plate mill 5000 of the PJSC "Magnitogorsk Iron and Steel Works" (PJSC "MMK"). It is noted the problem is really urgent due to the increase of the product range and introduction of new rolled products from difficult-to-form steel grades. The research group found that the cause of the over-tolerance dynamic loads during metal pick up by the rolls was the angular gaps in the power transmission. The paper considers the mechanism of impact origination in spindle junctions at the moment of closing of the angular gap. It was shown that at present the main way to limit them is to pick up metal in the mode of electric drive acceleration. The research group carried out the analysis of oscillograph records of motor torques and drive shaft torques of the reversing stand of the mill 5000 during metal pickup by the rolls. It was concluded that in spite of the significant limitation of loads, this method can't provide the necessary reduction in the dynamic torque. It was stated that the main reason of this was overregulation of the torque caused by the setting of the double-loop automatic control system of the electric drive speed. In order to limit this component, a new method was proposed, which surpasses acceleration by the value of the dynamic deviation of the speed control at the impact application of load. Empirical equations were proposed to calculate deviations in the single- and double-integrating automatic control systems of speed. The paper shows oscillograph records of the electric drive coordinates during metal pickup when the developed algorithm was implemented at the rolling mill 5000. The value of the impact load decreased by 1.45

times confirming the technical efficiency of the developed method. To further reduce the dynamic loads, it was recommended to form speed diagrams of the electric drive providing motor breaking with the preset rate after the metal pickup.

Keywords: plate rolling mill, reversing stand, the main line, spindle joint, angular play, load, impact application, torque, overregulation, limitation, electric drive, speed, method, system, development, experimental investigations, recommendations.

REFERENCES

1. Gasiyarov V.R., Radionov A.A., Karandaev A.S., Khrashin V.R. Method of Limiting the Dynamic Loads on Hot Plate Mill's Mechatronics System. IEEE 10th International Conference on Mechanical and Intelligent Manufacturing Technologies (ICMIMT). 2019. P. 43-47. DOI: 10.1109/ICMIMT.2019.8712076.
2. Shubin A.G., Loginov B.M., Gasiyarov V.R., Maklakova E.A. Justification of methods of dynamic load limitation at electro-mechanical systems of the rolling mill stand // *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical systems and complexes]. 2018. No. 1(38). P. 14-25. DOI: 10.18503/2311-8318-2018-1(38)-14-25. (In Russian)
3. Karandaev A.S., Loginov B.M., Gasiyarov V.R., Khrashin V.R. Force limiting at roll axial shifting of plate mill // *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 206. P. 1780-1786. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.10.713.
4. Karandaev A.S., Loginov B.M., Radionov A.A., Gasiyarov V.R. Setting Automated Roll Axial Shifting Control System of Plate Mill. *Procedia Engineering*, 2017. Vol. 206. P. 1753-1750. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.10.709

5. Gasiyarov V.R., Radionov A.A., Loginov B.M., Voronin S.S., Khramshin V.R. Improvement of Work Roll Bending Control System Installed at Plate Mill Stand. Proceedings of the 9th International Conference on Computer and Automation Engineering (ICCAE 2017). Sydney, Australia. 2017. P. 269-273. DOI: 10.1145/3057039.3057105.
6. Chertkov G.V. *Oborudovanie prokatnukh i pressovykh tsekhov. Elektronnyi atlas konstruktiv i detaley izuchaemogo oborudovaniya* [Equipment of rolling and molding shops. Electronic atlas of design and parts of the examined equipment]. Study guide / G.V. Chertkov. Samara: Publishing center of Samar State Airspace University, 2012. 100 p. (In Russian)
7. Khramshin V.R., Karandaev A.S., Evdokimov S.A., Andryushin I.Yu., Shubin A.G., Gostev A.N. Reduction of the Dynamic Loads in the Universal Stands of a Rolling Mill. *Metallurgist*. Vol. 59. No 3-4, July 2015. P. 315-323. DOI: 10.1007/s11015-015-0103-8.
8. Khramshin V.R., Gasiyarov V.R., Karandaev A.S., Shubin A.G. Method of Reduction of an Edging and Horizontal Rolls Electromechanical Systems Interrelation in Universal Stand of a Rolling Mill. *Procedia Engineering*, 2017, Vol. 206. P. 1761-1767. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.10.710
9. Gasiyarov V.R., Radionov A.A., Karandaev A.S., Khramshin V.R. Method of Load Calculation of Electrical Drives of Rolling mills During Heavy Plate Manufacturing. 9th International Conference on Mechatronics and Manufacturing (ICMM 2018). IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 361 (2018) 012014. DOI: 10.1088/1757-899X/361/1/012014.
10. 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.
11. Karandaev A.S., Gasiyarov V.R., Maklakova E.A., Loginov B.M., Khramshina E.A. Method limiting dynamic loads of electromechanical systems of plate mill stand, 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), Moscow and St. Petersburg, Russia, 2018, pp. 651-656. DOI: 10.1109/EIConRus.2018.8317180.
12. Radionov A.A., Gasiyarov V.R., Karandaev A.S., Khramshin V.R., Maklakov A.S. Use of Automated Electric Drives for Limiting Dynamic Loads in Shaft Lines of Roll Mill Stands. The Journal of Engineering. The 9th International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2018). 2018. 4 p. DOI: 10.1049/joe.2018.8135.
13. Didenko E.E. Ways to decrease dynamic loads of work roll transmissions during feeding the strip into stands of the finishing train of a hot rolling mill / E.E. Didenko // *Avtomatizirovannye tekhnologii i proizvodstva* [Automated technologies and production facilities]. 2017. No. 1. P. 25-27. (In Russian)
14. Krot P.V., Putnoki A.Yu., Klevtsov O.M., Ermovenko A.A. Experimental investigations and pilot research of the ways to decrease dynamic loads in gear lines of drives of 1680 NTLS roughing stands // *Trudy V Kongressa prokatchikov, Cherepovets, 21-23 oktyabrya 2003 g.* [In the collection of scientific papers: «Proceedings of V Congress of Rollermen, Cherepovets, October 21-23, 2003»]. Moscow: OJSC «Ferrous metal information», 2004. P. 523-529. (In Russian)
15. Bychkov V.P. *Elektroprivod i avtomatizatsiya metallurgicheskogo proizvodstva* [Electric drive and automation of metallurgical production]: Study guide for universities. 2 revised and enlarged edition Moscow: High school, 1977. 392 p. (In Russian)
16. Radionov A.A., Gasiyarov V.R., Baskov S.N., Karandaev A.S., Khramshin V.R. Mathematical Modeling of Mechatronics System «Hydraulic Screwdown Mechanism – Electric Drive of Rolling Mill Stand» 9th International Conference on Mechatronics and Manufacturing (ICMM 2018). IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 361 (2018) 012020. DOI:10.1088/1757-899X/361/1/012020.
17. Baskov S.N., Gasiyarov V.R., Loginov B.M., Khramshin V.R., Odintsov K.E. Development of a mathematical model of the interrelated electro-technical systems of a stand of a plate rolling mill // *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika* [Proceedings of Universities. Electrical Engineering]. 2017. Vol. 60. No. 6. P. 55-64. (In Russian)
18. Karandaev A.S., Khramshin V.R., Andryushin I.Yu., Petryakov S.A., Khramshin R.R. Method for correction of gauge interference of the head-strip section in a system for automated controlling of the thickness of a broad-strip hot-rolling mill (2013) *Russian Electrical Engineering*, 84 (8), pp. 441-445.
19. Kraus B.A. Control of electric drive speed of a finishing train stand of a hot rolling mill during metal pickup by the rolls // *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika* [Proceedings of Universities. Electrical Engineering]. 1980. no. 10. pp. 1079-1081.
20. Kazantsev V.P. *Sistemy upravleniya ispolnitelnymi mekhanizmami* [Control systems of actuating units] / V.P. Kazantsev – Perm, RIO PGU – 2010. https://studopedia.ru/13_38492_ispolnitelnimi-mekhanizmami.html (In Russian)
21. Constraining the Dynamic Torque of a Rolling Mill Stand Drive / V.R. Khramshin, V.R. Gasiyarov, A.S. Karandaev, S.N. Baskov, B.M. Loginov // *Vestnik YuUrGU. Seriya "Energetika"* [Bulletin of SUSU. Series "Power engineering"]. 2018. Vol. 18, no. 1. pp. 101–111. DOI: 10.14529/power180109

Гасияров В.Р. Способ компенсации динамических нагрузок электропривода прокатной клетки за счет опережающего увеличения скорости // *Электротехнические системы и комплексы*. 2019. № 3(44). С. 39-46. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-3\(44\)-39-46](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-3(44)-39-46)

Gasiyarov V.R. Compensation of Dynamic Loads of the Rolling Stand Electric Drive by Means of Anticipatory Speed Increase. *Elektrotekhnicheskie sistemy i kompleksy* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2019, no. 3(44), pp. 39-46. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-3\(44\)-39-46](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-3(44)-39-46)

Володин Е.В., Осипов О.И.

Национальный исследовательский университет «МЭИ»

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЫШАЮЩЕГО *DC-DC* ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Предложен вариант силовой части повышающего *DC-DC*-преобразователя для питания автономных инверторов напряжения АИН общепромышленных преобразователей частоты ПЧ. Особенностью преобразователя является работа трех модулей АИН на отдельные высокочастотные трансформаторы, первичные обмотки которых подключены соответственно к каждому модулю АИН, а вторичные соединены последовательно, что позволяет повысить преобразуемую мощность, не превышая номинальные параметры промышленных модулей. Для ограничения перенапряжений на диодах выходного выпрямителя и ускорения процесса их коммутации (закрытия) в преобразователе использована дополнительная цепь с ответвлением от сглаживающего дросселя фильтра звена постоянного тока. Рассмотрен принцип работы повышающего *DC-DC*-преобразователя, иллюстрированный диаграммами сигналов управления его силовыми ключами. Представлены результаты моделирования коммутационных процессов и экспериментальных исследований их на реальном повышающем *DC-DC*-преобразователе, которые подтвердили работоспособность и эффективность предлагаемого варианта его силовой схемы при обеспечении всех требуемых режимов работы.

Ключевые слова: *DC-DC*-преобразователь, высокочастотный трансформатор, выпрямитель, перенапряжение, система управления, экспериментальные исследования, математическое моделирование.

ВВЕДЕНИЕ

При питании общепромышленных преобразователей частоты ПЧ от трехфазной сети частотой 50 Гц с линейным напряжением 380 В на выходе мостового выпрямителя (на входе автономного инвертора напряжения АИН для питания электродвигателей переменного тока) напряжение постоянного тока достигает уровня 540 В. Поэтому при питании АИН от автономных или резервных источников постоянного тока с напряжениями, отличающимися от подобного значения, необходимо иметь возможность повышать (либо снижать) и стабилизировать напряжение на желаемом уровне. Вариантом такого решения может быть применение повышающих (понижающих) *DC-DC*-преобразователей с высокочастотным трансформатором. При их технической реализации остро встают проблемы, связанные с необходимостью согласования выходных мощностей преобразователей при допустимых номинальных параметрах типовых *IGBT*-модулей, ограничений перенапряжений на их элементах при ускорении процесса коммутации. Для их решения на примере повышающего *DC-DC*-преобразователя анализируется принцип его работы и представлены результаты математического моделирования и экспериментальных исследований предлагаемого варианта преобразователя.

СИЛОВАЯ ЧАСТЬ *DC-DC*-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Одним из вариантов *DC-DC*-преобразователей является наличие в них гальванической развязки с повышающим высокочастотным трансформатором (рис. 1) [1]. Здесь: $U_{вх}$ – напряжение входной сети; $R_{заряд}$ – зарядный резистор для предварительного заряда входных конденсаторов $C_{вх1}, \dots, C_{вх3}$; P_1 – реле, шунтирующее $R_{заряд}$ при заряженных конденсаторах $C_{вх1}, \dots, C_{вх3}$; K_1, K_2, K_3, K_4 – ключи инверторов напряжения; $TP_1..TP_3$ – повышающие высокочастотные

трансформаторы; $D_1..D_4$ – диоды выпрямителя; L – сглаживающий дроссель; C_{dc} – конденсатор звена постоянного тока.

Принцип работы предлагаемой схемы в том, что при подаче входного питания $U_{вх}$ происходит плавный заряд входных емкостей $C_{вх1}, \dots, C_{вх3}$ через резистор $R_{заряд}$ и при достижении напряжения порядка 175 В через 1 с происходит шунтирование резистора блоком контактом реле P_1 для исключения ударных зарядных токов входной емкости. При шунтировании $R_{заряд}$ одновременно выдается разрешение на широтно-импульсную модуляцию ШИМ ключей инвертора напряжения. В предлагаемом варианте преобразователя реализована ШИМ с частотой 12 кГц. В контроллере управления преобразователем определяется необходимая скважность для ключа K_1 , равная $\gamma_{K1} = 0..0,5$. При этом K_3 работает в комплементарном режиме с ключом при скважности $\gamma_{K3} = 0,5..1$. Для второй стойки скважность рассчитывается как $\gamma_{K4} = 1 - \gamma_{K1} = 0,5..1$. На рис. 2 представлены осциллограммы управляющих сигналов ключами $K_1..K_4$ для скважности 0,25. При этом для обеспечения синхронизации управляющие сигналы для K_2 и K_4 меняются местами, и, соответственно, $\gamma_{K2} = 1 - \gamma_{K4} = 0..0,5$.

На рис. 2 *PWM* – опорный сигнал, *TP* – форма напряжения на первичной обмотке трансформатора (см. рис. 1). При данной схеме управления коммутация осуществляется только верхними ключами K_1 и K_2 , а синхронизация осуществляется на аппаратном уровне контроллером. Сигналы управления параллельно выдаются на три инвертора напряжения.

После преобразования инвертором входного постоянного напряжения в переменное происходит его повышение с помощью повышающих высокочастотных трансформаторов TP_1, TP_2, TP_3 . Применение высокой частоты преобразования позволяет заметно снизить массогабаритные характеристики трансформатора. Повышенное напряжение вторичной обмотки выпрямляется и фильтруется на *LC*- фильтре звена постоянного тока.

