

ЭлСиК

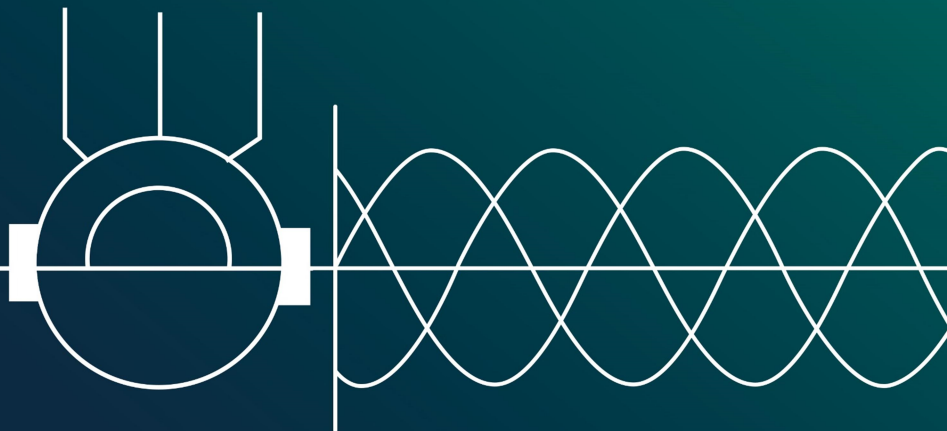
ISSN 2311-8318

ISSN (online) 2658-3151

ЭЛЕКТРО- ТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

№ 1(50)

2021 г.



Уважаемые коллеги!

Приглашаем Вас принять участие в научном семинаре аспирантов «Электротехнические комплексы и системы автоматизации в металлургии» (IEEE Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice).

Данный научный семинар будет проводиться в очной форме **24-26 сентября 2021 года** на базе УОЦ «Юность» ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова» (оз. Банное, 40 км от г. Магнитогорска). Рабочий язык семинара – русский и английский. Приём докладов проводится до **30 июня 2021 года**.

Размер организационного взноса 7300 руб., для студентов и аспирантов - бесплатно. Проезд, проживание и питание оплачиваются участниками самостоятельно.

Тематические секции семинара:

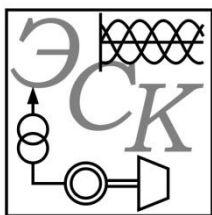
1. Автоматизированный электропривод.
2. Автоматизация и управление технологическими процессами.
3. Силовая электроника.
4. Электрические машины.
5. Системы электроснабжения.
6. Возобновляемая энергетика.

Труды семинара будут опубликованы в виде полных статей:

- статьи, представленные на английском языке и принятые Программным комитетом, публикуются в сборнике трудов семинара, размещаемом в цифровой библиотеке "IEEE Xplore". Издание индексируется наукометрической базой Scopus;

- статьи, представленные на русском языке, отбираются Программным комитетом для публикации в одном из следующих журналов, индексируемых наукометрической базой РИНЦ: 1) входящий в перечень ВАК "Вестник ЮУрГУ. Серия Энергетика", издаваемый ЮУрГУ; 2) входящий в перечень ВАК "Электротехнические системы и комплексы", издаваемый МГТУ; 3) "Электротехника: сетевой электронный научный журнал" или "Машиностроение: сетевой электронный научный журнал", издаваемые Южно-Уральской группой IEEE.

Подробную информацию о научном семинаре, а также шаблон для оформления докладов семинара Вы можете найти на официальном сайте научного семинара **peami.su-ieee.ru**.



ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

ИЗДАЕТСЯ С ЯНВАРЯ 1996 Г.

№ 1(50), МАРТ 2021

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

Редакционная коллегия

Председатель редакционной коллегии:

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

Главный редактор:

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

Ответственный редактор:

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

Секция теории и практики автоматизированного электропривода:

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

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

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

Секция электро- и теплоэнергетики:

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

Е.Г. Нешпоренко – доц., канд. техн. наук,
МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия;

Н.Ф. Джазаров – проф., д-р техн. наук,
Высшее военно-морское училище
им. Николая 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. Андришин – 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., д-р техн. наук,
МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия;

Е.Н. Ишиметьев – д-р техн. наук,
R&D МГТУ, г. Магнитогорск, Россия.

Секция электротехнологий в промышленности:

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

А.Л. Карякин – с.н.с., д-р техн. наук,
УГГУ, 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,
ЮУрГУ (НИУ), г. Челябинск, Россия;

И.М. Ячиков – проф., д-р техн. наук,
ЮУрГУ (НИУ), г. Челябинск, Россия.

Технические редакторы:

Н.П. Болрова – 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», 2021

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

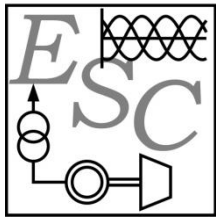
Адрес издателя:

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. К. Маркса, 45/1,
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»
участок оперативной полиграфии.

Выход в свет 26.03.2021. Заказ 73. Тираж 500 экз.
Цена свободная.



ELECTROTECHNICAL SYSTEMS AND COMPLEXES

PUBLISHED SINCE JAN., 1996

NO. 1(50), MAR., 2021

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), Novocheerkassk,
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.G. Neshporenko – Associate Professor, Ph.D.
(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, D.Sc.
(Engineering), NMSTU, Magnitogorsk, Russia;

E.N. Ishmet'ev – D.Sc. (Engineering),
of R&D NMSTU, 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),
SUSU (NRU), Chelyabinsk, Russia;

I.M. Yachikov – Professor, D.Sc. (Engineering),
SUSU (NRU), Chelyabinsk, Russia.

Technical Editors:

N.P. Boyarova – NMSTU, Magnitogorsk, Russia;

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

© FSBEI HE NMSTU, 2021

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: 26.03.2021. Order 73. Circulation: 500.
Open price.