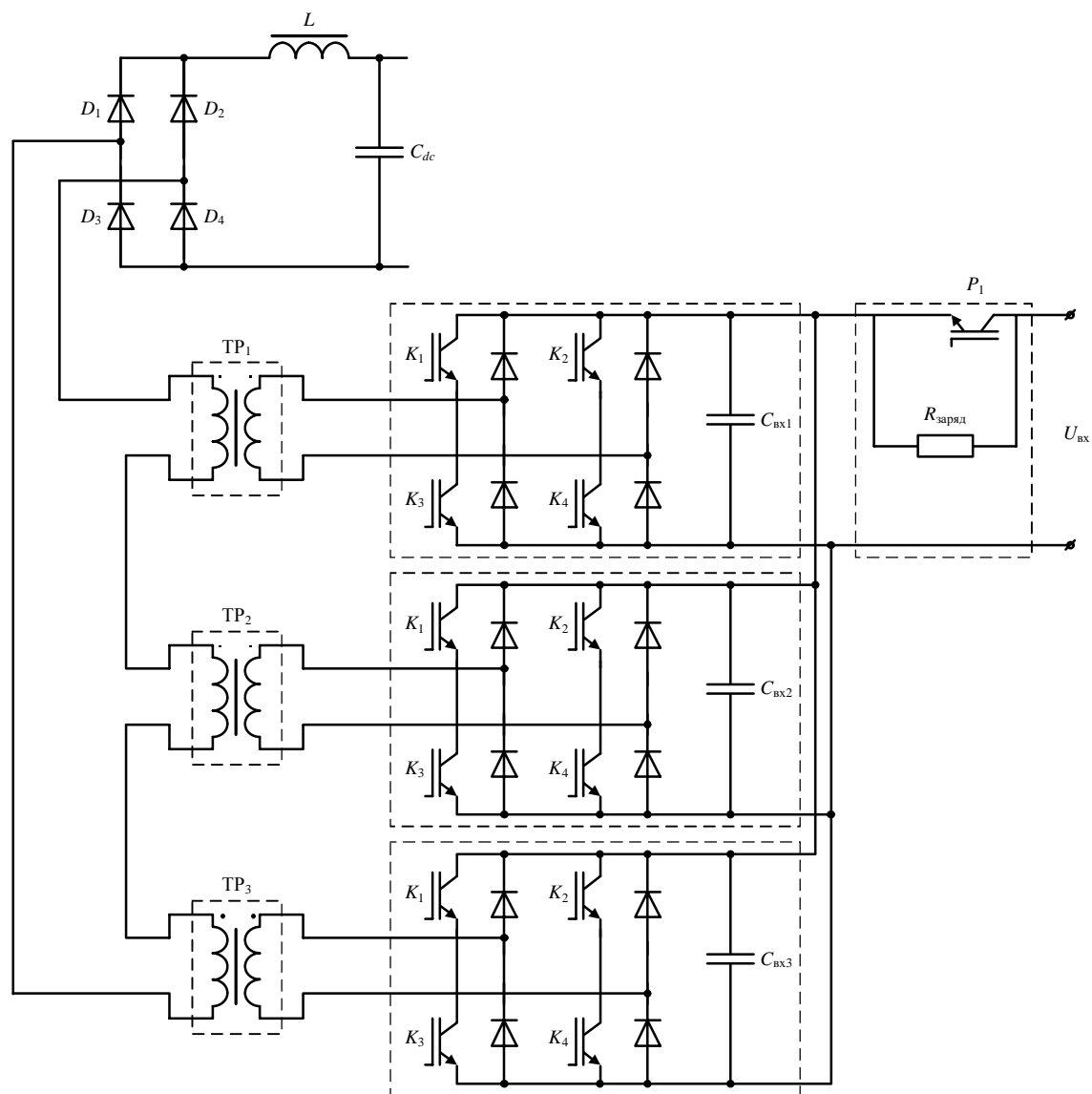


Рис. 1. Схема повышающего DC-DC-преобразователя

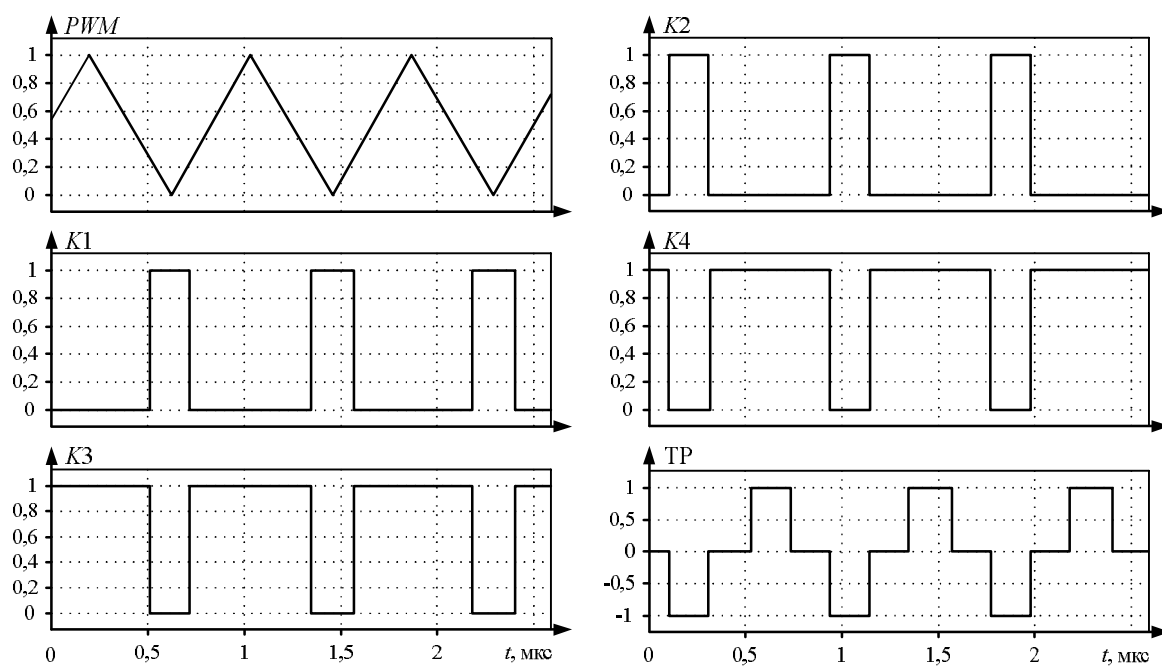


Рис. 2. Осциллограммы управляющих сигналов ШИМ

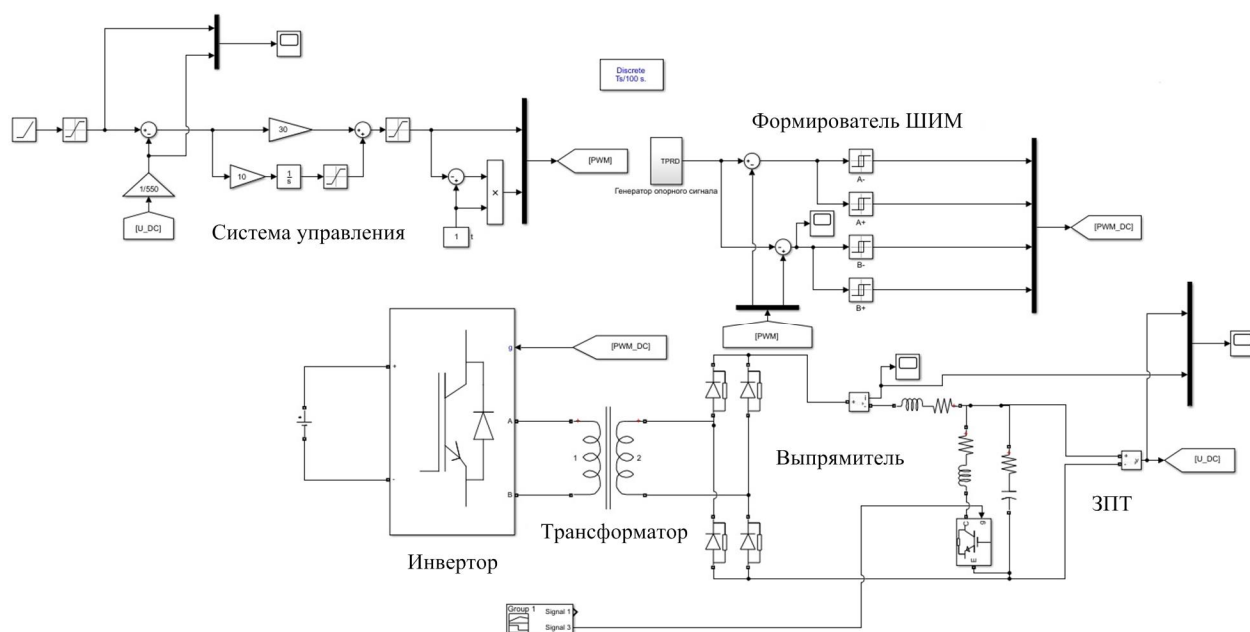


Рис. 3. Модель исследуемого DC-DC-преобразователя

Подобный принцип работы преобразователя стимулирует создание системы управления, не допускающей ударных токов при работе, принятие мер по ограничению перенапряжений на полупроводниковых элементах, и реализацию DC-DC-преобразователя на модулях российского производства с типовыми их техническими параметрами.

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ

Для DC-DC-преобразователя рекомендована замкнутая система управления с обратной связью по напряжению звена постоянного тока и токовая защита с применением датчика тока в этом звене. Исследуемая модель повышающего DC-DC преобразователя в среде Matlab представлена на рис. 3 [4].

При моделировании рассматривались режимы холостого хода и заряда звена постоянного тока. При заряде звена ток должен ограничиваться допустимым значением для сохранности силовых модулей и емкости звена постоянного тока. При холостом ходу преобразователя перезаряд звена постоянного тока не должен происходить при формировании малых скважностей и минимальной ошибки в заданном и действительном напряжениях.

На рис. 4 показаны переходные процессы задания напряжения от задатчика интенсивности $U_{\text{зад,dc}}$ и действительное напряжение U_{dc} в звене постоянного тока на конденсаторе C_{dc} , а также зарядный ток I_{dc} в дросселе L , ограниченный на уровне 40 А. Как видно из рис. 4, управление DC-DC-преобразователем обеспечивает формирование заданного напряжения в звене постоянного тока на конденсаторе C_{dc} при ограничении тока не выше допустимого предела.

Результаты моделирования работы DC-DC-преобразователя при номинальных режимах, а также при набросе и сбросе нагрузки представлены на рис. 5.

Моделирование подтвердило работоспособность системы управления преобразователем при номинальных нагрузках. При этом в режиме наброса нагрузки наблюдались затухающие колебания напряжений и

токов в звене выпрямителя, а при ее сбросе они полностью отсутствовали. Математическое моделирование подкреплялось исследованиями на реальном DC-DC-преобразователе мощностью 22 кВт. На рис. 6 представлен процесс заряда звена постоянного тока преобразователя.

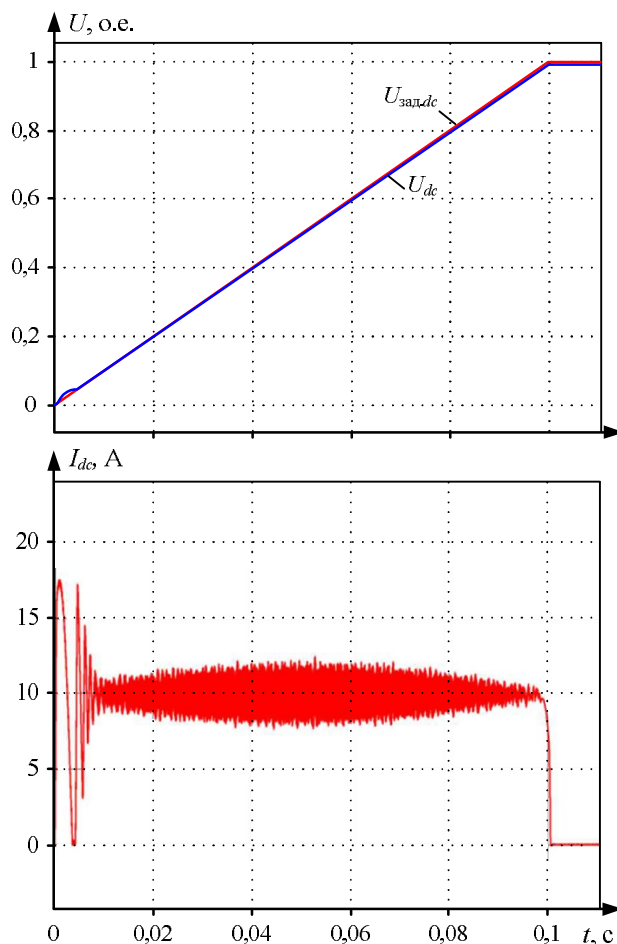


Рис. 4. Переходные процессы при заряде звена постоянного тока DC-DC-преобразователем

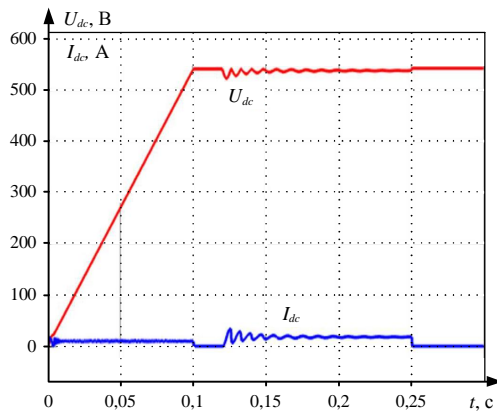


Рис. 5. Переходные процессы при сбросе и набросе нагрузки

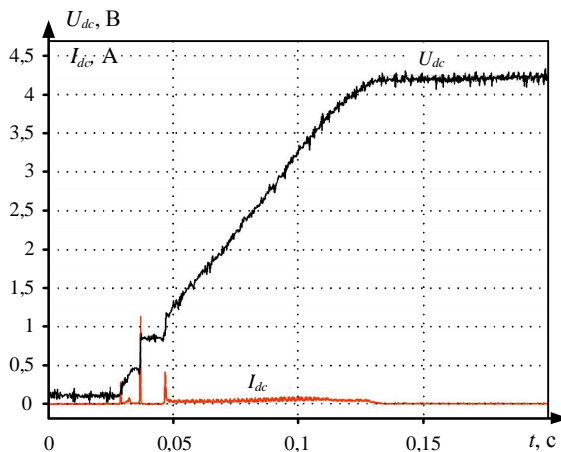


Рис. 6. Осциллограммы напряжения U_{dc} и тока I_{dc} при заряде звена постоянного тока (масштаб для напряжения 1 В АЦП – 127 В, для тока 1 В АЦП – 10 А)

Результаты экспериментов подтвердили работоспособность предлагаемой схемы $DC-DC$ -преобразователя во всех его рабочих режимах.

СНИЖЕНИЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ НА ЭЛЕМЕНТАХ $DC-DC$ -ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Паразитные индуктивности в цепях $DC-DC$ -преобразователя и дроссель в фильтре звена постоянного тока способствуют возникновению перенапряжений на его диодах, величина которых может привести к выходу их из строя [2, 3]. Причина в том, что при закрытии диодов выпрямителя происходит снижение тока в дросселе, сопровождающееся ростом напряжения на выпрямителе, способным его вывести из строя.

В подтверждение тому на рис. 7 показаны экспериментальные осциллограммы напряжений на диодах $D1, \dots, D4$ в исходном варианте $DC-DC$ -преобразователя (см. рис. 1).

Перенапряжения на диодах $D1, \dots, D4$ при их закрытии превышали 1000 В, что требует их ограничения. С этой целью предложен вариант $DC-DC$ -преобразователя (рис. 8) с запирающей отпайкой L_{sn} дросселя L , диодами $D5$ и $D6$ в цепи LC -фильтра выпрямителя.

Экспериментальные осциллограммы напряжений на диодах $D1, \dots, D4$ и токов в их цепи (рис. 9) для предложенного варианта выпрямителя $DC-DC$ -преобразователя подтвердили при закрытии диодов уменьшение перенапряжений выпрямителя на 400-500 В.

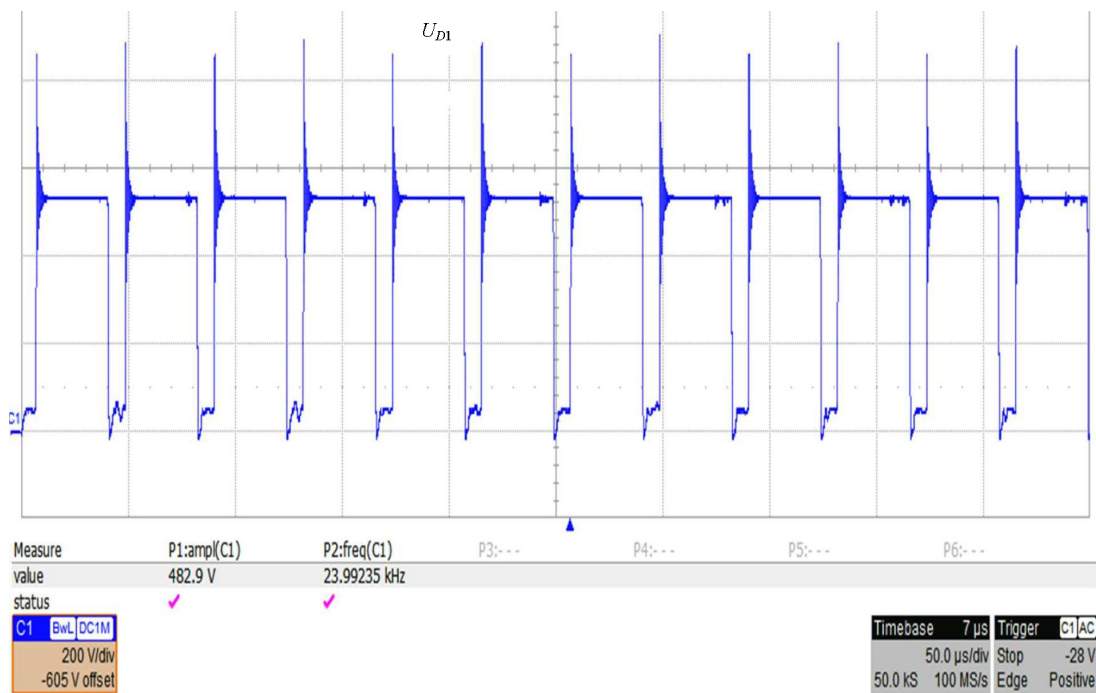


Рис. 7. Экспериментальная осциллограмма U_{D1} в исходном варианте преобразователя (масштаб 200 В/дел.)

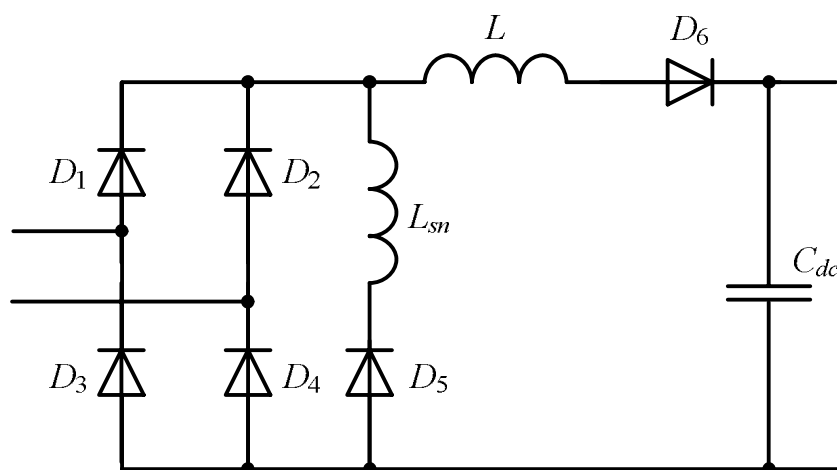
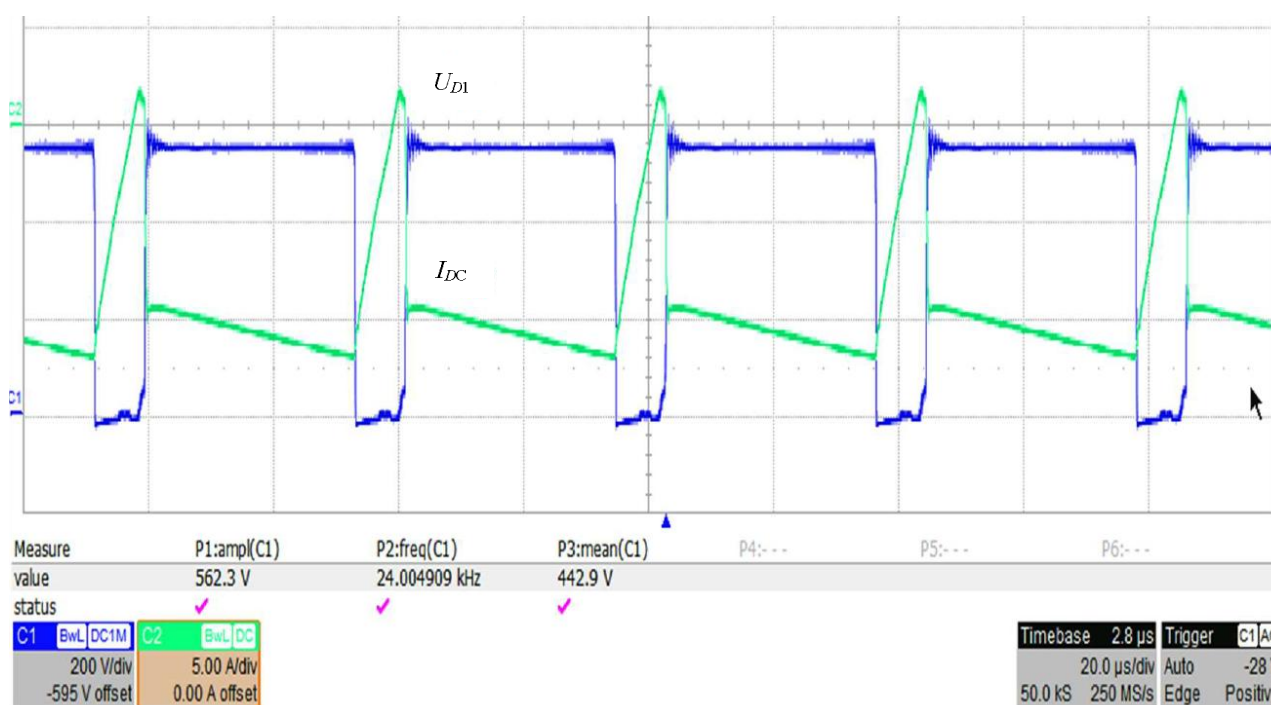


Рис. 8. Схема выпрямителя с запирающей отпайкой


 Рис. 9. Экспериментальные осциллограммы напряжения U_{DI} (масштаб 200 В/дел.) и тока I_{DC} (масштаб 5 А/дел.) с запирающей цепочкой

Выводы

Особенностью предложенного повышающего DC-DC-преобразователя является применение трех его модулей автономных инверторов напряжения с отдельными высокочастотными трансформаторами, первичные обмотки которых подключены соответственно на выход каждого модуля, а вторичные соединены последовательно, что позволяет повысить общую преобразуемую мощность, не повышая требований к изменению номинальных параметров типовых модулей отечественного производства.

Моделирование коммутационных процессов и экспериментальные исследования их на реальном DC-DC-преобразователе подтвердили работоспособность предлагаемого варианта его силовой схемы при обеспечении всех требуемых режимов работы.

Техническое решение выпрямителя DC-DC-преобразователя по схеме рис. 8 позволило снизить перенапряжения на силовых его элементах до допустимых значений, что подтверждено на реальном объекте.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мелешин В.И. Транзисторная преобразовательная техника. М.: Техносфера, 2005. 632 с.
2. Паспорт «Модуль на основе БВД 5М6БВД» «Электрум АВ».
3. Севернс Р., Блум Г. Импульсные преобразователи постоянного напряжения для систем вторичного электропитания: пер. с англ. / под ред. Л.Е. Смольникова. М.: Энергоатомиздат, 1988. 294 с.: ил.
4. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MatLab, SimPowerSystems и Simulink. М.: ДМК Пресс; СПб: Питер, 2008. 288 с.

Поступила в редакцию 22 июля 2019 г.

INFORMATION IN ENGLISH

EXPERIMENTAL RESEARCH OF STEP-UP DC-DC CONVERTER

Evgeni V. Volodin

Graduate student, the Department of automated electric drive, Power Engineering Institute (MPEI) (National Research Institute), Moscow, Russia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9081-8660>

Oleg I. Osipov

D.Sc. (Engineering), Professor, the Department of automated electric drive, Moscow Power Engineering Institute (MPEI) (National Research Institute), Moscow, Russia.

A variant of the power part of a step-up *DC-DC* converter for supplying autonomous voltage inverters for industrial inverter frequency converters is proposed. The converter feature is the operation of three autonomous voltage inverters modules for separate high-frequency transformers, the primary windings of which are connected respectively to each autonomous voltage inverters module, and the secondary windings are connected in series, which makes it possible to increase the converted power without exceeding the rated parameters of industrial modules. To limit overvoltages on the diodes of the output rectifier and to accelerate the process of their switching (closing), an additional circuit is used in the converter with a branch from the smoothing choke of the DC link filter. The principle of operation of a step-up *DC-DC* converter illustrated by diagrams of control signals of its power switches is considered. The results of the simulation of switching processes and experimental studies of them on a real step-up *DC-DC* converter, which are presented in the paper, confirmed the efficiency and effectiveness of the proposed version of its power circuit while ensuring all the required operating modes.

Keywords: *DC-DC* converter, high-frequency transformer, rectifier, overvoltage, control system, experimental studies, mathematical modeling.

REFERENCES

1. Meleshin V.I. *Tranzistornaya preobrazovatel'naya tekhnika* [Transistor converter technology]. Moscow: Technosphere, 2005. 632 p. (In Russian)
2. Passport "Module based on BVD 5M6BVD" "Electrum AV".
3. Severns R., Bloom G. *Impulsnye preobrazovateli postoyan-nogo napryazheniya dlya system vtorichnogo elektropitaniya* [Pulse DC-voltage converters for secondary power systems]. Translated from English by L.E. Smolnikov. Moscow: Energoatomizdat, 1988. 294 p., Illustrated. (In Russian)
4. Chernykh I.V. *Modelirovanie elektrotekhnicheskikh ustroystv v MatLab, SimPowerSystems i Simulink* [Simulation of electrical devices in MatLab, SimPowerSystems and Simulink]. Moscow: DMK Press, St. Petersburg: Peter, 2008. 288 p. (In Russian)

Володин Е.В., Осипов О.И. Экспериментальное исследование повышающего DC-DC преобразователя // Электротехнические системы и комплексы. 2019. № 3(44). С. 47-52. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-3\(44\)-47-52](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-3(44)-47-52)

Volodin E.V., Osipov O.I. Experimental Research of Step-up DC-DC Converter. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2019, no. 3(44), pp. 47-52. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-3\(44\)-47-52](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-3(44)-47-52)

Лукьянов С.И.¹, Швидченко Д.В.^{1,2}, Пишнограев Р.С.^{1,2}, Швидченко Н.В.^{1,2}, Красильников С.С.^{1,3}

¹ Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

² ООО «ТЕХНОАП Инжиниринг»

³ ООО «ММК-Информсервис»

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ТЯНУЩИХ РОЛИКОВ МАШИНЫ НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ ЗАГОТОВОК ПРИ ДЕФОРМАЦИИ БОЧЕК РОЛИКОВ

Приведены результаты экспериментальных и аналитических исследований электроприводов тянущих роликов и их влияния на качество макроструктуры непрерывнолитых заготовок промышленных машин непрерывного литья заготовок. Доказано, что деформация бочек тянущих роликов, а именно износ и прогиб их бочек и возникающие вследствие этого периодические и случайные буксовки приводов создают в кристаллизующейся заготовке дополнительные статические и динамические продольные усилия, появление которых неизбежно приводит к снижению качества заготовок. Приведены методики и аналитические зависимости оценки влияния электроприводов тянущих роликов с деформацией их бочек на качество макроструктуры непрерывнолитых заготовок. Определены новые технологические требования к электроприводу тянущих роликов и системе его управления с позиций улучшения качества макроструктуры заготовок за счет целесообразного управления параметрами электроприводов. Разработаны алгоритмы управления электроприводами, позволяющие реализовать новые технологические требования. Приведены результаты экспериментальных исследований разработанных технических решений.

Ключевые слова: электропривод машины непрерывного литья заготовок, усилия вытягивания, качество непрерывнолитой заготовки, тянущие ролики, стабилизация усилия вытягивания.

ВВЕДЕНИЕ

Основным способом получения заготовок для листового и сортового проката на ближайшие десятилетия остается способ разливки стали на машинах непрерывного литья заготовок. При непрерывной разливке существенно снижаются расход электрической энергии и топливно-энергетические затраты, снижается себестоимость продукции и значительно повышается выход годного металла из жидкой стали. С каждым годом в черной металлургии растет количество машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) и объем выпускаемой непрерывнолитой заготовки [1]. Технология непрерывной разливки стали, конструкция машин [1, 2], их электропривод и системы автоматизации [3–9] постоянно совершенствуются в направлении повышения качества отливаемых заготовок и производительности каждой машины. Однако из-за особенностей технологии непрерывной разливки стали в теле заготовки образуются специфические дефекты ее макроструктуры [1, 2]. Наличие этих дефектов является причиной ограничения скорости литья заготовки и производительности МНЛЗ [10].

Одной из причин снижения качества макроструктуры непрерывнолитой заготовки являются дополнительные продольные усилия, создаваемые в слитке электроприводами тянущих роликов в результате неизбежных для технологии непрерывной разливки стали износа и прогиба бочки роликов, а также буксовок электроприводов тянущих роликов [10].

В настоящее время недостаточно освещены вопросы влияния режимов работы электроприводов тянущих роликов (ЭТР) на процесс формирования дополнительных

продольных усилий в отливаемой заготовке при возникновении деформации бочки тянущих роликов (ТР). Отсутствует оценка статических и динамических продольных усилий, создаваемых в слитке ЭТР при износе и прогибе их бочки и буксовках приводов.

Цель исследования: улучшение качества макроструктуры непрерывнолитой заготовки за счет ограничения статических и динамических продольных усилий, создаваемых в слитке ЭТР при износе и прогибе бочки ТР и случайных и периодических буксовках приводов.

АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ТРЕБОВАНИЙ К ЭЛЕКТРОПРИВОДАМ ТЯНУЩИХ РОЛИКОВ МНЛЗ

Типовые технические решения конструкции роликовой проводки МНЛЗ, условий ее эксплуатации и ЭТР рассмотрены на примере МНЛЗ крупного металлургического предприятия Российской Федерации. Технологический канал зоны вторичного охлаждения МНЛЗ криволинейного типа разделен на три участка (**рис. 1**): радиальный участок, выполненный по дуге окружности с базовым радиусом R_b ; криволинейный участок, построенный по специальной кривой с постоянно увеличивающимся радиусом кривизны от R_b до бесконечности, обеспечивающий разгиб заготовки; горизонтальный участок.

Роликовая проводка ЗВО состоит из неприводных и большого числа (до 70) распределенных вдоль технологической линии ЗВО приводных удерживающих роликов (**рис. 1**). В роликовой проводке ЗВО каждого ручья установлено по 98 пар роликов в верхнем и нижнем рядах. При этом все ролики верхнего ряда выполнены неприводными, а в нижнем ряду располагаются как приводные (тянущие), так и неприводные ролики. Применяют ролики трех номинальных диаметров: 240, 270 и 330 мм.

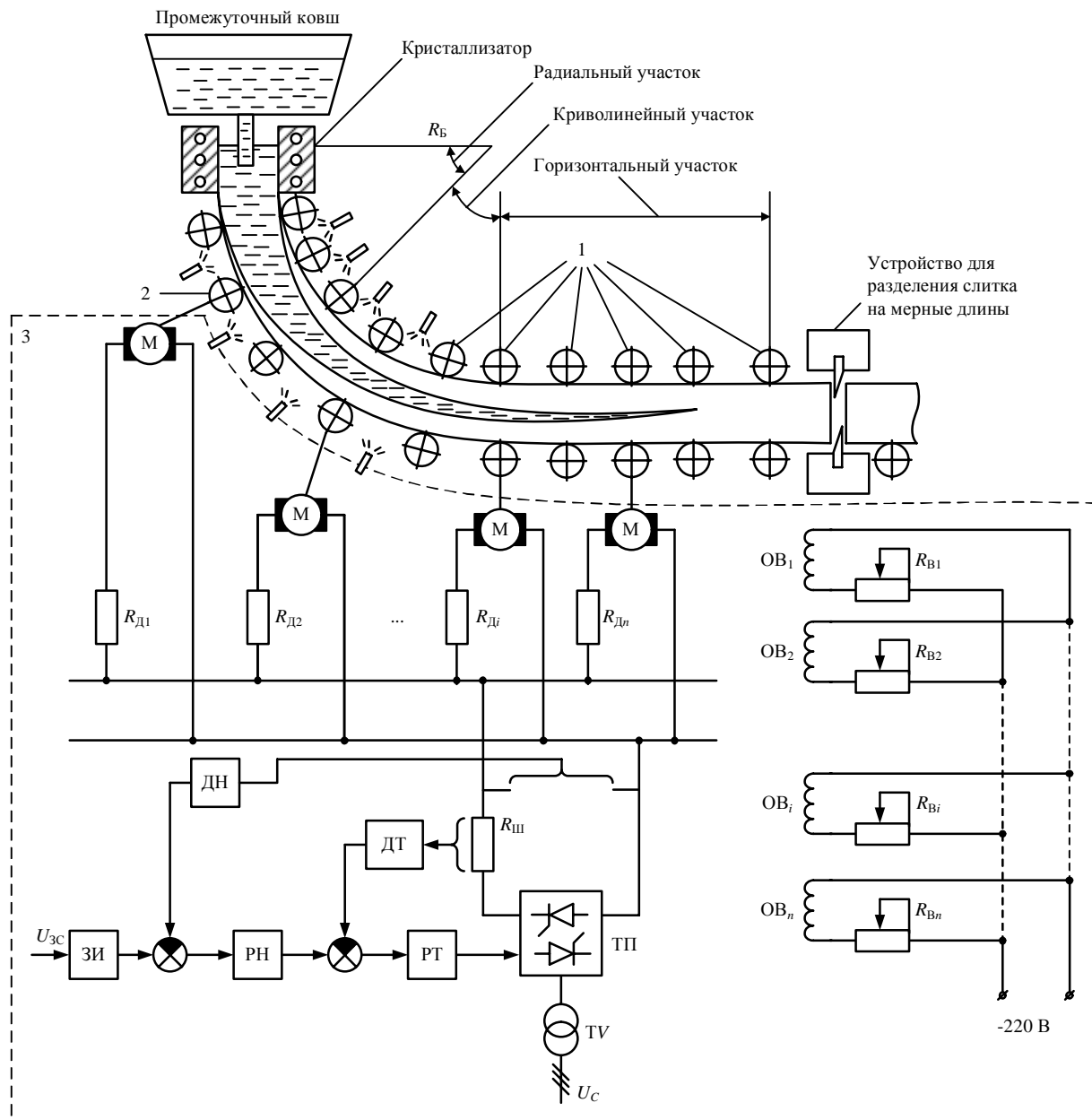


Рис. 1. Функциональная схема построения криволинейной МНЛЗ и электропривода ТР:
1 – группа неприводных роликов; 2 – группа приводных роликов; 3 – электропривод тянущих роликов

Характерной и неизбежной особенностью эксплуатации роликовой проводки ЗВО является наличие деформации тянущих роликов МНЛЗ, которая проявляется в износе и прогибе их бочки. Обусловлено это высокой температурой на контакте ролик-слиток (до 1300°C), действием значительных усилий ферростатического давления жидкой стали (до 500 кН) и технологическим требованием применения роликов малого диаметра для ограничения выпучивания корки кристаллизующегося слитка в пространство между роликами [1].

На **рис. 1** приняты обозначения: ЗИ – задатчик интенсивности; ДН – датчик напряжения; РН – регулятор напряжения; РТ – регулятор тока; ТП – тиристорный преобразователь; ДТ – датчик тока; ТВ – трансформатор; R_B – базовый радиус; $R_{Дi}$ – дополнительное сопротивление в опорной цепи, Ом; R_{Bi} – дополнительное сопротивление в возбуждении, Ом; $ОВ_i$ – обмотка возбуждения; n – количество приводных роликов; U_{3C} –

напряжение задания скорости, В; U_C – напряжение сети, В; $R_{ш}$ – сопротивление шунта, В.

Износ и остаточный прогиб бочек ТР, достигающие 10 и 5 мм соответственно, вызывают периодические и случайные буксовки ЭТР на криволинейном и горизонтальном участках ЗВО. При этом наблюдаются значительные колебания токов нагрузки ЭТР [11].

Деформация ТР отрицательно сказывается на качестве макроструктуры непрерывнолитых заготовок. При этом традиционно улучшение качества заготовок связывается с увеличением стойкости тянущих роликов. Однако при больших материальных затратах на разработку новых марок стали для роликов и способов их изготовления кардинально решить вопрос об исключении деформации тянущих роликов в процессе эксплуатации МНЛЗ не удастся [6].

Одним из основных требований к ЭТР является ограничение растягивающих продольных усилий в обложке кристаллизующегося слитка за счет рассредоточения

приводных элементов по всей технологической линии, автономного регулирования токов нагрузки групп ЭТР и индивидуального регулирования эквивалентных за два оборота ТР значений токов нагрузки электродвигателей горизонтального (до смыкания фронтов кристаллизации в слитке) участка ЗВО [1, 3, 5, 9].

В большинстве отечественных и зарубежных МНЛЗ применяется электропривод постоянного тока с силовым питанием всех электродвигателей от одного до четырех тиристорных преобразователей (ТП) (рис. 1). На новых МНЛЗ принимается схема индивидуального электропривода ТР. Системы управления ЭТР строятся без возможности индивидуального регулирования мгновенных значений токов нагрузки и частот вращения электродвигателей ТР.

Анализ причин образования дефектов непрерывнолитых слябов показал, что из всего многообразия факторов, определяющих качество литой заготовки, весьма недостаточно рассмотрены вопросы влияния ЭТР при условии деформации их бочки, формирующих в слитке дополнительные продольные усилия, которые являются одной из причин образования дефектов [1, 2].

С целью оценки степени влияния деформации ТР на показатели качества макроструктуры непрерывнолитых заготовок на действующих МНЛЗ проведен промышленный эксперимент. В ходе эксперимента:

- в межремонтный период времени штатно с готовых заготовок изготавливались пробы металла и исследовали в макротемплетной лаборатории предприятия;
- оценка степени развития дефектов выполнялась по бальной шкале от 0 до 4 баллов по следующим видам дефектов макроструктуры: гнездообразные, перпендикулярные и осевые трещины, осевая рыхлость;
- для каждой пробы металла фиксировался номер дня от даты запуска МНЛЗ после выполнения ремонтных работ.

Условия эксперимента: исследования проводились на идентичных по конфигурации роликовой проводки, технологии разливки стали и охлаждения металла в ЗВО и кристаллизаторе машинах; пробы металла на анализ качества отбирались только с идентичных по химическому составу заготовок, отлитых на стабильной скорости 1 м/с; такие механические неисправности, как поломки роликов и узлов в их линиях привода, а также выход из строя электродвигателей, оперативно устранялись. Объем выборки составил 80 проб металла. По каждому виду дефекта построены уравнения регрессии зависимости степени развития каждого вида дефекта как функции времени и значения коэффициента парной корреляции между числовыми показателями длительности работы МНЛЗ и показателями качества макроструктуры заготовки.

Экспериментальные исследования показали, что фактор состояния роликового аппарата ТР наряду с факторами металлургического, теплотехнического и механического характера оказывает существенное влияние на процесс формирования макроструктуры литой заготовки. Установлена тесная корреляционная связь между показателем длительности работы МНЛЗ в периоды между ремонтами и показателями качества по гнездообразным и перпендикулярным трещинам и осевой рыхлости (коэффициенты парной корреляции R составили соответственно 0,31; 0,16 и 0,19).

Таким образом, по мере деформации бочек ТР происходит снижение качества макроструктуры непрерывнолитой заготовки по трем видам дефектов. Причиной такого снижения качества макроструктуры является формирование ЭТР в теле заготовки дополнительных продольных усилий [10].

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ТЯНУЩИХ РОЛИКОВ ПРИ УСЛОВИИ ДЕФОРМАЦИИ ИХ БОЧКИ НА КАЧЕСТВО МАКРОСТРУКТУРЫ НЕПРЕРЫВНОЛИТОГО СЛИТКА

Исследование износа ΔD тянущих роликов ЗВО МНЛЗ показало, что наибольшему износу до 8 мм подвержены ТР криволинейного и первой секции горизонтального участков ЗВО.

Авторами предложена методика оценки влияния режимов работы ЭТР при износе их бочки на изменение усилия вытягивания ΔF заготовки на контактах с ТР и величину статических продольных усилий, создаваемых в отливаемой заготовке ЭТР:

1) по разработанным математическим зависимостям определяются изменения токов нагрузки и усилий вытягивания на контактах тянущих ролики – слиток с учетом текущего износа тянущих роликов:

$$\Delta I = \frac{i_r \beta}{(c\Phi)} \cdot \frac{2V_{PB} \Delta D}{D_r (D_r - \Delta D)}; \quad (1)$$

$$\Delta F = 2(c\Phi) i_r \frac{\Delta I}{D_r - \Delta D}, \quad (2)$$

где β – жесткость механической характеристики электропривода тянущего ролика, Н·м·с; i_r – передаточное число редуктора; V_{PB} – скорость вытягивания заготовки, м/с; D_r – диаметр тянущего ролика, м; ΔD – величина износа бочки тянущего ролика, м; c – конструктивная постоянная; Φ – магнитный поток, В·с; I – ток нагрузки, А;

2) по механическим характеристикам ЭТР при условии неизменности общего тока электропривода ТР и скорости вытягивания заготовки определяется перераспределение токов нагрузки электродвигателей ТР в соответствии с текущими значениями износа их бочки;

3) по известной математической модели [9,12] выполняется расчет статических продольных усилий, создаваемых в отливаемой заготовке ЭТР при износе их бочки.

Установлено, что ЭТР, работающие в условиях износа их бочки, вызывают в слитке изменение величины продольных усилий до 53 % (рис. 2).

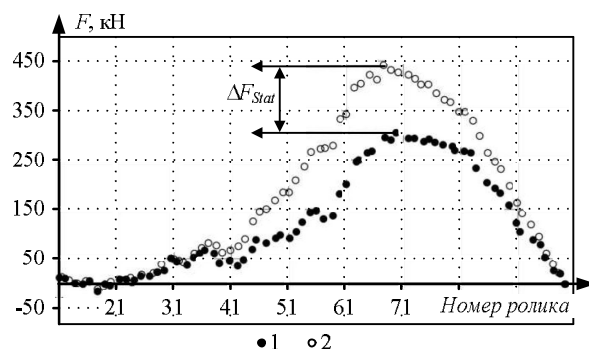


Рис. 2. Распределение статических продольных усилий в заготовке вдоль ЗВО: 1 – без износа тянущих роликов; 2 – с учетом износа тянущих роликов

На рис. 2 введены обозначения: F – статическое продольное усилие, создаваемое электроприводами ТР в отливаемой заготовке, Н; ΔF_{Stat} – изменение статического продольного усилия, создаваемого электроприводами ТР в отливаемой заготовке, Н.

В результате исследования по разработанной методике определено, что износ ΔD тянущих роликов существенно влияет на изменение усилия вытягивания слитка ΔF на контакте ТР-слиток, которое формируется ЭТР. Установлено, что максимальное изменение величины ΔF наблюдается на ЭТР диаметром 330 мм. Так, например, при износе тянущего ролика $\Delta D = 8$ мм на скорости вытягивания заготовки 1 м/мин изменение величины усилия вытягивания слитка ΔF на контакте ТР-слиток составляет более 30% (рис. 3).