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ	4
<i>Богачков И.М.</i>	
Математические модели расчета оптимального напряжения системы внешнего электроснабжения газовых месторождений, полученные с применением теории планирования эксперимента	4
<i>Арсентьев Г.О., Арсентьев О.В., Крюков А.В.</i>	
Применение энергетических роутеров в электротехнических комплексах железных дорог переменного тока.....	10
<i>Безъязычный В.С., Троицкий А.И.</i>	
Исследование методом условно-постоянных коэффициентов модуля «трансформатор – нагрузка» с двойным приведением его параметров	16
<i>Корнилов Г.П., Газизова О.В., Абдулвелеев И.Р., Бунин А.А., Лыгин М.М.</i>	
Расширение свойств фильтрокомпенсирующих устройств в системах внутриводского электроснабжения	21
ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА	27
<i>Абузаров Т.Х.</i>	
Двойная инверторная система для питания шагового электродвигателя с уменьшенным напряжением звена постоянного тока.....	27
ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА, АВТОМАТИКА И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ	35
<i>Дунаев М.П., Довудов С.У.</i>	
Сравнение энергетических показателей импульсных преобразователей постоянного тока по результатам имитационного компьютерного моделирования	35
<i>Швидченко Н.В., Лукьянов С.И., Пишнограев Р.С., Швидченко Д.В., Красильников С.С.</i>	
Оптимизация скоростного режима отводящего рольганга стана горячей прокатки.....	42
ИНФОРМАЦИОННОЕ, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ	50
<i>Литвиненко Р.С., Аухадеев А.Э., Сафиуллин Б.И., Черепенькин И.В., Феропонтова М.В.</i>	
Методика определения интегрального показателя надежности разрабатываемой электротехнической системы	50
<i>Дьяконов Н.А., Логунова О.С.</i>	
Системы управления технологическим процессом на основе предиктивной аналитики: проектирование ..	58
СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	65

CONTENT

ELECTRIC POWER SUPPLY	4
<i>Bogachkov I.M.</i>	
Mathematical Models for Calculating the Optimal Voltage of the External Electricity Supply System for Gas Fields Obtained Using the Experiment Planning Theory	4
<i>Arsentiev G.O., Arsentiev O.V., Kryukov A.V.</i>	
Application of Energy Routers in Electrotechnical Complexes of AC Railways	10
<i>Bezyazychnyy V.S., Troitskiy A.I.</i>	
Research by the Method of Conditional Constants Coefficients of the Transformer – Load Module with Double Reduction of its Parameters	16
<i>Kornilov G.P., Gazizova O.V., Abdulveleev I.R., Bunin A.A., Lygin M.M.</i>	
Expanding the Properties of Filter Compensation Devices in Internal Factory Power Supply Systems	21
THEORY AND PRACTICE OF AUTOMATED ELECTRIC DRIVE	27
<i>Abuzarov T.H.</i>	
Dual-Inverter Feeding System for Stepper Motor Drive with Reduced DC Link Voltage.....	27
POWER ELECTRONICS, AUTOMATION AND CONTROL SYSTEMS	35
<i>Dunaev M.P., Dovudov S.U.</i>	
Comparing the Energy Performance of Pulsed DC Converters According to the Results of Computer Simulation.....	35
<i>Shvidchenko N.V., Lukyanov S.I., Pishnograev R.S., Shvidchenko D.V., Krasilnikov S.S.</i>	
Speed Rate Optimization of the Run-Out Table of a Hot Strip Mill	42
TECHNICAL SYSTEMS DATAWARE AND SOFTWARE	50
<i>Litvinenko R.S., Auhadeev A.E., Safiullin B.I., Cherepenkin I.V., Ferapontova M.V.</i>	
Method for Determining the Integral Reliability Index of the Developed Electrotechnical System	50
<i>Dyakonov N.A., Logunova O.S.</i>	
Process Control Systems Based on Predictive Analytics: Design.....	58
INFORMATION ABOUT THE AUTHORS	65

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ РАСЧЕТА ОПТИМАЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ СИСТЕМЫ ВНЕШНЕГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ, ПОЛУЧЕННЫЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕОРИИ ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

На сегодняшний день существующие системы внешнего электроснабжения газовых месторождений Западной Сибири не приспособлены к росту электрических нагрузок в 3 и 4 раза из-за ввода на завершающей стадии разработки газовых месторождений энергоемких современных технологий добычи газа (распределенное компримирование газа). Ранее проектирование системы электроснабжения газовых месторождений выполнялось без учета ввода дополнительных мощностей и это привело к серьезной реконструкции всей системы электроснабжения большинства газовых месторождений Западной Сибири, например системы электроснабжения Западно-Таркосалинского и Юбилейного месторождений газа. Главный параметр системы электроснабжения – это класс напряжения, при котором происходят передача и распределение электрической энергии. Цель данной работы – разработать математические модели расчета оптимального класса напряжения с учетом всего жизненного цикла месторождения. Для достижения поставленной цели в работе решен ряд задач: все газовые месторождения классифицированы по электрической нагрузке на три категории; определены факторы, значительно влияющие на класс напряжения; построены схемы электроснабжения для каждого сочетания факторов и класса напряжения; рассчитаны дисконтируемые затраты для каждой схемы электроснабжения; предложен вид целевой функции; определен класс напряжения с минимумом дисконтируемых затрат по интерполяционной теории Лагранжа; построены математические модели. Также в работе по полученным математическим моделям приведены результаты расчета в графическом виде оптимизации питающей линии электропередачи Медвежьего месторождения. Для решения задач в работе были использованы методы теории планирования эксперимента и методы программирования ЭВМ.

Ключевые слова: теория планирования эксперимента, класс напряжения, питающая сеть, дисконтируемые затраты, система электроснабжения, газовое месторождение, фактор.

ВВЕДЕНИЕ

Жизненный цикл месторождений газа в Западной Сибири составляет в среднем 60 лет. По уровню извлечения объема годового отбора газа жизненный цикл месторождения делится на четыре периода: нарастающая добыча, постоянная добыча, падающая добыча и ликвидация месторождения [1]. Каждый период жизненного цикла сопровождается своей технологической схемой добычи газа [2-4] с разным набором электроприемников. Поэтому в процессе жизненного цикла происходит многократный рост потребления электрической энергии.