Аналитические зависимости (1) и (2) позволили определить граничные значения износа ΔD_B , превышение которых вызывает изменение усилия вытягивания слитка и величины статических продольных усилий, создаваемых в отливаемой заготовке ЭТР при износе их бочки, более 5%. Получены зависимости ΔD_B для роликов различного диаметра в диапазоне скоростей от 0,5 до 1 м/мин.

Установлено, что если в процессе эксплуатации МНЛЗ по мере износа ТР поддерживать значения токов нагрузки ЭТР на неизменном уровне ($I = \text{const}$), то изменение усилия вытягивания ΔF на контакте этих ТР со слитком не превышает 2,2%.

Определено требование к ЭТР: ЭТР радиального, криволинейного и горизонтального участков ЗВО должны иметь возможность индивидуального регулирования токов нагрузки электродвигателей путем их стабилизации на заданном уровне при наличии износа ТР более граничных значений ΔD_B с целью стабилизации усилия вытягивания слитка на контакте ТР-слиток и ограничения статических продольных усилий в отливаемой заготовке.

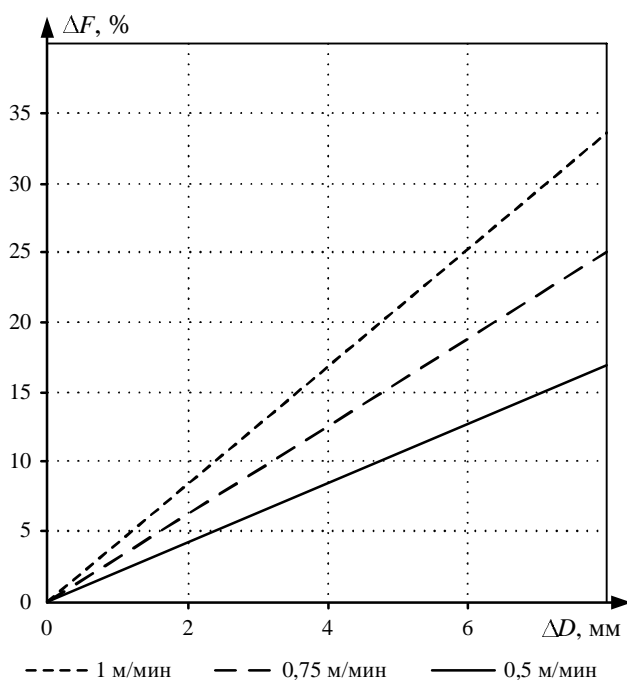


Рис. 3. Изменение усилий вытягивания слитка

АНАЛИЗ ЗНАЧИМОСТИ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ТЯНУЩИХ РОЛИКОВ НА ИЗМЕНЕНИЕ УСИЛИЯ ВЫТЯГИВАНИЯ СЛИТКА

В результате статистического анализа временных диаграмм токов нагрузки электродвигателей ТР в режиме работы ЭТР на установившейся скорости разливки установлено, что на части электродвигателей ТР имеют место явно выраженные, устойчивые за цикл разливки, колебания токов нагрузки (рис. 4). При этом существенных изменений в скорости разливки и суммарном токе ЭТР не наблюдается.

Исследование периодов основных колебаний мгновенных значений токов нагрузки электродвигателей ТР показало, что в случае колебательного характера изменения тока нагрузки с резкими фронтами изменения, учитывая, что величина тока за цикл вращения ролика достигает значений тока холостого хода, между ТР и слитком происходит периодический срыв и восстановление контакта, т.е. происходит периодическая буксовка ЭТР. Кроме периодических, на электродвигателях ТР криволинейного и горизонтального участков ЗВО наблюдаются также и случайные буксовки электроприводов, имеющие различную продолжительность. Колебательное изменение токов нагрузки электродвигателей близкое по форме к синусоидальному вызвано прогибом бочки тянущего ролика. При этом мгновенные значения токов нагрузки этих электродвигателей за цикл вращения ТР не снижаются до величины токов холостого хода. Следовательно, контакт между ТР и слитком непрерывный.

Задача исследования влияния режимов работы ЭТР при прогибе их бочки, достигающего 5 мм, на изменение усилий вытягивания на контактах ролик-слиток и величину динамических продольных усилий в отливаемой заготовке потребовала построения методики, определяющей взаимосвязь прогиба бочки ТР и величины динамических продольных усилий, создаваемых в слитке ЭТР:

1) рассматривается величина изменения угловой скорости вращения электродвигателя ТР за один оборот ролика:

$$\Delta \omega_{mot} = \frac{2i_p \delta V_{st}}{R^2 - \delta^2};$$

2) по разработанным математическим зависимостям [16] определяются изменения за один оборот ТР токов нагрузки электродвигателей и усилий вытягивания слитка, вызванные ЭТР роликов при прогибе их бочки:

$$\Delta I = \frac{2i_r \delta \beta V_{PB}}{c \Phi (R^2 - \delta^2)}; \quad (3)$$

$$\Delta F = i_r c \Phi \left(\frac{\Delta I}{R + \delta} - \frac{\beta}{c \Phi} \cdot \frac{B \Delta \omega_{mot}}{R - \delta} \right), \quad (4)$$

где β – жесткость механической характеристики электропривода тянущего ролика, Н·м·с; i_r – передаточное число редуктора; V_{BP} – скорость литья заготовки, м/мин; R – радиус тянущего ролика, мм; δ – величина прогиба бочки тянущего ролика, мм; $B = 0,056$ – коэффициент, определенный эмпирическим путем.

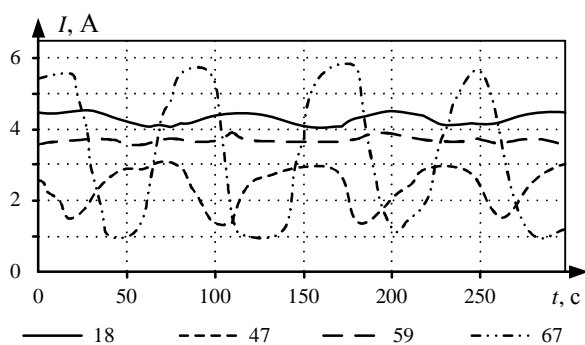


Рис. 4. Временные диаграммы токов нагрузки электродвигателей тянущих роликов в режиме работы электропривода на установившейся скорости разливки: 18, 47, 59, 67 – номера двигателей тянущих роликов

Прогиб бочки δ ТР вызывает существенное колебательное изменение токов нагрузки $I(t)$ электродвигателей, по форме соответствующее реальным изменениям тока, и значимое изменение за один оборот ролика усилия вытягивания слитка $F(t)$, формируемого ЭТР (рис. 5). Например, на скорости литья заготовки $V = 0,75$ м/мин при прогибе ролика радиусом $R = 165$ мм на $\delta = 5$ мм изменение усилия ΔF относительно среднего значения F_{av} составит $\Delta F = 25$ кН (71 %).

На рис. 5 введены обозначения: F_{av} – среднее значение усилия на контакте ролик-полоса за период вращения тянущего ролика, Н; I_{av} – среднее значение тока нагрузки за период вращения тянущего ролика, А; F_1 , F_2 – соответственно наибольшее и наименьшее значения усилия на контакте ролик-полоса за период вращения тянущего ролика, Н; ΔI_a – амплитуда изменения

тока нагрузки, А; ΔF – диапазон изменения усилия на контакте ролик-полоса за период вращения тянущего ролика, Н.

В результате исследований по разработанной методике установлено, что ЭТР при прогибе их бочки заметно (до 105 % от заданного среднего значения) влияют на величину усилий вытягивания слитка на ее контактах с ТР (рис. 6). Кроме того, ЭТР при прогибе их бочки создают существенные динамические нагрузки (до 55 кН). Поэтому пренебрегать электромеханическими явлениями на контакте деформированного ролика со слитком недопустимо. Под электромеханическими явлениями понимается реакция ЭТР на прогиб его бочки, проявляющаяся как изменение усилия вытягивания слитка.

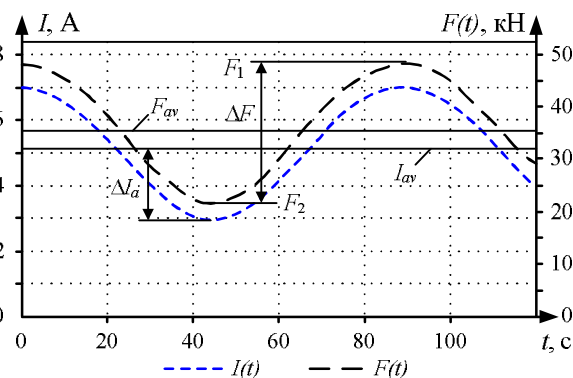


Рис. 5. График изменения тока и усилия вытягивания слитка при прогибе бочки тянущих роликов

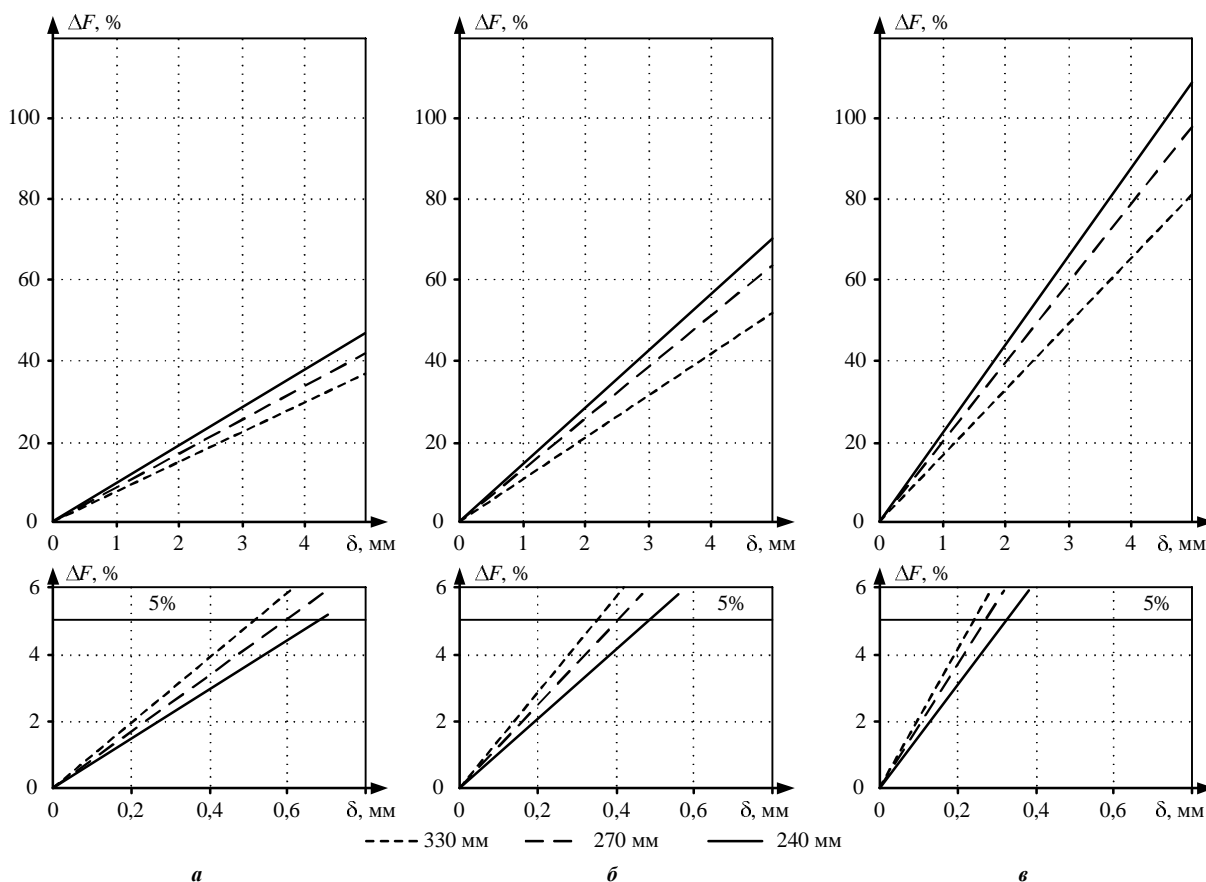


Рис. 6. Графики изменения динамических продольных усилий в функции прогиба бочки тянущего ролика на скорости вытягивания заготовки: а – 0,5 м/мин; б – 0,75 м/мин; в – 1 м/мин

На основании аналитических зависимостей (3) и (4) определены граничные значения прогиба бочки тянущих роликов δ_B , повышение которых вызывают значимое (более 5 %) изменение усилия вытягивания слитка на контакте ТР-слиток и динамических продольных усилий, создаваемых ЭТР.

Установлено, что стабилизация мгновенных значений токов нагрузки электродвигателей ТР на заданном уровне ($I = \text{const}$) при величине прогиба роликов диаметром $D_r = 240$ мм до 3,6 мм, $D_r = 270$ мм до 4,2 мм и $D_r = 330$ мм до 5 мм позволяет ограничить изменение усилия вытягивания в пределах 5%. Для полной стабилизации усилия вытягивания и сведения к нулю динамических продольных усилий в слитке необходимо принудительное изменение мгновенных значений токов нагрузки электродвигателей относительно заданного значения (рис. 5) согласно зависимости

$$\Delta I'(t) = \frac{\beta B(R + \delta)}{(c\Phi) \cdot (R - \delta)} \Delta \omega_{\text{mot}} \sin\left(\frac{2\pi}{T_p} t\right). \quad (5)$$

Периодические и случайные буксовки ЭТР возникают на криволинейном и горизонтальном участках ЗВО.

Задача оценки влияния периодических и случайных буксенок ЭТР на величину динамических продольных усилий в слитке включает в себя следующие исследования: оценку величины динамического усилия (удара) в момент восстановления контакта между ТР и

слитком и определение величины динамических продольных усилий в слитке, вызванных случайным перераспределением усилия вытягивания слитка между электроприводами из-за их буксенок.

Исследованиями установлено, что при восстановлении контакта тянущих роликов со слитком в последнем электроприводами создаются существенные динамические (ударные) продольные усилия (до 100 кН). Наличие этих динамических продольных усилий в слитке приводит к снижению качества осевой зоны слитка.

Неконтролируемое колебательное изменение токов нагрузки I_i (рис. 7, а) в группе электродвигателей ТР горизонтального участка ЗВО создает в осевой зоне слитка дополнительные динамические продольные усилия (до 100 кН) (рис. 7, б). Экспериментально доказано, что в периоды времени отсутствия контакта между ТР и слитком возможна регулировка длительности низкого значения тока нагрузки за счет увеличения и уменьшения частоты вращения электродвигателя посредством изменения, например, напряжения на его якоре. Это позволяет регулировать фазы изменения токов нагрузки относительно друг друга (рис. 7, в), за счет чего более чем в 2 раза (рис. 7, г) снизить максимальные значения динамических продольных усилий в осевой зоне слитка, вызванные буксовками электродвигателей ТР. Разработаны математические выражения, позволяющие установить требуемый сдвиг фаз колебаний токов нагрузки электродвигателей [11].

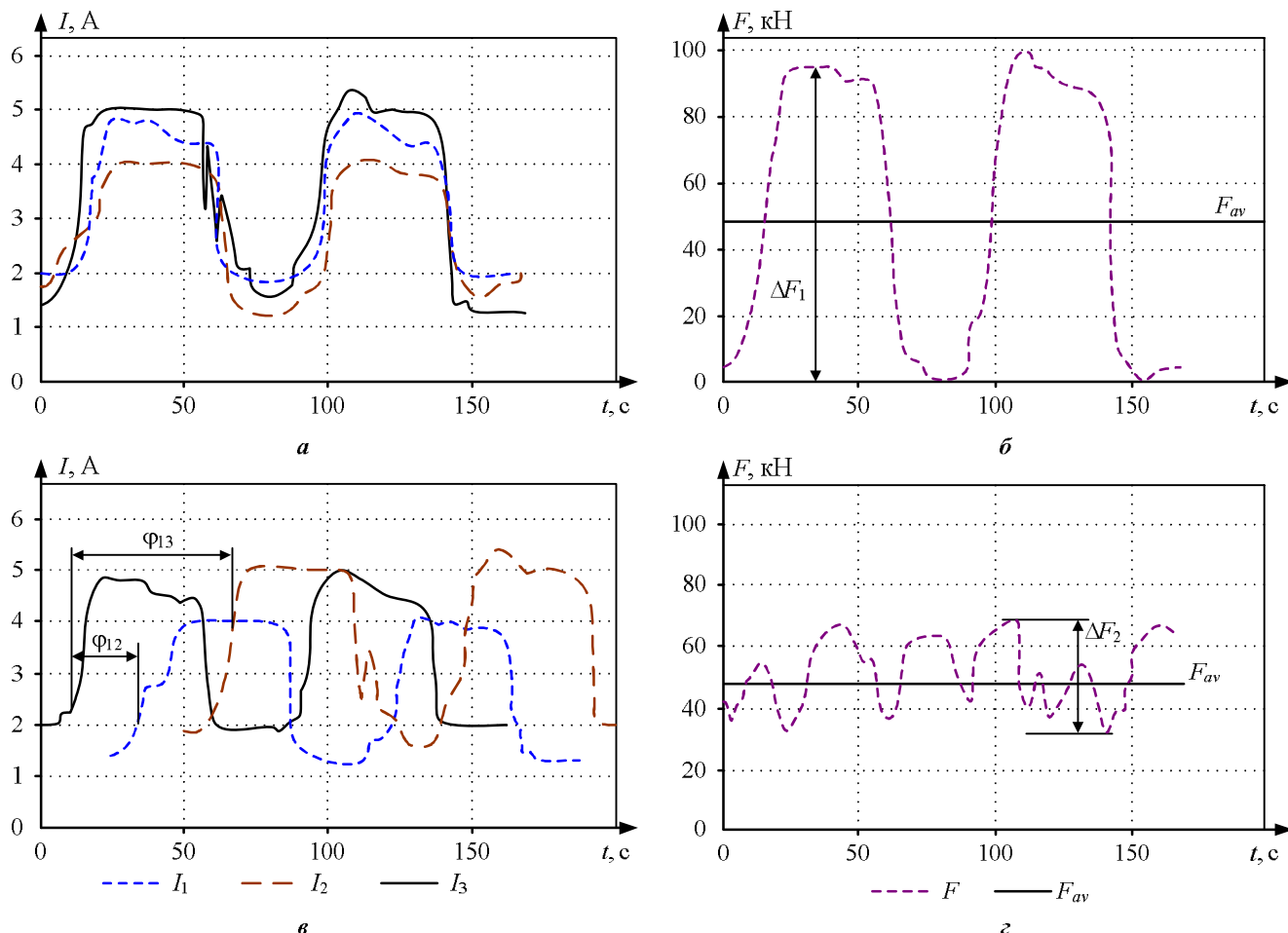


Рис. 7. Временные диаграммы: а, в – изменения токов нагрузки; б, г – продольных усилий в слитке

На **рис. 7** введены обозначения: $\Delta F_1, \Delta F_2$ – величины динамических продольных усилий, Н; φ_{12} – сдвиг фаз между изменениями токов I_1 и I_2 ; φ_{13} – сдвиг фаз между изменениями токов I_1 и I_3 .

Определены конкретные технологические требования к ЭТР и их систем управления по участкам ЗВО с позиций стабилизации усилия вытягивания слитка на его контакте с ТР и ограничения статических и динамических продольных усилий в отливаемой заготовке:

1) ЭТР радиального участка ЗВО должны иметь возможность индивидуального регулирования мгновенных значений токов нагрузки электродвигателей путем их стабилизации на заданном уровне при прогибе или износе бочки ТР более граничных значений или посредством их принудительного изменения относительно заданного среднего значения по разработанной зависимости при прогибе бочки ТР диаметром $D_r = 240$ мм более 3,6 мм и $D_r = 270$ мм более 4,2 мм.

2) ЭТР криволинейного и первой группы (в зоне закрытия лунки жидкой фазы) горизонтального участка ЗВО должны иметь возможность индивидуального регулирования:

- мгновенных значений токов нагрузки электродвигателей путем их стабилизации на заданном уровне при прогибе или износе бочки ТР более граничных значений;

- частот вращения электродвигателей ТР при появлении случайных и периодических буксовок ЭТР для ограничения ударных динамических нагрузок в заготовке при восстановлении контакта ролика-слиток и для регулировки по разработанной методике фаз колебательного изменения токов нагрузки групп электродвигателей.

3) ЭТР первой группы горизонтального участка ЗВО в зоне закрытия лунки жидкой фазы должны иметь возможность индивидуального регулирования мгновенных значений токов нагрузки электродвигателей путем их стабилизации на заданном уровне при условии неизменности контакта тянущий ролик – слиток.

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СХЕМА И АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ ТЯНУЩИХ РОЛИКОВ

В соответствии с разработанными технологическими требованиями обоснован выбор и предложены два варианта реализации силовой части ЭТР с целью ограничения статических и динамических продольных усилий в отливаемой заготовке:

1) индивидуальный ЭТР;

2) групповой электропривод всех тянущих роликов с активными регуляторами нагрузки в якорных цепях каждого электродвигателя ТР (**рис. 8**).

На **рис. 8** введены обозначения: $PН$ – регуляторы нагрузки электродвигателей тянущих роликов; $ДТ$ – датчики тока электродвигателей; $ДН$ – датчик напряжения тиристорного преобразователя; $ВУ$ – вычислительное устройство.

Достоинством этого варианта реализации силовой части электропривода ТР является то, что внедрение данного варианта электропривода не требует значительных капитальных затрат на реконструкцию машинного зала действующей МНЛЗ. Регуляторы

нагрузки предложено выполнить по принципу широтно-импульсной модуляции. При этом регулирование скорости разливки и её стабилизацию выполняет тиристорный преобразователь, а регулирование токов нагрузки и угловых скоростей электродвигателей согласно разработанных требований выполняют регуляторы нагрузки. При выходе из строя одного или нескольких регуляторов нагрузки электродвигатель продолжит выполнять вытягивание заготовки с нерегулируемой нагрузкой на его валу до замены регулятора. Доказана возможность применения на радиальном участке ЗВО регулируемых источников тока (момента). Применение данного технического решения обусловлено надежностью контакта между тянущими роликами и слитком и естественным выполнением требования ограничения продольных усилий, создаваемых в отливаемой заготовке ЭТР при износе и прогибе их бочки. Разработка предлагаемых технических решений ЭТР выполнена в рамках программы реконструкции действующих МНЛЗ с целью повышения качества макроструктуры литых заготовок и повышения производительности МНЛЗ.

Разработан общий алгоритм управления ЭТР, позволяющий непосредственно в ходе литья заготовки ограничивать статические и динамические продольные усилия в слитке за счет целесообразного управления ЭТР при прогибе или износе их бочки, «мягкого» восстановления контакта ролик-слиток и регулировки фаз колебательного изменения токов нагрузки групп электродвигателей при периодических и случайных буксовках электроприводов.

Разработан и апробирован алгоритм «мягкого» восстановления контакта ТР со слитком при случайных и периодических буксовках электроприводов, заключающийся в согласовании линейных скоростей ролика и слитка посредством снижения скорости вращения ролика с уровня $\omega_{\text{ХХ}}$ ($V_{\text{ХХ}}$) до уровня скорости движения слитка $V_{\text{РВ}}$ в периоды отсутствия контакта между ТР и слитком. При восстановлении контакта происходит увеличение нагрузки до прежнего уровня. Алгоритм обеспечивает ограничение ударных динамических нагрузок, создаваемых ЭТР при восстановлении контакта ТР-слиток.

Разработан и апробирован алгоритм регулировки фаз колебательного изменения токов нагрузки соседних электродвигателей ТР горизонтального участка ЗВО, включающий операции выделения первых гармоник колебаний токов нагрузки посредством разложения изменения мгновенных значений токов в ряд Фурье, определения требуемого сдвига фаз между изменениями токов с помощью математического аппарата векторной алгебры, регулирования фаз изменения токов электродвигателей в период времени отсутствия контакта между тянущими роликами и слитком согласно требуемых значений. Алгоритм обеспечивает ограничение динамических продольных усилий в осевой зоне заготовки, вызванных колебательным изменением токов нагрузки электродвигателей из-за периодических буксовок группы ЭТР.

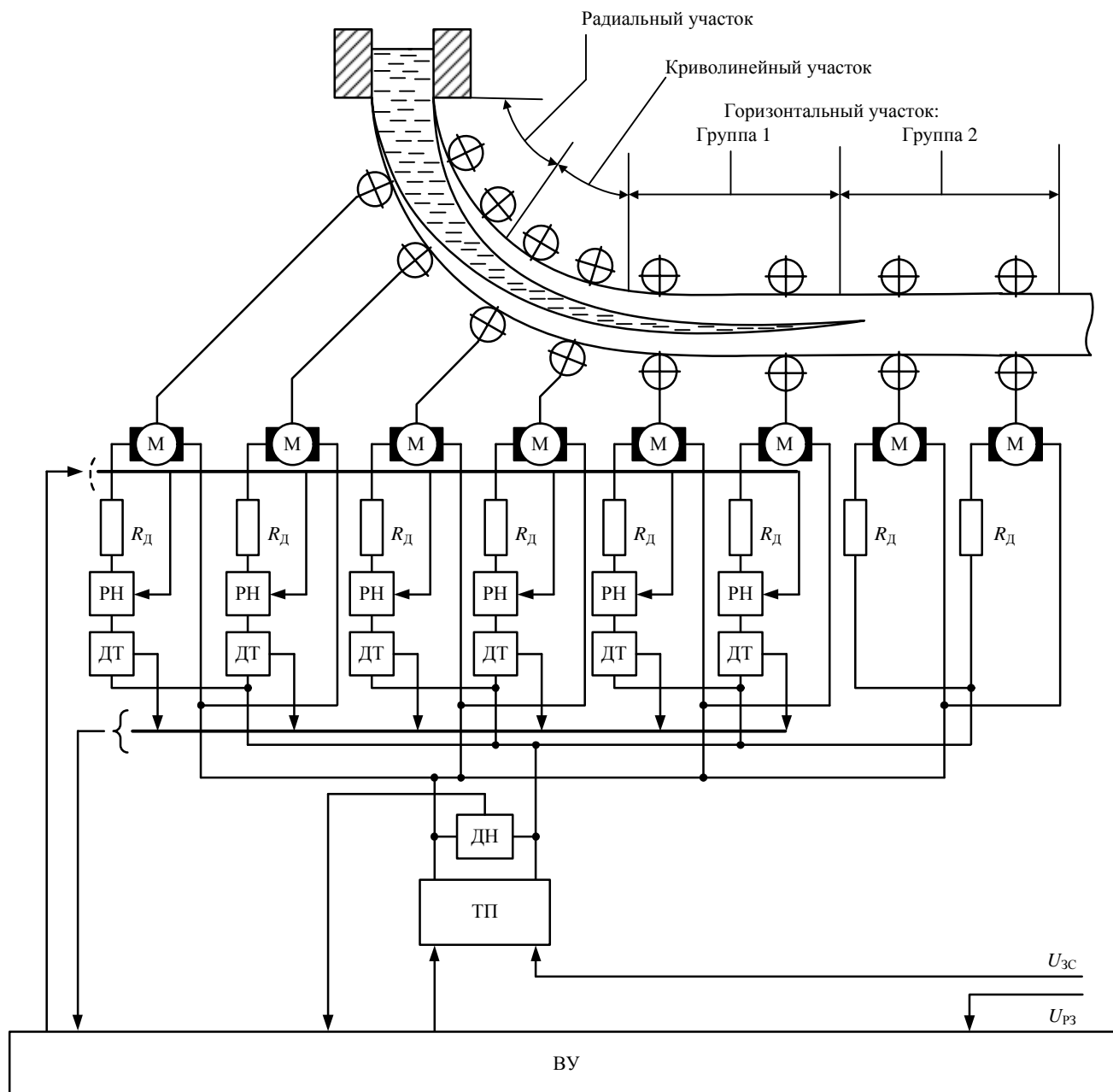


Рис. 8. Система автоматизации с групповым электроприводом тянущих роликов

Для оценки значимости влияния динамических (ударных) продольных усилий, создаваемых в слитке ЭТР, на качество макроструктуры литой заготовки проведен промышленный эксперимент. В ходе эксперимента в якорные цепи 15 электродвигателей ТР секций 9–11 (район формирования осевой зоны слитка) установлены транзисторные регуляторы нагрузки, выполняющие функции регулируемых сопротивлений. За счет уменьшения жесткости механических характеристик электродвигателей указанной группы ТР было выполнено уменьшение токов нагрузки. В результате на ряде электродвигателей колебания токов прекратились, на остальных электродвигателях уменьшилась амплитуда колебательного их изменения. После регулировки токов произошло уменьшение общих динамических продольных усилий в слитке со 100 до 30 кН и ударных динамических нагрузок со 180 до 60 кН.

При этом установлено, что за исследуемые интер-

валы времени после снижения динамических усилий в слитке на ручье 13–14 произошло улучшение качества по всем осевым видам дефектов в среднем на 8% при одновременном увеличении скорости разливки с 0,702 м/мин до 0,707 м/мин. При этом на контрольном ручье 15–16 МНЛЗ практически на неизменной скорости литья заготовки произошло снижение качества по показателям осевой рыхлости и осевой химической неоднородности, что свидетельствует о более тяжелых технологических условиях литья заготовки во второй период времени (после регулировки токов нагрузки электродвигателей).

Таким образом, в результате снижения динамических продольных усилий в слитке за счет уменьшения общей величины колебаний токов нагрузки электродвигателей секций 9–11 произошло улучшение качества макроструктуры осевой зоны непрерывнолитой заготовки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований доказано:

1. Доказано, что дополнительные статические и динамические продольные усилия, создаваемые в кристаллизующейся заготовке электроприводом тянущих роликов по причине деформации бочки последних, негативно влияют на качество заготовок.
2. Предложены методики оценки влияния электроприводов тянущих роликов при деформации их бочки на изменение статических и динамических усилий.
3. Разработаны новые технологические требования к электроприводу тянущих роликов с целью уменьшения указанных усилий, а также технические решения, и алгоритмы их реализации.
4. Экспериментально доказана эффективность новых разработок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нисковских В.М., Карлинский С.Е., Беренов А.Д. Машины непрерывного литья слябовых заготовок. М.: Металлургия, 1991. 272 с.
2. Шевченко Е.А., Столяров А.М., Шаповалов А.Н. Изучение качества слябовой заготовки, отлитой на криволинейной МНЛЗ с вертикальным участком // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2013. №1(41). С. 27–30.
3. Марголин Ш.М. Электропривод машин непрерывного литья заготовок. М.: Металлургия, 1987. 279 с.
4. Совершенствование электропривода тянущих роликов слябовых машин непрерывного литья заготовок / С.И. Лукьянов, Н.В. Фомин, А.В. Васильев, А.И. Хлыстов // Электротехнические системы и комплексы. 2014. №1(22). С. 18–22.
5. Пат. 2164836 Российской Федерации, МПК 7B22D 11/16. Устройство автоматического управления электроприводом зоны вторичного охлаждения машины непрерывного литья / Васильев А.Е., Лукьянов С.И., Лукьянов В.П. и др.; заявитель ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат». Опубл. 10.04.2001.
6. Intelligent system for prediction of liquid metal breakout under a mold of slab continuous casting machines / Luk'yanov S.I., Suspitsyn E.S., Krasilnikov S.S., Shvidchenko D.V. // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015. Vol. 79, Issue 9. Pp 1861–1868. DOI 10.1007/s00170-150-6945-1 (Scopus, Web of Science).
7. Strand withdrawal rate stabilization: via the electric drive of the secondary cooling zone of a continuous casting machine // Luk'yanov S.I., Belyi A.V., Logunova O.S., Shvidchenko D.V., Pishnograev R.S., Suspitsyn E.S. // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017. Vol. 89, Issue 5. P. 1–13. DOI 10.1007/s00170-016-9224x (Scopus, Web of Science).
8. Diagnosis system for electric drive equipment of pinch rolls in continuous casting machines / Luk'yanov S.I., Shvidchenko D.V., Pishnograev R.S., Suspitsyn E.S., Konovalov M.V. // 2016 9th International Conference of Power drives Systems, ICPDS 2016. DOI: 10.1109 / ICPDS.2016.7756722. (Scopus).
9. Improving the quality of continuously cast slabs: by means of the pinch roll drive of the horizontal part of a continuous casting machine / Luk'yanov S.I., Vasiliev A.E., Logunova O.S., Karyakin A.L. // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018. Volume 96 (1–4). P. 1–9. (Scopus, Web of Science).
10. Автоматизированная система контроля и управления МНЛЗ: монография / Д.Х. Девятов, С.И. Лукьянов, О.С. Логунова и др. Магнитогорск: МГТУ, 2009. 640 с.
11. Швидченко Д.В. Ограничение продольных усилий в заготовке электроприводами тянущих роликов машины непрерывного литья: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / Швидченко Дмитрий Владимирович. Москва, 2003.
12. Лукьянов С.И. Оптимизация электропривода тянущего устройства по критерию качества непрерывнолитых заготовок: дис. ... докт. техн. наук: 05.09.03 / Лукьянов Сергей Иванович. Москва, 2003.

Поступила в редакцию 19 июня 2019 г.

INFORMATION IN ENGLISH

CONTINUOUS CASTER PULLING OUT ROLLS ELECTRIC DRIVE CONTROL SYSTEM FOR THE CASE OF DEFORMATION OF ROLL BARRELS

Sergei I. Lukyanov

D.Sc. (Engineering), Professor, Professor of the Department of Electronics and Microelectronics, the Director of Power Engineering and Automated Systems Institute, Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: ieiac@magtu.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4685-7627>

Dmitry V. Shvidchenko

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, the Department of Electronics and Microelectronics, Power Engineering and Automated Systems Institute, Magnitogorsk State Technical University, Vice Director of OSC «Technoap Engineering», Magnitogorsk, Russia. E-mail: n.shvidchenko@magtu.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3917-9218>

Roman S. Pishnograev

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, the Department of Electronics and Microelectronics, Power Engineering and Automated Systems Institute, Magnitogorsk State Technical University, Leading Engineer of OSC «Technoap Engineering», Magnitogorsk, Russia. E-mail: rspishnograev@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8854-5723>

Nickolay V. Shvidchenko

Ph.D. in Engineering, Associate Professor, the Department of Electronics and Microelectronics, Power Engineering and Automated Systems Institute, Magnitogorsk State Technical University, Engineer of OSC «Technoap Engineering», Magnitogorsk, Russia. E-mail: n.shvidchenko@magtu.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3917-9218>

Sergey S. Krasilnikov

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, the Department of Electronics and Microelectronics, Power Engineering and Automated Systems Institute, Magnitogorsk State Technical University, Engineer of OSC «MMK-Informservice», Magnitogorsk, Russia. E-mail: krasilnikov.ss@yandex.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3131-7193>

In this article, the results of experimental and analytical research of the electric drive of continuous casting machine and the way it affects the quality of the cast slabs are presented. It is shown that pulling roll barrels deformation, which is bending or wear, leads to the slabs quality reduction since the deformed roll barrels apply additional static and dynamic forces to the slab during crystallization process. The methods that make it possible to estimate the rolls defect influence on the slab quality are presented. As a research result the new technological demands to the continuous casting machine electric drive were designed and tested, which is described in the paper.

Keywords: continuous casting machine electric drive, pulling out strengths, continuous cast slab quality, pull out rolls, pulling out strength stability.

REFERENCES

1. Niskovskikh V.M., Karlinsky S.E., Berenov A.D. Continuous Slab Casters, Vol 292, Retrieved from www.scopus.com
2. Shevchenko E.A., Stolyarov A.M., Shapovalov A.H. The research of the quality of a continuous cast slab produced in a radial caster with the vertical part. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Bulletin of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2013. No.1(41) P. 27-30. (In Russian)
3. Margolin Sh. M. *Elektroprivod mashin nepreryvnogo litya zagotovok* [Continuous casting machines electric drive]. Metallurgy. 1987. 297 p. (In Russian)
4. Lukyanov S.I., Fomin N.V., Vasilyev A.V. Khlystov A.I. Improvement of the continuous casting machines electric drive. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes]. 2014. No. 1(22). P. 18-22. (In Russian)
5. *Ustroystvo avtomaticheskogo upravleniya elektroprivodom zony vtorichnogo okhlazhdeniya mashiny nepreryvnogo litya* [The control system of a continuous casting machine secondary cooling zone electric drive] / Vasilyev A.E., Lukyanov S.I., Lukyanov V.P., Pat. No. 2164836 RF IC 7B22D 11/16. 2001.
6. Intelligent system for prediction of liquid metal breakout under a mold of slab continuous casting machines / Luk'yanov S.I., Suspitsyn E.S., Krasilnikov S.S., Shvidchenko D.V. // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015. Volume 79, Issue 9. P. 1861–1868. DOI 10.1007/s00170-150-6945-1 (Scopus, Web of Science).
7. Strand withdrawal rate stabilization: via the electric drive of the secondary cooling zone of a continuous casting machine / Luk'yanov S.I., Belyi A.V., Logunova O.S., Shvidchenko D.V., Pishnograev R.S., Suspitsyn E.S. // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017. Volume 89, Issue 5. P. 1–13. DOI 10.1007/s00170-016-9224x (Scopus, Web of Science).
8. Diagnosis system for electric drive equipment of pinch rolls in continuous casting machines / Luk'yanov S.I., Shvidchenko D.V., Pishnograev R.S., Suspitsyn E.S., Kononov M.V. // 2016 9th International Conference of Power drives Systems, ICPDS 2016. DOI: 10.1109 / ICPDS.2016.7756722. (Scopus).
9. Improving the quality of continuously cast slabs: by means of the pinch roll drive of the horizontal part of a continuous casting machine / Luk'yanov S.I., Vasiliev A.E., Logunova O.S., Karyakin A.L. // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018. Vol. 96 (1–4). P. 1–9. (Scopus, Web of Science).
10. Devyatov D.Kh. Luk'yanov S.I., Logunov O.S. et.al. (2009) *Avtomatizirovannaya sistema kontrolya i upravleniya MNLZ* [Automated control and control system for continuous casting machines]. Magnitogorsk: NMSTU, 2009. 640 p.
11. Shvidchenko D.V. *Ogranichenie prodolnykh usilij v zagotovke elektroprivodami tyanuschikh rolikov mashiny nepreryvnogo litya*. Kand. Diss. [Limitation of longitudinal forces in slab by the pulling rolls electric drives. Ph.D.Diss.]. Shvidchenko D.V. Moscow, 2003.
12. Luk'yanov S.I. *Optimizatsiya elektroprivoda tyanuschepravilnogo ustroystva po kriteriyu kachestva nepreryvnolitykh zagotovok*. D.Sc. Diss. [Secondary cooling zone electric drive optimization by the criteria of slab quality. D.Sc. Diss.]. Luk'yanov S.I. Moscow, 2003.