Неправильно выбранный класс напряжения в лучшем случае приводит к увеличению потерь электроэнергии, а в худшем – к дополнительному строительству объектов энергетики (подстанций, линий электропередачи и т. п.). Так, например, на Вынгапуровском газовом месторождении потребовалось строительство 22 км воздушных линий электропередачи (ВЛ) класса напряжения 10 кВ.

Таким образом, неверно выбранный класс напряжения приводит к большим эксплуатационным и капитальным затратам, а также к недоотбору газа из пласта месторождения.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Энергосберегающая политика ПАО «Газпром» заключается в эффективном использовании энергетических ресурсов [5]. Основные газовые месторождения

Западной Сибири находятся на завершающей стадии разработки [6].

На данный момент выбор класса напряжения для передачи и распределения электроэнергии на газовых месторождениях в проектных институтах осуществляется по электрической нагрузке первого периода жизненного цикла, нагрузка последующих периодов не учитывается. В итоге это тормозит внедрение на завершающей стадии разработки месторождения современных технологий добычи газа. Таким образом, правильно выбранный класс напряжения с учетом всего жизненного цикла газового месторождения является одной из задач для достижения поставленной цели ПАО «Газпром».

В работе для разработки метода расчета оптимального напряжения использован подход с применением теории планирования эксперимента [7]. Проектирование систем электроснабжения связано с применением наилучших решений, которые определяются критерием оптимизации. Для этого необходимо выполнять большое количество расчетов с учетом ряда ограничений. Использование теории планирования эксперимента позволяет упростить поиск наилучшего решения.

Подход, использованный в данном исследовании, базируется на работах проф., д.т.н. Федорова А.А. и проф., д.т.н. Мельникова Н.А., однако имеется ряд ограничений: у газовых месторождений расстояние больше на три порядка, чем у промышленных предприятий, а нагрузка ниже на два порядка, которая кратно растет в процессе жизненного цикла месторождения.

На сегодняшний день методики выбора оптимального класса напряжения для системы электроснабжения газовых месторождений с учетом всего жизненного цикла отсутствуют. А существующие методы выбора оптимального напряжения не применимы к системе электроснабжения газовых месторождений по следующим причинам:

- в настоящее время для выполнения технико-экономических расчетов используют дисконтируемые затраты, которые позволяют учитывать капитальные вложения и изменение стоимости электроэнергии, амортизационных отчислений по годам с учетом инфляции;
- схема электроснабжения газовых месторождений – «двойная сквозная магистраль с односторонним питанием», а не «радиальная», как у промышленных предприятий;
- газовые месторождения отличаются от промышленных предприятий протяженными линиями электропередачи (площадь на два порядка больше у газовых месторождений по сравнению с промышленными предприятиями) с небольшими электрическими нагрузками (плотность электрической нагрузки у газовых месторождений на четыре порядка меньше, чем у промышленных предприятий), которые кратно растут в процессе жизненного цикла месторождения.

При проектировании систем электроснабжения газовых месторождений необходимо решать целый комплекс различных по сложности технико-экономических задач:

- выбор числа и мощности трансформаторных подстанций;
- выбор схемы электроснабжения;
- выбор местоположения подстанций и т.д.

Опыт проектирования систем электроснабжения газовых месторождений показывает, что некоторые технические решения можно принимать отдельно, но решения большинства технико-экономических задач тесно связаны между собой. Например, для размещения трансформаторных подстанций на ситуационном плане газового месторождения необходимо сначала определить число и мощность этих подстанций, выбор схемы электроснабжения, класс напряжения, а также сечение проводов линий электропередачи. Следовательно, совместное рассмотрение таких задач проектирования, как выбор оптимального напряжения для системы электроснабжения и экономически обоснованное размещение подстанций в системах электроснабжения газового месторождения, является вполне закономерным и целесообразным.

Найти оптимальный класс напряжения в системе электроснабжения газового месторождения означает найти тот класс напряжения, при котором система будет иметь минимальные дисконтируемые затраты с учетом всего жизненного цикла месторождения.

Для нахождения оптимального напряжения предлагается использовать методику, базирующуюся на том, что, на основе результатов определения дисконтируемых затрат при стандартных напряжениях,

с одной стороны, и математической интерполяционной теории Лагранжа – с другой, можно составить уравнение вида $R = f(U)$.

Электроснабжение газовых месторождений выполняется по первой категории надежности [8], наиболее распространенная схема питающей линии – «магистральная схема с двойными сквозными магистралями с односторонним питанием».

Для питающей сети в качестве объекта исследования выбрана система электроснабжения, состоящая из двух питающих воздушных линиях с трансформацией по линии. По такой схеме осуществляется питание установок комплексной подготовки газа (УКПГ) – потребителей первой категории.

По электрической мощности газовые месторождения можно разделить на малые (мощность до 7 МВт; месторождение состоит из одной УКПГ), средние (мощность от 7 до 75 МВт; месторождение состоит из пяти УКПГ) и большие (мощность свыше 75 МВт; месторождение состоит из пятнадцати УКПГ) [9].

Схема электроснабжения газового месторождения большой, средней и малой мощности представлены на рис. 1-3.