Лукьянов С.И., Швидченко Д.В., Пишнограев Р.С., Швидченко Н.В., Красильников С.С. Система управления электроприводом тянущих роликов машины непрерывного литья заготовок при деформации бочек роликов // Электротехнические системы и комплексы. 2019. № 3(44). С. 53-62. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-3\(44\)-53-62](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-3(44)-53-62)

Lukyanov S.I., Shvidchenko D.V., Pishnograev R.S., Shvidchenko N.V., Krasilnikov S.S. Continuous Caster Pulling out Rolls Electric Drive Control System for the Case of Deformation of Roll Barrels. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2019, no. 3(44), pp. 53-62. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-3\(44\)-53-62](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-3(44)-53-62)

ВЕНТИЛЬНО-ЕМКОСТНАЯ СИСТЕМА СТАБИЛИЗАЦИИ ТОКА ДЛЯ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ УСТАНОВКИ

В данной статье рассмотрено трехфазное емкостное стабилизирующее выходной ток устройство, которое предназначено для питания через нерегулируемый выпрямитель электродуговой установки. Произведено математическое описание электрической системы и осуществлено построение векторных диаграмм стабилизатора, характеризующих изменение положения векторов выходных фазных напряжений. Приведены выражения, позволяющие рассчитать выходное напряжение и выходной ток при изменении сопротивления нагрузки.

Ключевые слова: стабилизация тока, векторная диаграмма, емкостное устройство, выпрямитель, вольт-амперная характеристика, электродуговая установка.

ВВЕДЕНИЕ

В электродуговых установках необходимо обеспечивать стабильное горение электрической дуги между электродами, питающимися от источника постоянного напряжения, что достигается за счет стабилизации тока дуги. Электродуговая установка может входить в состав электроплазменной установки [1-7]. В такой установке требования к стабильному горению дуги при внешних возмущающих воздействиях возрастают [8-10].

Для получения стабилизированного выходного тока выпрямителя, питающегося от трехфазной промышленной сети, можно использовать регулируемые выпрямители с замкнутой системой управления выходным током, но наиболее простым решением является использование параметрического резонансного индуктивно-емкостного стабилизатора тока (рис. 1, а), который может быть включен между питающей сетью и нерегулируемым выпрямителем [11]. Векторная диаграмма, поясняющая его работу, показана на рис. 1, б. Однако для этой схемы режим холостого хода является аварийным, что ограничивает ее применение. Следует отметить, что резонансный стабилизатор, имеющий фиксированное сопротивление реактивных элементов, не позволяет регулировать ток в выпрямленной цепи. Поэтому в большинстве случаев для питания электродуговых установок с обеспечением стабилизации тока дуги применяют источники питания с «падающей» вольт-амперной характеристикой [4, 5].

МЕТОДЫ ПОСТРОЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СХЕМЫ УСТАНОВКИ

«Падающей» вольт-амперной характеристикой, благоприятной для стабилизации тока, обладает трехфазное емкостное токоограничивающее устройство, выполненное из шести конденсаторов одинаковой емкости C , соединенных в кольцо (рис. 2, а). Три вывода, между которыми включены по два конденсатора, подключены к питающей сети, имеющей линейное напряжение U_L , а к выводам, выполненным между этими двумя конденсаторами, подключена нагрузка. Выходное напряжение определяется величиной и характером сопротивления нагрузки.

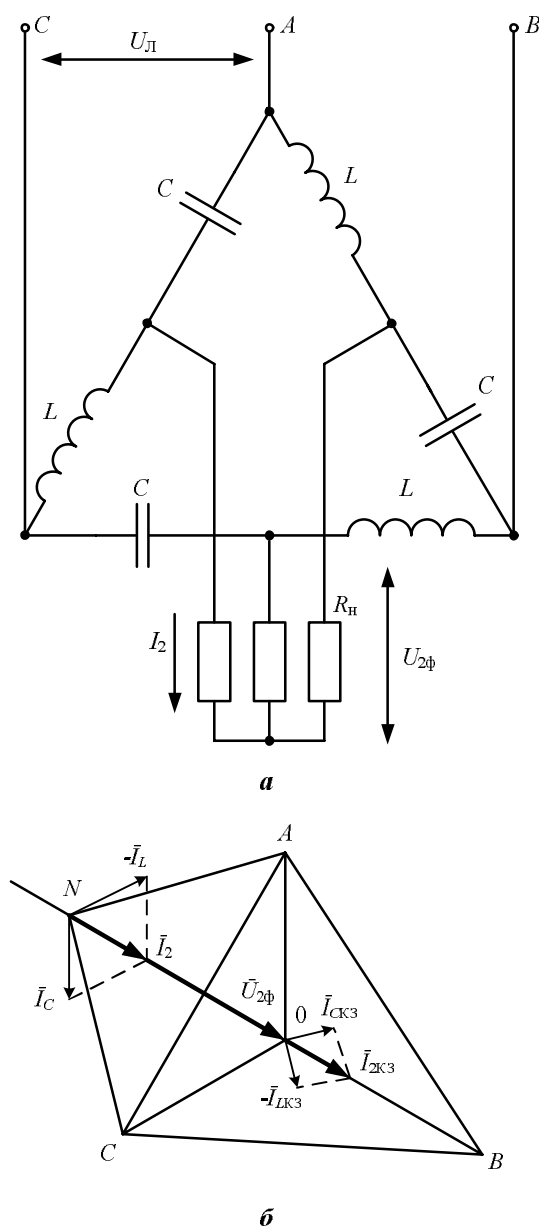


Рис. 1. Трехфазная индуктивно-емкостная стабилизация тока нагрузки: а – принципиальная схема стабилизатора; б – векторная диаграмма работы стабилизатора

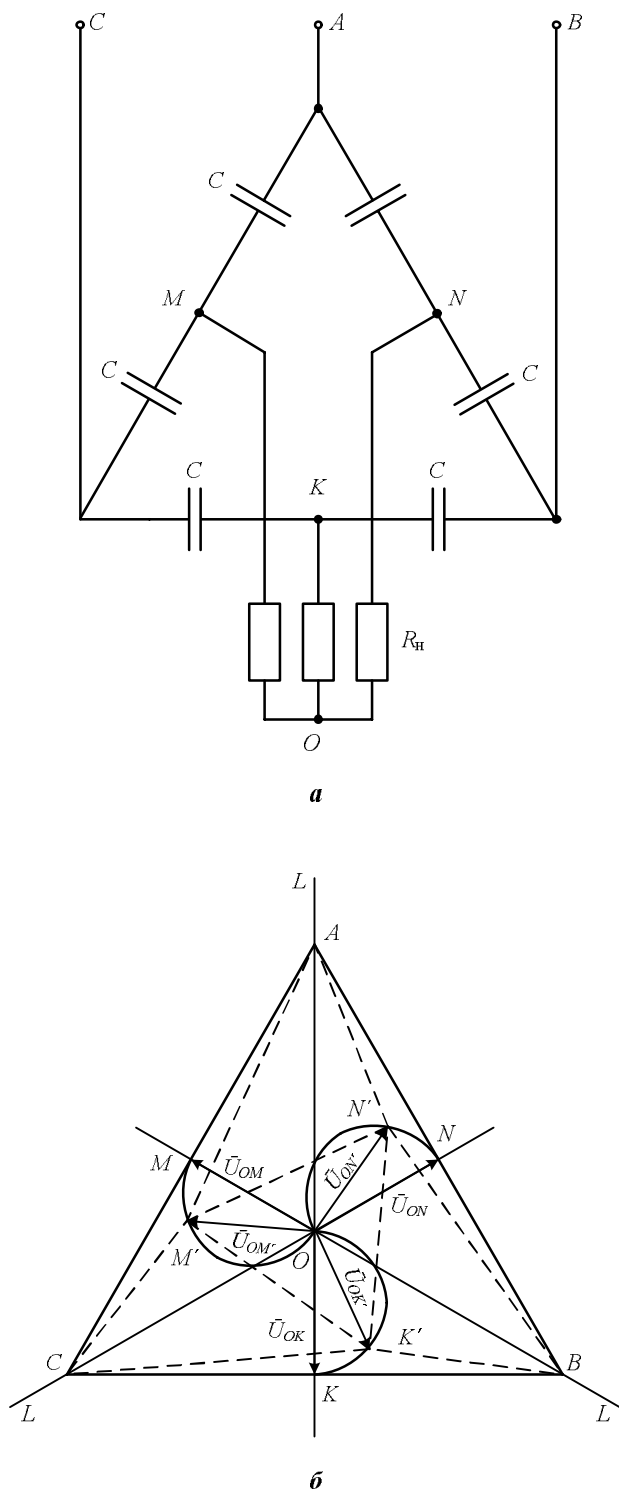


Рис. 2. Трехфазное емкостное токоограничивающее устройство: а – принципиальная схема с активной нагрузкой; б – векторная диаграмма при различном характере нагрузки

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Векторные диаграммы системы при симметричной активной и емкостной нагрузке показаны на рис. 2, б.

Выходные фазные напряжения определяются по формулам:

$$\bar{U}_{ON} = \bar{U}_{OA} + \bar{U}_{AN}; \quad (1)$$

$$\bar{U}_{ON} = \bar{U}_{OB} + \bar{U}_{BN}; \quad (2)$$

$$\bar{U}_{OK} = \bar{U}_{OB} + \bar{U}_{BK}; \quad (3)$$

$$\bar{U}_{OK} = \bar{U}_{OC} + \bar{U}_{CK}; \quad (4)$$

$$\bar{U}_{OM} = \bar{U}_{OA} + \bar{U}_{AM}; \quad (5)$$

$$\bar{U}_{OM} = \bar{U}_{OC} + \bar{U}_{CM}. \quad (6)$$

В соответствии с первым законом Кирхгофа запишем:

$$\bar{I}_{AN} + \bar{I}_{BN} + \bar{I}_{ON} = 0; \quad (7)$$

$$\bar{I}_{BK} + \bar{I}_{CK} + \bar{I}_{OK} = 0; \quad (8)$$

$$\bar{I}_{CM} + \bar{I}_{AM} + \bar{I}_{OM} = 0. \quad (9)$$

Преобразовав выражения (7) – (9), учитывая, что проводимость конденсаторов $Y_C = j\omega C$, получим:

$$\bar{U}_{ON}Y_H = -\bar{U}_{AN}Y_C - \bar{U}_{BN}Y_C; \quad (10)$$

$$\bar{U}_{OK}Y_H = -\bar{U}_{BK}Y_C - \bar{U}_{CK}Y_C; \quad (11)$$

$$\bar{U}_{OM}Y_H = -\bar{U}_{CM}Y_C - \bar{U}_{BM}Y_C. \quad (12)$$

После совместного решения уравнений (1)–(6) и (10)–(12) получим:

$$\bar{U}_{ON} = \frac{(\bar{U}_{OA} + \bar{U}_{OB})}{(2 + Y_N/Y_C)} = -\bar{U}_{OC} \left(2 + \frac{Y_N}{Y_C} \right); \quad (13)$$

$$\bar{U}_{OK} = \frac{(\bar{U}_{OB} + \bar{U}_{OC})}{(2 + Y_N/Y_C)} = -\bar{U}_{OA} \left(2 + \frac{Y_N}{Y_C} \right); \quad (14)$$

$$\bar{U}_{OM} = \frac{(\bar{U}_{OC} + \bar{U}_{OA})}{(2 + Y_N/Y_C)} = -\bar{U}_{OB} \left(2 + \frac{Y_N}{Y_C} \right). \quad (15)$$

Будем считать нагрузку активной с проводимостью $Y_H = 1/Z_H = 1/R_H$.

Представим комплексные выражения (13)–(15) в показательной форме:

$$\bar{U}_{ON} = \frac{-\bar{U}_{OC} R_H \omega C e^{j \arctg\left(\frac{1}{2} R_H \omega C\right)}}{\sqrt{(2 R_H \omega C) + 1}}; \quad (16)$$

$$\bar{U}_{OK} = \frac{-\bar{U}_{OA} R_H \omega C e^{j \arctg\left(\frac{1}{2} R_H \omega C\right)}}{\sqrt{(2 R_H \omega C) + 1}}; \quad (17)$$

$$\bar{U}_{OM} = \frac{-\bar{U}_{OB} R_H \omega C e^{j \arctg\left(\frac{1}{2} R_H \omega C\right)}}{\sqrt{(2 R_H \omega C) + 1}}. \quad (18)$$

Соотношение между модулями фазных напряжений на нагрузке и фазных напряжений питающей сети будет

$$U_H = \frac{U_\Phi R_H \omega C e^{j \arctg\left(\frac{1}{2} R_H \omega C\right)}}{\sqrt{(2 R_H \omega C)^2 + 1}}. \quad (19)$$

Анализ выражений (16) – (18) и векторной диаграммы (рис. 2, б) показывает следующие особенности данной системы.

При изменении активного сопротивления нагрузки от нуля до бесконечности сопровождается изменением модуля фазного напряжения на выходе емкостного устройства от нуля до половины фазного напряжения сети. Место положения окончания вектора фазного напряжения, подведенного к активному сопротивлению нагрузки при ее изменении в диапазоне $0 \leq R_H \leq \infty$ на фазовой плоскости представляет собой полуокружность.

В случае емкостного характера нагрузки $Y_H = j\omega C_H$ модули векторов фазных напряжений нагрузки можно рассчитать, используя выражения (13) – (15). На векторной диаграмме точки N , K и M находятся на прямых линиях, построенных от точки O перпендикулярно к векторам трех линейных напряжений. Векторы фазных напряжений нагрузки направлены: вектор \vec{U}_{ON} – противоположно вектору \vec{U}_{OC} , вектор \vec{U}_{OK} – противоположно вектору \vec{U}_{OA} , вектор \vec{U}_{OM} – противоположно вектору \vec{U}_{OB} . При изменении проводимости емкостной нагрузки от нуля до бесконечности модуль фазного напряжения нагрузки изменится от нуля до половины фазного напряжения сети.

При индуктивном характере нагрузки $Y_H = 1 / j\omega L_H$ в схеме возможны резонансные явления. На частоте питающей сети резонанс возникает при значении проводимости нагрузки $Y_{HP} = 1 / j\omega L_{HP}$.

При изменении проводимости нагрузки от нуля до резонансного значения модуль фазного напряжения нагрузки изменится от половины фазного напряжения сети до бесконечности. Векторы фазных напряжений нагрузки направлены: вектор \vec{U}_{ON} – встречно вектору \vec{U}_{OC} , вектор \vec{U}_{OK} – встречно вектору \vec{U}_{OA} , вектор \vec{U}_{OM} – встречно вектору \vec{U}_{OB} . При изменении проводимости нагрузки от резонансного значения до бесконечности модуль фазного напряжения нагрузки изменится от бесконечности до нуля. Векторы фазных напряжений направлены: \vec{U}_{ON} – согласно вектору \vec{U}_{OC} , вектор \vec{U}_{OK} – согласно вектору \vec{U}_{OA} , вектор \vec{U}_{OM} – согласно вектору \vec{U}_{OB} .

Полученные зависимости показывают, что изменение выходного активного сопротивления R_H сопровождается стабилизацией тока в нагрузке, что справедливо также при емкостном характере нагрузки. При индуктивном характере нагрузки возможно наступление резонанса при условии $Y_H = 2Y_C$.

К выходу трехфазного емкостного токоограничивающего устройства может быть подключен трехфазный мостовой диодный выпрямитель (рис. 3, а), к выходу которого через сглаживающий дроссель подключена активная нагрузка, в качестве которой могут быть нагревательные элементы или электрическая дуга. Сопротивление дуги может меняться в процессе горения с разным темпом, что будет сопровождаться изменением выпрямленного тока. В этом случае в обмотке сглаживающего дросселя будет наводиться ЭДС самоиндукции, величина которой зависит от темпа изменения тока.

Характер нагрузки для емкостного устройства при изменении выходного тока можно считать – активным R_H с ЭДС самоиндукции сглаживающего дросселя. Поскольку выпрямитель нерегулируемый, можно полагать, что вектор эквивалентной фазной ЭДС самоиндукции \vec{E} , приведенной к цепи переменного тока, направлен противоположно вектору фазного тока на входе нерегулируемого выпрямителя.

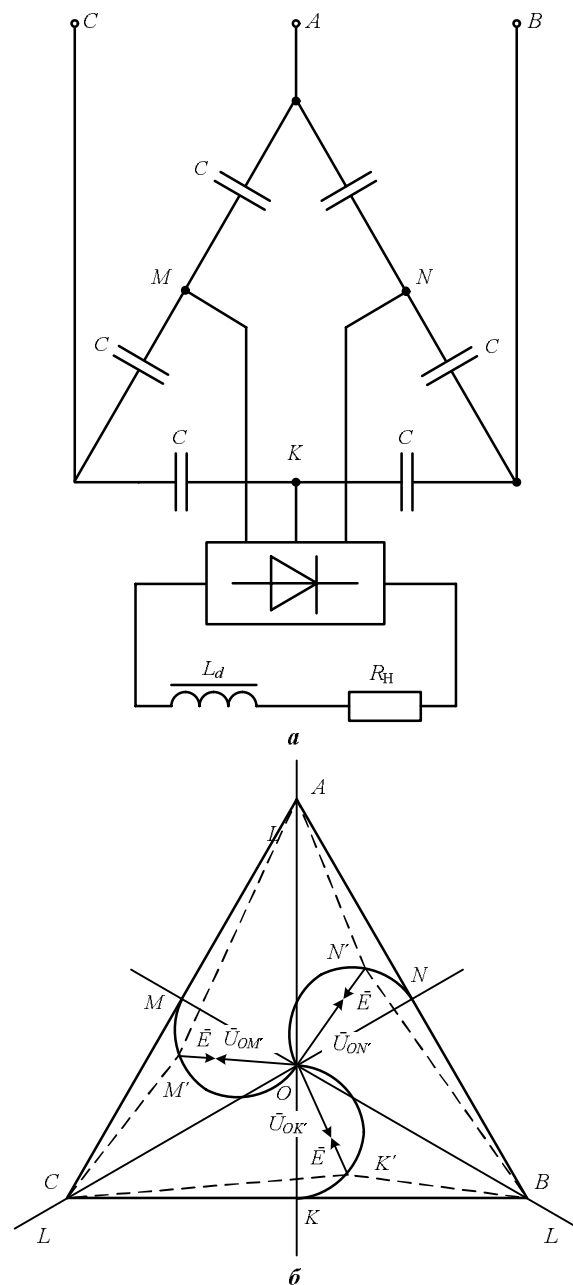


Рис. 3. Трехфазное емкостное токоограничивающее устройство с выпрямителем и реактором:
а – принципиальная схема с активной нагрузкой;
б – векторная диаграмма при работе на активную нагрузку с ЭДС самоиндукции

Уравнения баланса напряжений имеют вид:

$$(\bar{U}_{ON} - \bar{E})Y_H = -\bar{U}_{AN}Y_C - \bar{U}_{BN}Y_C; \quad (20)$$

$$(\bar{U}_{OK} - \bar{E})Y_H = -\bar{U}_{BK}Y_C - \bar{U}_{CK}Y_C; \quad (21)$$

$$(\bar{U}_{OM} - \bar{E})Y_H = -\bar{U}_{CM}Y_C - \bar{U}_{AM}Y_C, \quad (22)$$

где \vec{E} – вектор приведенной к цепи переменного тока противоЭДС самоиндукции сглаживающего дросселя.