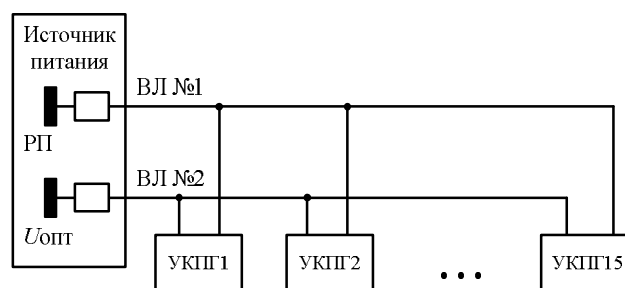


Рис. 1. Двойная сквозная магистраль с односторонним питанием. Газовое месторождение мощностью более 75 МВт

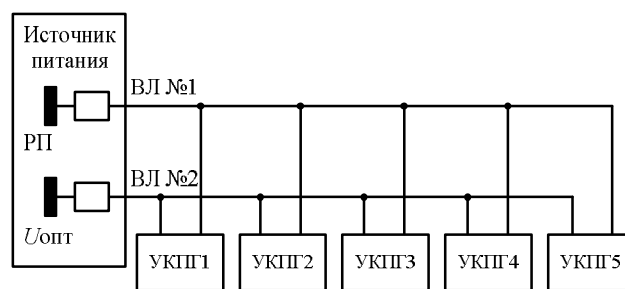


Рис. 2. Двойная сквозная магистраль с односторонним питанием. Газовое месторождение мощностью от 7 до 75 МВт

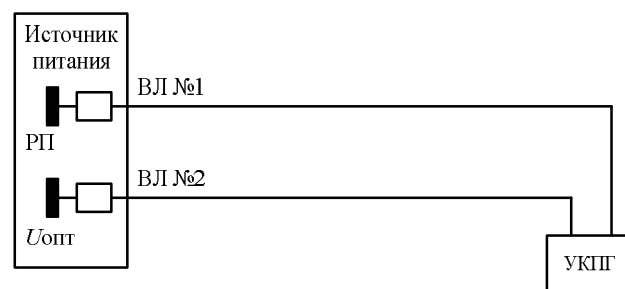


Рис. 3. Двойная сквозная магистраль с односторонним питанием. Газовое месторождение мощностью до 7 МВт

Теория планирования эксперимента

На рис. 4 представлена схема объекта исследования в работе по теории планирования эксперимента.

Дисконтируемые затраты определяют экономическую целесообразность выбранного технического решения и являются параметром оптимизации объекта исследования.

Установлено, что на функцию отклика дисконтируемых затрат существенное влияние оказывают следующие факторы:

- схема электроснабжения;
- мощность, потребляемая объектом;
- расстояние от источника питания до потребителя;
- стоимость электроэнергии;
- действительное число часов работы объекта;
- стоимость элементов системы;
- распределение нагрузки по линии электропередачи;
- перспективный рост нагрузки.

Все эти факторы по-разному влияют на CAPEX и OPEX и, следовательно, на дисконтируемые затраты.

Для газовых месторождений, состоящих из нескольких УКПГ, фактор «расчетная электрическая нагрузка» разделен на два фактора: «количество кустов газовых скважин», «коэффициент прироста электрической нагрузки». Разделение фактора позволяет построить математические модели «двойная сквозная магистраль с односторонним питанием с подключением трансформации на всем протяжении линии», провести динамический эксперимент во времени.

По данным с действующих газовых месторождений Западной Сибири, для построения математических моделей питающей сети расчетная электрическая мощность одной УКПГ в первый период жизненного цикла принята 3 МВт.

По результатам анализа для составления математических моделей выбраны следующие факторы:

1. Для газовых месторождений мощностью от 7 до 75 МВт и более 75 МВт:

- x_1 – количество УКПГ, шт.;
- x_2 – расстояние от источника до потребителя, км;
- x_3 – коэффициент прироста электрической нагрузки;
- x_4 – коэффициент распределения нагрузки.

2. Для газовых месторождений мощностью до 7 МВт:

- x_1 – мощность УКПГ, МВт;
- x_2 – расстояние от источника до потребителя, км;
- x_3 – коэффициент прироста электрической нагрузки.

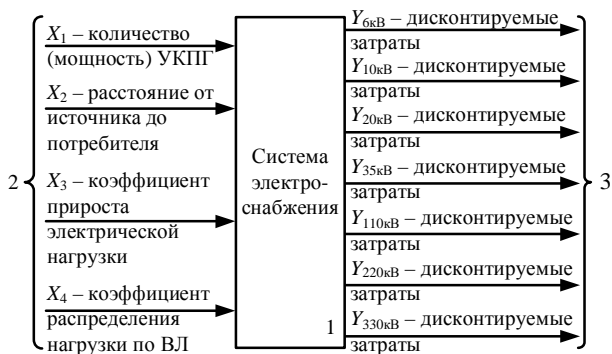


Рис. 4. Схема объекта исследования:

1 – объект исследования; 2 – изменяемые контролируемые факторы; 3 – параметры оптимизации

Фактор «коэффициент прироста электрической нагрузки» составляет:

- в первый период жизни – $k_{пр} = 1$ о.е.;
- во второй период жизни – $k_{пр} = 1,63$ о.е.;
- в третий период жизни – $k_{пр} = 3,45$ о.е.

Фактор «коэффициент распределения нагрузки» принимается $k_{рас} = 1$ – для подключения трансформации в конце линии; $k_{рас} = 0,55$ – для равномерного подключения трансформации к линии электропередачи. Этот фактор позволяет оценить распределение нагрузки по линии электропередачи (равномерной или в конце линии) на класс напряжения.

Факторы, наиболее влияющие на оптимальный класс напряжения для системы электроснабжения газовых месторождений, представлены в табл. 1.

Пределы варьирования факторов определяются спецификой газовых месторождений, которая установлена при анализе существующих систем электроснабжения газовых месторождений. Для каждого спланированного опыта определяются оптимальные значения искомой функции, соответствующей минимуму выбранного критерия оптимальности. Подставляя в зависимость различные значения учитываемых факторов, можно проследить изменение оптимального класса напряжения на всех этапах жизненного цикла газового месторождения и на основании этого принять правильное техническое решение. Для этого строится схема электроснабжения для каждого опыта (сочетания факторов) при разном классе напряжения.

Математические модели разработаны для объектов газовой промышленности с непрерывным производством газа, работающих 7650 ч в год [10]. Математические модели построены отдельно для большой, средней и малой мощности газовых месторождений.

При построении математических моделей для системы внешнего электроснабжения газовых месторождений использованы следующие классы напряжения:

- для месторождений большой мощности – 20, 35, 110, 220, 330 кВ;
- для месторождений средней мощности – 20, 35, 110, 220 кВ;
- для месторождений малой мощности – 6, 10, 20, 35, 110 кВ.

Таблица 1
Основные уровни и интервалы варьирования факторов

Фактор	Основной нулевой уровень x_{i0}	Интервал варьирования Δx	Верхний уровень «+»	Нижний уровень «-»
Газовое месторождение большой электрической мощности (более 75 МВт)				
x_1	10,5	4,5	15	6
x_2	105	45	150	60
x_3	3	2	5	1
x_4	0,775	0,225	1	0,55
Газовое месторождение средней электрической мощности (от 7 до 75 МВт)				
x_1	3,5	1,5	5	2
x_2	45	30	75	15
x_3	3	2	5	1
x_4	0,775	0,225	1	0,55
Газовое месторождение малой электрической мощности (до 7 МВт)				
x_1	4,5	2,5	7	2
x_2	11,5	8,5	20	3
x_3	2,5	1,5	5	1

Под математической моделью подразумевается уравнение, связывающее параметр оптимизации (дисконтируемые затраты) с изучаемыми изменяемыми факторами [4-6]. Выражение для газовых месторождений большой и средней мощности имеет вид

$$y = R = f(x_1, x_2, x_3, x_4) = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{14}x_1x_4 + b_{24}x_2x_4 + b_{34}x_3x_4 + b_{123}x_1x_2x_3 + b_{124}x_1x_2x_4 + b_{134}x_1x_3x_4 + b_{234}x_2x_3x_4 + b_{1234}x_1x_2x_3x_4, \quad (1)$$

где x_1 – фактор «количество УКПГ»; x_2 – фактор «расстояние от источника питания до потребителя электроэнергии»; x_3 – фактор «коэффициент прироста электрической нагрузки»; x_4 – фактор «коэффициент распределения нагрузки по ВЛ»; b_0, b_i, b_{ij} – коэффициенты полинома.

Математическая модель для газовых месторождений малой мощности имеет вид

$$y = R = f(x_1, x_2, x_3) = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3, \quad (2)$$

где x_1 – фактор «мощность УКПГ»; x_2 – фактор «расстояние от источника питания до потребителя электроэнергии»; x_3 – фактор «коэффициент прироста электрической нагрузки»; b_0, b_1, \dots, b_{123} – коэффициенты полинома.

Все влияющие факторы в математических моделях используются в кодированном виде, переход к которому осуществляется по формуле

$$x_j = \frac{\bar{x}_j - \bar{x}_{j0}}{\Delta x_j}, \quad (3)$$

где x_j – кодированное значение фактора; \bar{x} – натуральное значение факторов; \bar{x}_{j0} – натуральное значение основного уровня; Δx_j – интервал варьирования; j – номер фактора.

Общее количество построенных схем электроснабжения составляет 184. Расчет дисконтируемых затрат построенных схем электроснабжения при разных классах напряжения выполнен в программе «ПРАДИЗ», разработанной автором [11].

«ПРАДИЗ» позволяет выполнить расчет дисконтируемых затрат системы внешнего электроснабжения промышленных предприятий малой, средней и большой мощности со схемой электроснабжения «магистральная схема с одинарной и двойной сквозной магистральями».

Программа учитывает такие параметры, как капитальные затраты, основные средства (стоимость оборудования, стоимость строительно-монтажных работ, коэффициент технологический, коэффициент удорожания), эксплуатационные затраты (стоимость электроэнергии, расходы на оплату труда, общехозяйственные расходы, капитальный ремонт, расходы на техобслуживание и ремонт оборудования, сроки полезного использования

основных фондов, налог на имущество, социальные выплаты, плата за землю, НДС, ставка дисконта), численность рабочего персонала, технологические показатели (потери электроэнергии, площадь земледелия, численность рабочих и АУП).

Интерполяционная теория Лагранжа

Выбор оптимального напряжения при формировании общей модели осуществляется методом Лагранжа по трем точкам.

Выражение для определения оптимального напряжения по трем точкам имеет вид

$$U_{\text{опт}} = \frac{\frac{R_1}{A}(U_2 + U_3) + \frac{R_2}{B}(U_1 + U_3) + \frac{R_3}{C}(U_1 + U_2)}{2\left(\frac{R_1}{A} + \frac{R_2}{B} + \frac{R_3}{C}\right)}, \quad (4)$$

где U_2 – стандартный класс напряжения с минимальными дисконтируемыми затратами; U_1 – стандартный ближайший меньший класс напряжения относительно U_2 ; U_3 – стандартный ближайший больший класс напряжения относительно U_2 ; R_1 – дисконтируемые затраты ближайшего меньшего стандартного класса напряжения U_1 ; R_2 – минимальные дисконтируемые затраты при стандартном классе напряжения U_2 ; R_3 – дисконтируемые затраты ближайшего большего стандартного класса напряжения U_3 ; R_1, R_2, R_3 определяются по выражениям 1 и 2.

$$A = (U_1 - U_3)(U_1 - U_2); \quad (5)$$

$$B = (U_2 - U_1)(U_2 - U_3); \quad (6)$$

$$C = (U_3 - U_1)(U_3 - U_2). \quad (7)$$

Коэффициенты полинома для математических моделей газовых месторождений большой (более 75 МВт) и средней мощности (от 7 до 75 МВт) по выражению (1) представлены в табл. 2 и 3.

Коэффициенты полинома для математических моделей газовых месторождений малой мощности (до 7 МВт) по выражению (2) представлены в табл. 4.