Уравнения (20) – (22) можно представить в виде:

$$\bar{U}_{ON}(Y_H + 2Y_C) = \bar{E}Y_H - \bar{U}_{OC}Y_C; \quad (23)$$

$$\bar{U}_{OK}(Y_H + 2Y_C) = \bar{E}Y_H - \bar{U}_{OA}Y_C; \quad (24)$$

$$\bar{U}_{OM}(Y_H + 2Y_C) = \bar{E}Y_H - \bar{U}_{OB}Y_C. \quad (25)$$

Уравнения (23) – (25), преобразованные к показательной форме, имеют вид:

$$\bar{U}_{ON'} = \frac{-\frac{\bar{U}_{OC}}{2} + \bar{E} \frac{j}{(2R_H \omega C)}}{1 + \frac{j}{2R_H \omega C}}; \quad (26)$$

$$\bar{U}_{OK'} = \frac{-\frac{\bar{U}_{OA}}{2} + \bar{E} \frac{j}{(2R_H \omega C)}}{1 + \frac{j}{2R_H \omega C}}; \quad (27)$$

$$\bar{U}_{OM'} = \frac{-\frac{\bar{U}_{OB}}{2} + \bar{E} \frac{j}{(2R_H \omega C)}}{1 + \frac{j}{2R_H \omega C}}. \quad (28)$$

Векторная диаграмма, соответствующая уравнениям (23) – (28), показана на **рис. 3, б**. Величина модуля фазного тока определяется как

$$I = (U_H - E) / R_H.$$

На **рис. 4** построена в относительных единицах вольт-амперная характеристика емкостного устройства при работе на активную нагрузку.

$$u^* = U_H / U_{H \max};$$

$$i^* = I / U_{H \max} / R_H.$$

Выпрямленный ток связан с входным фазным током выпрямителя соотношением

$$I_d = k_I I,$$

где $k_I = \pi / \sqrt{6}$ – коэффициент, связывающий действующее значение входного тока мостового выпрямителя с током в выпрямленной цепи.

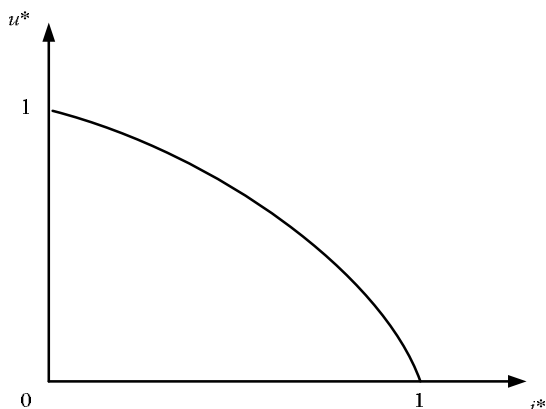


Рис. 4. Вольт-амперная характеристика емкостного устройства

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вольт-амперная характеристика емкостного устройства является «падающей», она благоприятна для использования в электродуговых установках. В отличие от резонансного индуктивно-емкостного устройства [11], в емкостном устройстве допустимо отключение нагрузки и работа в режиме холостого хода. Кроме того, конденсаторы являются дополнительным источником реактивной мощности для питающей сети.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Липецкой области в рамках научного проекта № 19-48-480001 «Разработка, исследование и оптимизация энергосберегающих электротехнических и электроприводных автоматизированных комплексов для плазменных, электрометаллошлаковых и индукционных технологий и агрегатов».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Переработка техногенных отходов в электродуговой плазме / А.С. Анышаков, Э.К. Урбах, А.Э. Урбах, В.А. Фалеев // Альтернативная энергетика и экология. 2008. №9(65). С. 131–135.
2. Плазмотермическая переработка твердых отходов / В.П. Лукашов, С.П. Ващенко и др. // Экология и промышленность России. 2005. № 11. С. 4–9.
3. Чередниченко В.С., Анышаков А.С., Кузьмин М.Г. Плазменные электротехнологические установки. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2005.
4. Anshakov A.S., Cherednichenko V.S., Urbakh E.K. et al. The treatment of mixed wastes using the thermal plasma / Progress in Plasma Processing of Materials. Begell House, Inc., 1999. P. 737–743.
5. А.с. СССР № 599732. Электродуговой нагреватель газа постоянного тока / Жуков М.Ф., Лыткин А.Я., Худяков Г.Н., Анышаков А.С. Опубл. 07.09.1982. Бюл. № 33.
6. Патент на полезную модель №188618. Электродуговой плазматрон / В.Н. Мещеряков А.М. Евсеев, В.В. Пиклов, В.Б. Чупров, В.А. Конев. Опубл. 18.04.2019. Бюл. №11.
7. Пат. 2465748 РФ. Электродуговой плазматрон / Мchedaлов С.Г. Опубл. 27.10.2012. Бюл. № 30.
8. Доманов В.И. Влияние случайных факторов на работу системы регулирования тока дуговой плавильной установки // Приводная техника. 2010. №6. С. 16–19.
9. Разработка и исследование систем управления током электрической дуги / В.И. Доманов, А.В. Доманов, К.Е. Карпунин и др. Ульяновск: Изд-во УлГТУ, 2018. 242 с.
10. Петров С. Методы регулирования и стабилизации тока нагрузки сварочных инверторов // Силовая электроника. 2008. №4. С. 67–73.
11. Ключев В. И. Теория электропривода: учебник для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 2001. 704 с.

Поступила в редакцию 23 мая 2019 г.

INFORMATION IN ENGLISH

CAPACITIVE-SWITCHED SYSTEM OF CURRENT STABILIZING FOR ELECTRIC ARC PLANT

Victor N. Meshcheryakov

D.Sc. (Engineering), Professor, Head of the Electric Drive Department, Faculty of Automation and Computer Science, Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia. E-mail: mesherek@stu.lipetsk.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0984-5133>.

Alexei M. Evseev

Teaching Assistant, Electric Drive Department, Faculty of Automation and Computer Science, Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia. E-mail: alexevs94@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0687-7383>.

Olga V. Danilova

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Electric Drive Department, Faculty of Automation and Computer Science, Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia. E-mail: kaf-ep@stu.lipetsk.ru.

Denis V. Lastochkin

Postgraduate Student, Electric Drive Department, Faculty of Automation and Computer Science, Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia. E-mail: kaf-ep@stu.lipetsk.ru.

The article is concerned with a three-phase capacitive stabilizing output current device that is designed to be powered through an unregulated electric arc rectifier. The research group offered a mathematical description of the electrical system, constructed a vector diagram of a stabilizer characterizing the change in the position of the output phase voltage vectors and gave an expression to calculate the output voltage and output current when the load resistance changes.

Keywords: current stabilization, vector diagram, capacitive device, rectifier, current-voltage characteristic, electric arc plant.

REFERENCES

1. Anshakov A.S., Urbakh E.K., Urbakh A.E., Faleev V.A. Processing of industrial wastes in electric-arc plasma. *Alternativnaya energetika i ekologiya* [International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology], 2008, no. 9(65), pp. 131–135. (In Russian).
2. Lukashov V.P., Vashchenko S.P. and etc. Plasma-Thermal Processing of Solid Waste Products. *Ekologiya i promyshlennost Rossii* [Ecology and Industry of Russia], 2005, no. 11, pp. 4-9. (In Russian).
3. Cherednichenko V.S., Anshakov A.S., Kuzmin M.G. *Plazmennye elektrotekhnologicheskie ustanovki* [Plasma Electro technological Plants]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2011, 600 p. (In Russian).
4. Anshakov A.S., Cherednichenko V.S., Urbakh E.K. et al. The treatment of mixed wastes using the thermal plasma. *Progress in Plasma Processing of Materials*, Begell House, Inc., 1999, pp. 737-743.
5. Zhukov M.F., Lytkin A.Ya., Khudyakov G.N., Anshakov A.S. *Elektrodugovoy nagrevatel gaza postoyannogo toka* [DC electric arc gas heater]. Certificate of authorship USSR, no. 599732, 1982.
6. Meshcheryakov V.N., Evseev A.M., Pikalov V.V., Chuprov V.B., Konev V.A. *Elektrodugovoy plazmotron* [Electric arc plasmatron]. Patent RF, no. 188618, 2019.
7. Mchedalov S.G. *Elektrodugovoy plazmotron* [Electric arc plasmatron]. Patent RF, no. 2465748, 2012.
8. Domanov V.I. Influence of random factors on the operation of the current control system of an arc smelter. *Privodnaya tekhnika* [Drive technologies], 2019, no. 6, pp. 16-19. (In Russian)
9. Domanov V.I., Domanov A.V., Karpuchin K.E. and etc. *Razrabotka i issledovanie sistem upravleniya tokom ehlektricheskoy dugi* [Development and research of electric arc current control systems]. Ulyanovsk: UISTU Publ., 2018, 242 p. (In Russian)
10. Petrov S. Methods of regulation and stabilization of the load current of welding inverters. *Silovaya elektronika* [Power electronics], 2008, no. 18, pp. 67-73. (In Russian)
11. Klyuchev V.I. *Teoriya elektroprivoda* [Electric drive theory]. Moscow: Energoatomizdat Publ., 2001. 704 p. (In Russian)

Мещеряков В.Н., Евсеев А.М., Данилова О.В., Ласточкин Д.В. Вентильно-емкостная система стабилизации тока для электродуговой установки // Электротехнические системы и комплексы. 2019. № 3(44). С. 63-67. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-3\(44\)-63-67](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-3(44)-63-67)

Meshcheryakov V.N., Evseev A.M., Danilova O.V., Lastochkin D.V. Capacitive-Switched System of Current Stabilizing for Electric Arc Plant. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2019, no. 3(44), pp. 63-67. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-3\(44\)-63-67](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-3(44)-63-67)

¹Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова²АО «Магнитогорский Гипромет»³АО «Магнитогорский Граждан Проект»

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ МЕСТА УСТАНОВКИ ИСТОЧНИКОВ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ

В статье предлагается подход по определению оптимального места расположения источников распределенной генерации в условиях систем электроснабжения. Разработка подхода обусловлена необходимостью повышения эффективности функционирования существующих и вводимых в эксплуатацию объектов электроэнергетики. В работе отражена методика, позволяющая на этапе проектирования новой или реконструкции существующей электрической сети осуществлять поиск экономически целесообразного места установки источников электрической и тепловой энергии в зависимости от их мощности и удаленности от потребителей. Критерием оптимальности является минимум затрат на передачу мощности в сети. Алгоритм реализован с использованием метода прямого перебора. Учитываются ограничения по пропускной способности отдельных элементов системы электроснабжения (линии электропередачи, трансформаторы) и допустимой потере напряжения в ее узлах. Методика адаптирована к условиям программно-вычислительного комплекса «КАТРАН-OptActivePower». Определение затрат на потери мощности в сети осуществляется с использованием модифицированного метода динамического программирования в сочетании с методом последовательного эквивалентирования. В качестве исходных данных для расчета используются технико-экономические модели генераторов, представляющие собой зависимость мощности от себестоимости тонны свежего пара, необходимого на выработку тепловой и электрической энергии, для источников тепловых электростанций, и зависимость мощности от затрат на используемый энергоноситель - для газотурбинных, парогазовых и газопоршневых установок. Модели учитывают эксплуатационные характеристики источников энергии и представляются в табличной форме. В статье приводится расчет по оценке оптимального места установки генераторов в условиях действующей системы электроснабжения, по критерию минимума затрат на потери активной мощности.

Ключевые слова: электрическая сеть, система электроснабжения, распределенная генерация, газотурбинная установка, парогазовая установка, технико-экономические показатели, затраты, потери мощности, тариф на электроэнергию.

ВВЕДЕНИЕ

Современные темпы строительства и введения в эксплуатацию объектов электроэнергетики ставят вопросы необходимости разработки подходов, позволяющих эффективно их проектировать и управлять. С этой целью используются методы оптимизации, позволяющие решать задачи повышения эффективности работы электроустановок на стадии их проектирования и эксплуатации [1].

Вопросы оптимизации работы электроустановок решаются и для гидроэлектростанций [2], и для атомных электростанций [3], и для тепловых [4]. Исследуются проблемы не только распределения активной и тепловой мощности между агрегатами [5], но и распределения реактивной мощности [6]. При этом используются различные методы оптимизации: метод динамического программирования [5], нечеткий адаптивный генетический алгоритм [6] и др. [1].

В научных статьях уделяется также внимание работе источников распределенной генерации в небольших системах электроснабжения [7].

В связи с ускорением строительства новых жилых, промышленных, сельскохозяйственных объектов остро встают вопросы их подключения к энергосистеме. В настоящее время данную проблему в основном решают путем строительства источников распределенной генерации [8]. Питание удаленных потребителей также осуществляется за счет введения в эксплуатацию данных электроустановок [9].

Внедрение таких объектов влечет за собой проведение исследований, посвященных повышению эффективности их работы за счет определения экономически целесообразного размещения [10], выбора числа и мощности генераторов [11], расчета параметров режима систем электроснабжения [12].

Рассматриваются особенности режимов работы электрических сетей с источниками распределенной генерации [13, 14] в условиях промышленных энергорайонов.

На стадии проектирования объектов необходимо осуществлять оценку эффективности их внедрения. В работе [15] предлагается модель, позволяющая определять экономические показатели и осуществлять технико-экономическое обоснование внедрения объектов распределенной генерации.

Предлагаемый подход в [16] обеспечит надежность энергоснабжения, снизит потери энергии в распределительных сетях, особенно если потребитель находится на значительном расстоянии от источника генерации. В результате эффективного распределения мощности между генераторами в энергосистеме значение потерь оптимизируется, и, как следствие, минимизируются расходы топлива на ТЭС.

Рассматриваемые электроустановки нашли широкое применение в условиях сельскохозяйственных объектов [17] и на промышленных предприятиях [18].

Таким образом, вопросам оптимизации режимов работы объектов электроэнергетики и, в частности, источников распределенной генерации, посвящено большое число работ.

В данной статье авторами предлагается подход, позволяющий определять оптимальное месторасположение объектов распределенной генерации с использованием программного продукта КАТРАН-OptActivePower.

Применение разработанной методики позволит снизить затраты на передачу мощности в распределительной сети и повысить эффективность использования источников электрической и тепловой мощности.

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО МЕСТА РАЗМЕЩЕНИЯ ИСТОЧНИКОВ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ

В данной работе предлагается осуществить расчет оптимального месторасположения генераторов с использованием метода прямого перебора. Методика реализована в программном комплексе КАТРАН - OrtActivePower [19].

Место размещения источников распределенной генерации определяется по критерию минимума затрат на потери мощности в сети

$$C(\Delta W_{\text{ЛЭП}}) = \Delta W_{\text{ЛЭП}} \beta = \Delta P_{\text{ЛЭП}} \tau \beta \rightarrow \min, \quad (1)$$

где C – стоимость потерь, руб./кВт·ч; $\Delta W_{\text{ЛЭП}}$ – потери электроэнергии в ЛЭП, кВт·ч; $\Delta P_{\text{ЛЭП}}$ – потери активной мощности в ЛЭП, кВт; β – тариф на электроэнергию, руб./кВт·ч; τ – время наибольших потерь, ч.

При расчете учитывается условие

$$\sum P_{\text{ист}} = P_{\text{необходимое}}, \quad (2)$$

где $\sum P_{\text{ист}}$ – суммарная мощность источников распределенной генерации, МВт; $P_{\text{необходимое}}$ – необходимая величина мощности источников распределенной генерации, МВт.

На целевую функцию накладываются режимные ограничения:

$$\begin{cases} U_{i \min} \leq U_i \leq U_{i \max}; \\ S_{i \min} \leq S_i \leq S_{i \max}, \end{cases} \quad (3)$$

где $U_{i \min}$, $U_{i \max}$ – предельно допустимые потери напряжения в узле ($\pm 10\%$ от номинального значения), кВ; $S_{i \min}$, $S_{i \max}$ – минимально и максимально допустимое значение мощности, протекающей по элементам электрической сети, определяется нагрузочной способностью объекта, МВА.

В качестве исходных данных для расчета используются технико-экономические модели источников распределенной генерации: для газотурбинных, парогазовых и газопоршневых установок методика построения указанных моделей приведена в [20], для тепловых генераторов в [21]. В общем случае данные модели представляют собой зависимость мощности на клеммах генератора от единицы расхода используемого энергоносителя. Для турбогенераторов это пар, при этом методика расчета его себестоимости приведена в [22], для ГТУ, ПГУ, ГПУ это используемый газ (в основном природный газ).

Алгоритм позволяет определить оптимальное место установки источников при их заданном числе и мощности и возможных местах установки.

Число возможных вариантов расстановки источников определяется по выражению

$$n = \frac{m!}{(m-k)!}, \quad (4)$$

где n – возможное количество вариантов схем; m – заданное число мест установки источников распределенной генерации; k – число источников распределенной генерации.

Алгоритм расчета приведен на рис. 1.



Рис. 1. Блок-схема методики определения экономически целесообразного места размещения источников распределенной генерации

Результатом работы алгоритма являются рекомендации по оптимальному расположению генераторов в системе электроснабжения и вывод технико-экономических показателей: затрат на передачу мощности в сети, потери активной мощности в сети.

ПРИМЕР РАСЧЕТА

В условиях действующей системы электроснабжения (рис. 2) необходимо осуществить расстановку генераторов по критерию минимума затрат на передачу мощности.

Необходимо установить 3 когенерационные энергетические установки с двумя газопоршневыми генераторами по 10, 12 и 15 МВт и двумя котлами-утилизаторами. Предполагается установка источников распределенной генерации около подстанций №16, 11, 9. С использованием разработанной методики получены следующие результаты (см. таблицу). Число возможных вариантов согласно (4) равно 6.

В результате анализа полученных данных можно сделать вывод, что наиболее лучший вариант будет при

установке генераторов суммарной мощностью 12 МВт

на ПС№9, 10 МВт - ПС №11 и 15 МВт – ПС №16.

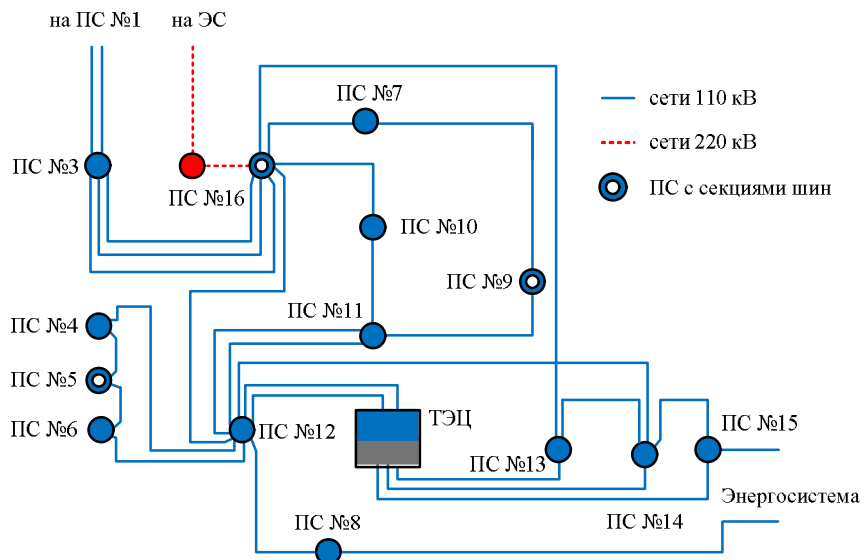


Рис. 2. Упрощенная схема рассматриваемого энергоузла

Таблица
Результаты расчета возможных мест расположения
когенерационных установок

Схема ввода, МВт			ΔР, МВт·год	Зпередат., млн.руб./год
ПС№9	ПС№11	ПС№16		
10	12	15	112128	316,186
10	15	12	106258,8	299,727
12	10	15	98112	312,128
12	15	10	110726,4	276,577
15	10	12	116858,4	425,178
15	12	10	117748,4	475,98

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методика определения экономически целесообразного места установки источников распределенной генерации позволит снизить потери мощности в распределительных сетях и тем самым повысить эффективность их работы. Разработанный подход предполагается для использования на стадии проектирования при реконструкции существующих объектов или введение в эксплуатацию новых объектов. Полученный подход позволяет учесть особенности работы генераторов тепловых электростанций.