Таблица 2
Коэффициенты полинома для математических моделей газовых месторождений большой мощности (более 75 МВт)

Полином	$U_{\text{опт}}$, кВ	$R_{20\text{кВ}}$, млрд руб.	$R_{35\text{кВ}}$, млрд руб.	$R_{110\text{кВ}}$, млрд руб.	$R_{220\text{кВ}}$, млрд руб.	$R_{330\text{кВ}}$, млрд руб.
b_0	133	145,4	63,9	21,2	23,5	38,5
b_1	15,4	78,6	33,9	8,9	7,9	12,3
b_2	32,2	101,5	43,4	7,1	4,8	8
b_3	27,3	92,0	39,8	8,6	3,2	4,3
b_4	12,5	39,5	16,1	2,3	1,3	2,1
b_{12}	–	52,7	22,8	4,3	0,66	1,03
b_{13}	5,67	50,3	21,2	4,5	2,1	2,7
b_{23}	–1	65,8	27,7	4,1	1,4	2,2
b_{14}	–7,7	11,5	5,8	1,7	1,2	2,1
b_{24}	–2,4	26,4	11,3	2,8	0,4	0,9
b_{34}	5,16	25,9	10,9	1,4	0,56	0,98
b_{123}	–4,35	33,9	14,4	3,4	1,29	2,1
b_{124}	1,23	7,32	4,3	0,2	0,39	0,95
b_{134}	–7	4,36	3,35	0,8	0,54	1,02
b_{234}	–4,6	16,3	7,5	1,9	1,03	1,98
b_{1234}	3,52	0,9	2,4	–0,6	1,05	2,05

Таблица 3

Коэффициенты полинома для математических моделей газовых месторождений средней мощности (от 7 до 75 МВт)

Полином	$U_{\text{опт}}$, кВ	$R_{20\text{кВ}}$, млрд руб.	$R_{35\text{кВ}}$, млрд руб.	$R_{110\text{кВ}}$, млрд руб.	$R_{220\text{кВ}}$, млрд руб.
b_0	76	13,85	6,56	5,3	8,53
b_1	18	5,7	2,7	1,3	1,7
b_2	16,9	11,01	4,5	1,3	2,3
b_3	16,7	8,2	3,4	0,72	0,8
b_4	2,2	2,6	1,1	–	–0,1
b_{12}	3,9	4,4	1,78	0,19	0,17
b_{13}	9,3	3,11	1,2	–	–0,043
b_{23}	2,2	7,6	3,1	–	–0,097
b_{14}	12	1,9	0,7	0,3	0,37
b_{24}	–11	1,9	0,67	0,2	0,15
b_{34}	–3,5	1,5	0,5	–0,19	–0,3
b_{123}	5,4	3,4	1,2	0,38	0,4
b_{124}	4,5	1,34	0,3	–0,2	–0,36
b_{134}	7,37	0,76	0,14	0,1	0,13
b_{234}	–11	1,7	0,67	0,31	0,38
b_{1234}	3,8	1,2	0,35	–	–0,129

Таблица 4

Коэффициенты полинома для математических моделей газовых месторождений малой мощности (до 7 МВт)

Полином	$U_{\text{опт}}$, кВ	$R_{6\text{кВ}}$, млрд руб.	$R_{10\text{кВ}}$, млрд руб.	$R_{20\text{кВ}}$, млрд руб.	$R_{35\text{кВ}}$, млрд руб.	$R_{110\text{кВ}}$, млрд руб.
b_0	38,8	5,7	2,4	1,2	0,95	1,42
b_1	4,87	1,86	0,72	0,33	0,21	0,11
b_2	15,6	4,96	1,78	0,7	0,38	0,4
b_3	14,8	3,7	1,37	0,57	0,27	0,19
b_{12}	2,22	1,6	0,55	0,2	0,09	–
b_{13}	2,35	1,26	0,46	0,31	0,19	–
b_{23}	11,07	3,3	1,1	0,4	0,12	–
b_{123}	0,94	1,1	0,34	0,18	0,08	–

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе в качестве примера приведены результаты расчета оптимального класса напряжения для питающей линии Медвежьего нефтегазоконденсатного месторождения по математическим моделям (3) – (8). На рис. 5 показана зависимость дисконтируемых затрат от класса напряжения питающей сети Медвежьего нефтегазоконденсатного месторождения.

Медвежье нефтегазоконденсатное месторождение состоит из десяти УКПГ с подстанциями класса напряжения 110 кВ, которые подключены равномерно к питающей линии электропередачи длиной 111,8 км.

Таким образом, анализируя зависимость класса напряжения от дисконтируемых затрат питающей сети, можно сделать вывод, что чем выше класс напряжения, тем меньше разница в дисконтируемых затратах. На графиках (см. рис. 5) видно, что для класса напряжения 20 кВ значения дисконтируемых затрат стоят далеко друг от друга, а для класса напряжения 330 кВ значения дисконтируемых затрат сходятся в одну точку.

Это говорит о том, что чем выше класс напряжения, тем питающая сеть системы внешнего электроснабжения более приспособлена к росту электрической нагрузки, то есть к развитию (продлению жизненного цикла) газового месторождения.

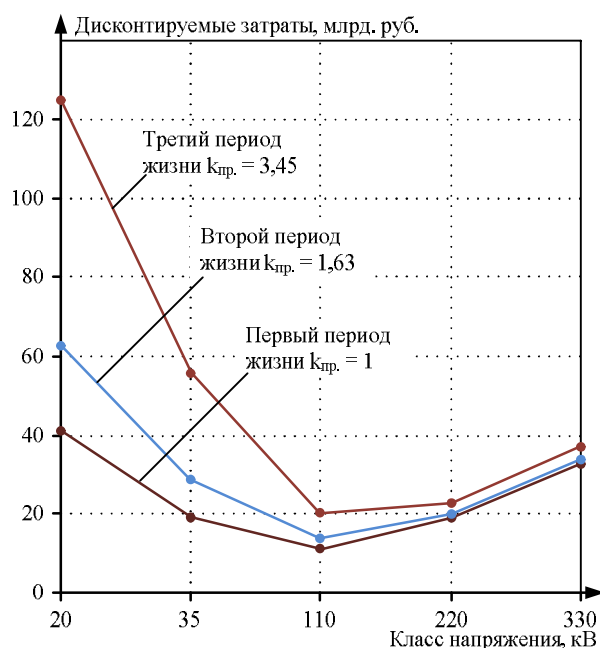


Рис. 5. Зависимость дисконтируемых затрат от класса напряжения питающей сети ВЛ «Базовая-ПГП9». Медвежье нефтегазоконденсатное месторождение. Газовое месторождение большой мощности (более 75 МВт)

По выполненному расчету можно сделать вывод, что для системы внешнего электроснабжения Медвежьего нефтегазоконденсатного месторождения оптимальным классом напряжения является 110 кВ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе для питающей сети газовых месторождений разработаны:

- четырнадцать математических моделей дисконтируемых затрат для стандартных классов напряжения 6, 10, 20, 35, 110, 220 и 330 кВ;
- три математических модели оптимального класса напряжения.