Результаты работы предназначены для проектных организаций, а также для отделов планирования энергохозяйством крупных промышленных или городских систем электроснабжения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Варганова А.В. О методах оптимизации режимов работы электроэнергетических систем и сетей // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2017. Т. 17. № 3. С. 76-85.
- Sovban E. A., Filippova T. A., Pantelev V. I. and Trufakin S.S. "The Features of Mathematical Optimization Models of Modes Hydro-Power Stations," 2018 XIV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE), Novosibirsk, 2018, pp. 428-432.
- Zhang S. et al. "Compilation and optimization of nuclear power plant preventive maintenance program," 2013 International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering (QR2MSE), Chengdu, 2013, pp. 748-753.
- Li Y. and Li R. "Simulation and Optimization of the Power

Station Coal-Fired Logistics System Based on Witness Simulation Software," 2008 Workshop on Power Electronics and Intelligent Transportation System, Guangzhou, 2008, pp. 394-398.

- Варганова А.В. Алгоритм внутриванционной оптимизации режимов работы котлоагрегатов и турбогенераторов промышленных электростанций // Промышленная энергетика. 2018. № 1. С. 17-22.
- Li X. "Application of Fuzzy Adaptive Genetic Algorithm in Reactive Power Compensation Optimization of Power Station," 2011 International Symposium on Computer Science and Society, Kota Kinabalu, 2011, pp. 214-217.
- Dzobo O. "Virtual power plant energy optimisation in smart grids," 2019 Southern African Universities Power Engineering Conference/Robotics and Mechatronics/Pattern Recognition Association of South Africa (SAUPEC/RobMech/PRASA), Bloemfontein, South Africa, 2019, pp. 714-718.
- Краснов А.В., Шакирзянов И.В. Развитие малой энергетики на предприятиях агропромышленного комплекса // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. 2014. №2. С.82-84.
- Нефедова Л.В., Соловьев А.А. Новые вызовы и риски на пути развития распределенной энергогенерации в арктическом регионе России // Энергетическая политика. 2018. №4. С.99-108.
- Оптимизация местоположения и мощности малой генерации в распределительных сетях / С.А. Ерошенко, А.А. Карпенко, С.Е. Кокин, А.В. Паздерин // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2012. №1-2. С.82-89.
- Ахтулов А.Л., Леонов Е.Н., Федоров В.К. Методика оптимального выбора источников энергии в электротехнических системах с распределенной генерацией // Динамика систем, механизмов и машин. 2016. №1. С.20-25.
- Тарасенко В.В. Алгоритмизация расчетов электрических сетей с распределенной генерацией // 63-я научная конференция «Наука ЮУрГУ». Секция технических наук. Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2011. С. 238-242.
- Погодин А.А. Распределенная генерация в схемах электроснабжения промышленного производства // Ростовский научный журнал. 2018. №12. С.374-381.
- Илюшин П.В. Анализ особенностей сетей внутреннего электроснабжения промышленных предприятий с объектами распределенной генерации // Энергетик. 2016. №12. С. 21-25.
- Ерошенко С.А. Модель интеллектуальной системы оценки эффективности внедрения объектов распреде-

- лённой генерации // Материалы VIII Международной научно-технической конференции. 2017. С. 41-44.
16. Рига И.Л., Иваненко Ю.П. Оценка эффективности использования объектов малой генерации вблизи потребителя электрической энергии // Радиотехника, электротехника и энергетика. 2017. С.385.
 17. Сухов А.А., Стушкина Н.А. Модернизация систем электроснабжения сельских потребителей путем внедрения распределенной генерации // Вестник федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет им. В.П. Горячкина». 2018. №5(87). С.69-74.
 18. Кочкина А.В., Варганов Д.Е., Ковалев А.Д., Малафеев А.В. Оптимизация распределения активных мощностей между разнородными генерирующими источниками в системе электроснабжения промышленного предприятия // Электротехника глазами молодежи: III Международная научно-техническая конференция: сб. докл. 2012. С. 280-284.
 19. А.с. 2019618397 Российская Федерация. КАТРАН-OptActivePower / Варганова А.В., Малафеев А.В.; заявитель ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». № 2019616954; заявл. 07.06.2019; опубл. 01.07.19.
 20. Варганов Д.Е., Варганова А.В., Баранкова И.И. Применение экономико-математических моделей газопоршневых установок с целью повышения эффективности работы энергоузелов с источниками распределенной генерации // Электротехнические системы и комплексы. 2016. №4(33). С. 29-34.
 21. Малафеев А.В., Игуменцев В.А., Хламова А.В. Получение экономико-математических моделей турбогенераторов промышленных электростанций с целью оптимизации режима системы электроснабжения // Электротехнические комплексы и системы управления. 2009. №4. С. 34-38.
 22. Варганов Д.Е., Варганова А.В. Расчет себестоимости свежего пара на крупных тепловых промышленных электростанциях // Электротехнические системы и комплексы. 2016. № 1 (30). С. 24-28.

Поступила в редакцию 23 июля 2019 г.

INFORMATION IN ENGLISH

TECHNICAL AND ECONOMIC SUBSTANTIATION OF THE PLACE OF INSTALLATION OF SOURCES OF DISTRIBUTED GENERATION

Aleksandra V. Varganova

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Department of Electric Power Supply of Industrial Enterprises, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: aleksandra-khlamova@yandex.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4675-7511>

Julia M. Bayramgulova

Engineer, Joint-stock company «Magnitogorskij Grazhdan Proekt», Magnitogorsk, Russia. E-mail: Luiza-marsovna@ya.ru.

Irina N. Goncharova

Engineer, Joint-stock company «Magnitogorskij Gipromet», Magnitogorsk, Russia. E-mail: irina_goncharova_2018@mail.ru.

Olga A. Krotkova

Master's degree student, Department of Electric Power Supply of Industrial Enterprises, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

The article proposes an approach to determine the optimal location of distributed generation sources in the power supply systems. The development of the approach is due to the need to increase the operating efficiency of existing and commissioned electric power facilities. The work reflects a technique that makes it possible, at the stage of designing a new or reconstruction of an existing electric network, to search for an economically feasible installation site for electric and thermal energy sources depending on their capacity and distance from consumers. The criterion of optimality is the minimum cost of power transmission in the network. The algorithm is implemented using the direct enumeration method. The restrictions on the throughput of individual elements of the power supply system (power lines, transformers) and the allowable voltage loss in its nodes are taken into account. The technique is adapted to the conditions of the KATRAN-OptActivePower software and computer complex. The determination of the cost of power loss in the network is determined using a modified dynamic programming method in combination with the sequential equivalentization method. For the initial data for the calculation, technical and economic models of generators are used, which are the dependence of power on the cost per ton of fresh steam needed to generate thermal and electric energy for sources of thermal power plants, and the dependence of power on the cost of the energy source used for gas turbine, combined-cycle and gas piston units. The models take into account

the operational characteristics of energy sources and are presented in the tabular form. The article provides calculations to assess the optimal installation location of generators in the conditions of the current power supply system according to the criterion of the minimum cost of active power loss.

Keywords: electric network, power supply system, distributed generation, gas turbine installation, combined-cycle plant, technical and economic indicators, costs, power losses, electricity tariff.

REFERENCES

1. Varganova A.V. About Optimization Methods of Power Supply System and Network Modes. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seria: Energetika* [Bulletin of South Ural State University. Series "Power Engineering"], 2017, vol. 17, no. 3, pp. 76-85. (In Russian)
2. Sovban E. A., Filippova T. A., Panteleev V. I. and Trufakin S.S. "The Features of Mathematical Optimization Models of Modes Hydro-Power Stations," 2018 XIV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE), Novosibirsk, 2018, pp. 428-432.
3. Zhang S. et al. "Compilation and optimization of nuclear power plant preventive maintenance program," 2013 International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance

- nance, and Safety Engineering (QR2MSE), Chengdu, 2013, pp. 748-753.
4. Li Y. and Li R. "Simulation and Optimization of the Power Station Coal-Fired Logistics System Based on Witness Simulation Software," 2008 Workshop on Power Electronics and Intelligent Transportation System, Guangzhou, 2008, pp. 394-398.
 5. Varganova A.V. Algorithm of the Intra-Station Unit Optimization of Operating Modes of Boiler Units and Turbo Generators for Industrial Power Plants. *Promyshlennaya teploenergetika* [Industrial Heat Power Engineering], 2018, no. 1, pp. 17-22. (In Russian)
 6. Li X. "Application of Fuzzy Adaptive Genetic Algorithm in Reactive Power Compensation Optimization of Power Station," 2011 International Symposium on Computer Science and Society, Kota Kinabalu, 2011, pp. 214-217.
 7. Dzobo O. "Virtual power plant energy optimisation in smart grids," 2019 Southern African Universities Power Engineering Conference/Robotics and Mechatronics/Pattern Recognition Association of South Africa (SAUPEC/RobMech/PRASA), Bloemfontein, South Africa, 2019, pp. 714-718.
 8. Krasnov A.V., Shakirzyanov I.V. The development of small energy at enterprises of the agroindustrial complex electronic. *Vestnik Bashkirskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Bulletin of the Bashkir State Agrarian University], 2014, no. 2, pp. 82-84. (In Russian)
 9. Nefedova L.V., Solov'ev A.A. New challenges and risks in the development of distributed energy generation in the Arctic region of Russia. *Energeticheskaya politika* [Energy policy], 2018, no. 4, pp. 99-108. (In Russian)
 10. Eroshenko S.A., Karpenko A.A., Kokin S.E., Pazderin A.V. Optimization of location and power of small generation in distribution networks. *Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenij. Problemy energetiki* [Proceedings of Universities. Power engineering issues], 2012, no. 1-2, pp. 82-89. (In Russian)
 11. Akhtulov A.L., Leonov E.N., Fedorov V.K. Methodology of the optimal choice of energy sources in electrotechnical systems with distributed generation. *Dinamika sistem, mekhanizm i mashin* [Dynamics of systems, mechanisms and machines.], 2016, no. 1, pp. 20-25. (In Russian)
 12. Tarasenko V.V. Algorithmization of calculations of electric networks with distributed generation. *63-ya nauchnaya konferenciya «Nauka YUUrGU». Sekciya tekhnicheskikh nauk* [63rd Scientific Conference "Science of SUSU". Section of Technical Sciences], Chelyabinsk, 2011, pp. 238-242. (In Russian)
 13. Pogodin A.A. Distributed Generation in Power Supply Schemes for Industrial Production. *Rostovskij nauchnyj zhurnal* [Rostov Scientific Journal], 2018, no. 12, pp. 374-381. (In Russian)
 14. Ilyushin P.V. Analysis of the peculiarities of internal power supply networks of industrial enterprises with distributed generation facilities. *Energetik* [Power engineer], 2016, no. 12, pp. 21-25. (In Russian)
 15. Eroshenko S.A. A model of an intellectual system for assessing the effectiveness of the implementation of distributed generation facilities. *Materialy VIII Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii*. [Materials of the VIII International Scientific and Technical Conference], 2017, pp. 41-44. (In Russian)
 16. Riga I.L., Ivanenko YU.P. Evaluation of efficiency of using small generation facilities near an electric energy consumer. *Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenij. Problemy energetiki* [Proceedings of Universities. Radio electronics, electrical engineering and energy issues], 2017, pp. 385. (In Russian)
 17. Sukhov A.A., Stushkina N.A. Modernization of power supply systems for rural consumers through the introduction of distributed generation. *Vestnik federal'nogo gosudarstvennogo obrazovatel'nogo uchrezhdeniya vysshego professional'nogo obrazovaniya «Moskovskij gosudarstvennyj agroinzhenernyj universitet im. V.P. Goryachkina»* [Bulletin of the Federal State Educational Institution of Higher Professional Education "Moscow State Agroengineering University named after V.P. Goryachkin"], 2018, no. 5(87), pp. 69-74. (In Russian)
 18. Kochkina A.V., Varganov D.E., Kovalev A.D., Malafeev A.V. Optimization of Distribution of Active Power Between Generating Sources in the Power Supply System of an Industrial Enterprise. *Elektroenergetika glazami molodezhi III Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya* [Electric power engineering through the eyes of the youth III International Scientific and Technical Conference: a collection of reports], 2012, pp. 280-284. (In Russian)
 19. Varganova A.V., Malafeev A.V. KATRAN-OptActivePower [KATRAN-OptActivePower]. Software RF, no. 2019618397, 2019.
 20. Varganov D.E., Varganova A.V., Barankova I.I. Application of Econometric Models of Gas Piston Plants in Order to Increase the Efficiency of Power Unit with Distributed Generation Sources. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical systems and complexes], 2016, no. 4 (33), pp. 29-34. (In Russian)
 21. Malafeev A.V., Igumenshchev V.A., Khlamova A.V. Obtaining Economic and Mathematical Models of Turbogenerators of Industrial Power Plants in Order to Optimize the Mode of the Power Supply System. *Elektrotekhnicheskie komplekсы i sistemy upravleniya* [Electrotechnical complexes and control systems], 2009, no. 4, pp. 34-38. (In Russian)
 22. Varganov D.E., Varganova A.V. Cost Calculation of Working Steam in Terms of Industrial Thermal Power Stations. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical systems and complexes], 2016, no. 1 (30), pp. 24-28. (In Russian)

Варганова А.В., Байрамгулова Ю.М., Гончарова И.Н., Кроткова О.А. Технико-экономическое обоснование места установки источников распределенной генерации // *Электротехнические системы и комплексы*. 2019. № 3(44). С. 68-72. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-3\(44\)-68-72](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-3(44)-68-72)

Varganova A.V., Bayramgulova Ju.M., Goncharova I.N., Krotkova O.A. Technical and Economic Substantiation of the Place of Installation of Sources of Distributed Generation. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2019, no. 3(44), pp. 68-72. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-3\(44\)-68-72](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-3(44)-68-72)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Байрамгулова Юлия Марсовна – инженер, АО «Магнитогорский Граждан Проект», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: Luiza-marsova@ya.ru.

Баранкова Инна Ильинична – д-р техн. наук, доцент, заведующая кафедрой, кафедра информатики и информационной безопасности, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия. E-mail: Inna_Barankova@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6077-6164>

Бартоломей Петр Иванович – д-р техн. наук, профессор, кафедра автоматизированных электрических систем, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия. E-mail: bpi@ural.ru.

Варганова Александра Владимировна – канд. техн. наук, доцент, кафедра электроснабжения промышленных предприятий, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия. E-mail: aleksandra-khlamova@yandex.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4675-7511>

Володин Евгений Вячеславович – магистрант, Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, Россия. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9081-8660>

Гасияров Вадим Рашитович – канд. техн. наук, заведующий кафедрой, кафедра 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>.

Гончарова Ирина Николаевна – инженер, АО «Магнитогорский Гипромет», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: irina_goncharova_2018@mail.ru.

Данилова Ольга Викторовна – канд. техн. наук, доцент, факультет автоматизации и информатики, Липецкий государственный технический университет, г. Липецк, Россия. E-mail: kaf-ep@stu.lipetsk.ru.

Евсеев Алексей Михайлович – ассистент, кафедра электропривода, факультет автоматизации и информатики, Липецкий государственный технический университет, г. Липецк, Россия. E-mail: alexevs94@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0687-7383>

Ивекеев Владимир Сергеевич – аспирант, кафедра автоматизированного электропривода и мехатроники, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия. E-mail: vivekeev@yandex.ru.

Карякин Александр Ливиевич – д-р техн. наук, старший научный сотрудник, заведующий кафедрой, кафедра электрификации горных предприятий, Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Россия.

Корнилов Геннадий Петрович – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой, кафедра электроснабжения промышленных предприятий, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия. E-mail: Korn_mgn@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2451-3850>

Красильников Сергей Сергеевич – канд. техн. наук, инженер, ООО «ММК-информсервис», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: krasilnikov.ss@yandex.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3131-7193>

Кроткова Ольга Анатольевна – магистрант, кафедра электроснабжения промышленных предприятий, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия.

Кушмилев Олег Евгеньевич – магистрант, кафедра электроснабжения промышленных предприятий, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6482-0751>

Ласточкин Денис Владимирович – аспирант, кафедра электропривода, факультет автоматизации и информатики, Липецкий государственный технический университет, г. Липецк, Россия. E-mail: kaf-ep@stu.lipetsk.ru

Ложкин Игорь Александрович – аспирант, кафедра автоматизированного электропривода и мехатроники, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия. E-mail: igor-yoha@ya.ru.

Лукьянов Георгий Игоревич – аспирант, кафедра информатики и информационной безопасности, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия. E-mail: decorsi@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7010-2243>

Лукьянов Сергей Иванович – д-р техн. наук, профессор, директор, институт энергетики и автоматизированных систем, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия. E-mail: ieiac@magtu.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4685-7627>

Мещеряков Виктор Николаевич – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой электропривода, факультет автоматизации и информатики, Липецкий государственный технический университет, г. Липецк, Россия. E-mail: mesherek@stu.lipetsk.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0984-5133>

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

Осипов Олег Иванович – д-р техн. наук, профессор, кафедра автоматизированного электропривода, Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, Россия.

Паздерин Андрей Андреевич – соискатель, кафедра автоматизированных электрических систем, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия. E-mail: paa_83@mail.ru.

Панарина Мария Сергеевна – магистрант, кафедра электроснабжения промышленных предприятий, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6424-1506>

Патшин Николай Трофимович – канд. техн. наук, доцент, кафедра электроснабжения промышленных предприятий, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия.

Пишнограев Роман Сергеевич – канд. техн. наук, ведущий инженер, ООО «Техноап Инжиниринг», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: rspishnograev@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8854-5723>

Федорова Светлана Владимировна – канд. техн. наук, доцент, заведующая кафедрой, кафедра энергетики, Технический университет УГМК, г. Верхняя Пышма, Россия. E-mail: s.fedorova@ugmk.com.

Швидченко Дмитрий Владимирович – канд. техн. наук, заместитель директора, ООО «Техноап Инжиниринг», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: schvidmit@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1932-9239>

Швидченко Николай Владимирович – канд. техн. наук, доцент, кафедра электроники и микроэлектроники, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия. E-mail: n.shvidchenko@magtu.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3917-9218>

Шеметов Андрей Николаевич – канд. техн. наук, доцент, начальник информационно-аналитического отдела, управление стратегического планирования, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия. E-mail: a.shemetov@magtu.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7184-219>

Уважаемые коллеги!

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

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

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

С 26.03.2019 журнал входит в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук по следующим научным специальностям:

05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты (технические науки);

05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы (технические науки);

05.09.10 – Электротехнология (технические науки);

05.09.12 – Силовая электроника (технические науки);

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

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

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

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

05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы (технические науки)

05.14.04 – Промышленная теплоэнергетика (технические науки).

Журнал публикует научные работы по следующим рубрикам:

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

Публикация статей является бесплатной.

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

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

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

Пакет подаваемых документов:

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



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



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

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

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



Перечень направлений подготовки в рамках НОЦ для бакалавров и магистрантов:

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

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

- системы управления электроприводами на базе преобразователей частоты ATV32, ATV71 и ATV93 и библиотеки SoMove;
- примеры архитектур локальной 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.