Полученные математические модели рекомендуются использовать в системах автоматизирования проектирования системы электроснабжения газовых месторождений с учетом всего его жизненного цикла.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Безносиков А.Ф., Синцов И. А., Остапчук Д.А. Разработка и эксплуатация газовых и газоконденсатных месторождений: учеб. пособие. Тюмень: ТИУ, 2016. 80 с.
2. Перспективы применения расправленного компримирования в промышленных системах добычи газа / М.А. Воронцов, А.А. Ротов, И.В. Марущенко, Е.М. Лаптев // Вести газовой науки: науч.-техн. сб. 2014. №4 (20). С. 164-173.
3. Применение мобильных компрессорных установок на завершающей стадии разработки газовых залежей / В.З. Минликаев, Д.В. Дикамов, О.В. Арно, А.В. Меркулов, С.А. Кирсанов, А.В. Красовский, С.Ю. Свенский, А.В. Кононов // Газовая промышленность. 2015. №1 (717). С. 15-17.
4. Системный подход к размещению малогабаритных компрессорных установок на газовом месторождении в период падающей добычи / А.В. Красовский, А.В. Колмаков, Е.С. Зимин, А.А. Хакимов // Наука и техника в газовой промышленности. 2015. № 4 (62). С. 83-88.
5. Аксютин О.Е. Реализация потенциала энергосбережения в магистральном транспорте газа ПАО «Газпром» // Газовая промышленность. 2017. Спецвыпуск № 1. С. 52-58.
6. Саранча А.В., Саранча И.С. Низконапорный газ сеноманских залежей ЯНАО // Академический журнал Западной Сибири. 2014. Т. 10, №3 (52). С. 146-147.

7. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1976. 279 с.
8. СТО Газпром 2-6.2-1028-2015. Категорийность электроприемников промышленных объектов ПАО «Газпром». М., 2015.
9. Мельников Н.А. Электрические сети и системы. М.: Энергия, 1975. 463 с.
10. НТП ЭПП-94 (Нормы технологического проектирования). Проектирование электроснабжения промышленных предприятий. М.: ВНИПИ Тяжпромэлектропроект, 1994.
11. Свид. о гос. регистрации progr. для ЭВМ № 2020619917. Программа для расчета дисконтируемых затрат системы внешнего электроснабжения промышленных предприятий (ПРАДИЗ) / И.М. Богачков; заявитель и правообладатель Богачков И.М.; заявл. 29.07.2020, опубл. 26.08.2020.

Поступила в редакцию 10 октября 2020 г.

INFORMATION IN ENGLISH

MATHEMATICAL MODELS FOR CALCULATING THE OPTIMAL VOLTAGE OF THE EXTERNAL ELECTRICITY SUPPLY SYSTEM FOR GAS FIELDS OBTAINED USING THE EXPERIMENT PLANNING THEORY

Ivan M. Bogachkov

Chief Specialist, Electrical Department, LLC "Gazprom Engineering", Tyumen Branch, Tyumen, Russia. E-mail: Bogim83@mail.ru

Currently, the existing external electricity supply systems for gas fields in Western Siberia are not adapted to the growth of electrical loads by 3 and 4 times due to the implementation of energy-intensive modern gas production technologies (the one of distributed gas compression) at the final stage of gas fields development. Previously, engineering of electricity supply system for gas fields was carried out without considering the implementation of additional capacities, and this led to fundamental reconstruction of the entire electricity supply system for most gas fields in Western Siberia, for example, the power supply system for the Zapadno-Tarkosalinskoe and Yubileynoe gas fields. The main parameter of electricity supply system is the voltage class at which the transmission and distribution of electric energy occurs. The goal of this paper is to develop mathematical models for calculating the optimal voltage class considering the entire life cycle of the field. To achieve this goal, a number of tasks have been solved: all gas fields were classified into three categories by electrical load; factors that significantly affect the voltage class were determined; power supply schemes were constructed for each combination of factors and voltage classes; discounted costs are calculated for each power supply scheme; the type of the target function was proposed; the voltage class with a minimum of discounted costs is determined according to the Lagrange interpolation theory; mathematical models were constructed. Also, the results of calculating the optimization of the electricity supply line of the Medvezhye field on the obtained mathematical models in graphical form are presented in the paper. The following methods were used to solve the problems: methods of experiment planning theory and computer programming methods.

Keywords: experiment planning theory, voltage class, supply network, discounted costs, electricity supply system, gas field, factor.

REFERENCES

1. Beznosikov A.F., Sintsov I.A., Ostapchuk D.A. *Razrabotka i ekspluatatsia gazovykh i gazokondensatnykh mestorozhdenij: uchebnoe posobie* [Development and operation of gas and condensate fields]. Tyumen, Publ., 2016. 80 p. (In Russian)
2. Vorontsov M.A., Rotov A.A., Marushhenko I.V., Laptev E.M. Prospects of the use of straightened compression in commercial gas production systems. *Vesti gazovoj nauki: nauchno-tekhnicheski sbornik* [Collection of scientific and engineering papers "News of gas extracting"], 2014, no. (20), pp. 164-173. (In Russian)
3. Minlikaev V.Z., Dikamov D.V., Arno O.V., Merkulov A.V., Kirsanov S.A., Krasovski A.V., Svenski S.Yu., Kononov A.V. Application of mobile compressor units at the final stage of development of gas fields. *Gazovaya promyshlennost* [Gas Industry Magazine], 2015, no. 1(717), pp. 15-17. (In Russian)
4. Krasovskiy A.V., Kolmakov A.V., Zimin E.S., Khamimov A.A. The systematic approach to placing small-sized compressor units in a gas field during a period of declining production. *Nauka i tekhnika v gazovoy promyshlennosti* [Science and Technology in the Gas Industry], 2015, no. 4(62), pp. 83-88. (In Russian)
5. Aksiutin O.E. Implementation of energy saving potential in the main gas transport of Gazprom PJSC. *Gazovaya promyshlennost* [Gas Industry Magazine], 2017, special issue no.1, pp. 52-58. (In Russian)
6. Sarancha A.V., Sarancha I.S. Low-pressure gas of Senomanian fields of Yamalo-Nenets Autonomous District. *Akademicheskii zhurnal Zapadnoi Sibiri* [Academic Journal of West Siberia], 2014, vol. 10, no. 3(52), pp.146-147. (In Russian)
7. Adler Yu.P., Markova E.V., Granovsky Yu.V. *Planirovanie eksperimenta pri poiske optimalnykh uslovij* [Experiment planning in search of optimal conditions]. Moscow: Science Publ., 1976. 279 p. (In Russian)
8. Company Standard STO Gazprom 2-6.2-1028–2015. Categorization of Electric Receivers of Industrial Facilities of Gazprom PJSC. Moscow, Gazprom expo, 2015, 69 c. (In Russian)
9. Melnikov N.A. *Elektricheskie seti i sistemy* [Electrical network and systems]. Moscow, Energy Publ., 1975. 463 c. (In Russian)
10. NTP EPP-94 Norms of technological design. Engineering of electricity supply for industrial enterprises. Moscow: VNIPI Tjzhpromjelektroproekt Publ., 1994. 67 p. (In Russian)
11. Bogachkov I.M. *Programma dlya rascheta diskontiruemykh zatrat sistemy vneshnego elektrosnabzheniya promyshlennykh predpriyatij (PRADIZ)* [Program for calculating the discounted costs of the external power supply system of industrial enterprises (PRADIZ)]. Computer program RF, no. 2020619917, 2020.

Богачков И.М. Математические модели расчета оптимального напряжения системы внешнего электроснабжения газовых месторождений, полученные с применением теории планирования эксперимента // Электротехнические системы и комплексы. 2021. № 1(50). С. 4-9. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-1\(50\)-4-9](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-1(50)-4-9)

Bogachkov I.M. Mathematical Models for Calculating the Optimal Voltage of the External Electricity Supply System for Gas Fields Obtained Using the Experiment Planning Theory. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2021, no. 1(50), pp. 4-9. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-1\(50\)-4-9](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-1(50)-4-9)

Арсентьев Г.О.¹, Арсентьев О.В.¹, Крюков А.В.^{1,2}

¹ Иркутский национальный исследовательский технический университет

² Иркутский государственный университет путей сообщения

ПРИМЕНЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РОУТЕРОВ В ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСАХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

В настоящее время в электроэнергетике начинают активно применяться технологии интеллектуальных электрических сетей Smart Grid, основанные на управлении потоками электроэнергии, использовании установок распределенной генерации и полупроводниковых преобразовательных устройств, предназначенных для повышения качества электроэнергии и надежности работы электротехнических комплексов. Одна из технологий Smart Grid состоит в создании энергетических роутеров, способных активно влиять на параметры электроэнергии и режимы ее потребления. Они включают в себя специальные трансформаторы и управляемые преобразователи и предназначены для управления энергопотреблением, подключения установок распределенной генерации, обеспечения двухсторонних перетоков энергии. Представлены результаты компьютерного и экспериментального исследования энергетических роутеров с высокочастотными трансформаторами, предназначенными для интеллектуальных систем электроснабжения. Рассмотрены вопросы повышения качества электроэнергии в сетях нетяговых потребителей железных дорог путем использования энергетических роутеров. Получены результаты, подтверждающие возможность применения энергетических роутеров для электроснабжения объектов железнодорожного транспорта с повышенными требованиями к качеству электроэнергии. На основе компьютерных исследований показано, что использование интеллектуальных элементов в системах электроснабжения нетяговых потребителей позволяет решать задачи по повышению качества и надежности энергообеспечения объектов железнодорожного транспорта. Использование энергетических роутеров для электроснабжения ответственных потребителей дает возможность полностью снять проблемы с качеством электроэнергии. Разработанная модель энергетического роутера может применяться для анализа режимов систем электроснабжения, оснащенных этими устройствами. Результаты экспериментальных исследований работы высокочастотного трансформатора подтвердили его соответствие расчетным параметрам. Эффект применения таких трансформаторов в электротехнических комплексах потребителей приводит к значительному снижению массогабаритных показателей. Измерения показали, что высокочастотный трансформатор полностью соответствует расчетным данным: импульсы напряжений имеют четко выраженный прямоугольный характер, сигнал передается через магнитопровод без искажений по форме и углу фазового сдвига, частота составила 12,07 кГц.

Ключевые слова: электротехнические комплексы систем электроснабжения железных дорог, энергетический роутер, высокочастотный трансформатор, моделирование, качество электроэнергии.

ВВЕДЕНИЕ

Железнодорожный транспорт имеет развитую инфраструктуру, связанную единым технологическим процессом и включающую в себя подвижной состав, путевое хозяйство, тяговые сети, ремонтные предприятия и т.д. Системы электроснабжения (СЭС) железных дорог переменного тока имеют специфику, обусловленную тем, что энергообеспечение тяги поездов и стационарных объектов инфраструктуры осуществляется единой СЭС. Это приводит к значительному ухудшению качества электроэнергии, поступающей на электротехнические комплексы (ЭК) нетяговых потребителей.

Существует ряд технических решений, направленных на снижение влияния тяговой нагрузки на работу ЭК остальных потребителей, получающих питание от СЭС железных дорог. Однако общего решения проблемы нет, так как каждая из предлагаемых мер имеет узконаправленный характер и позволяет уменьшать искажение качества электроэнергии (ЭЭ) по одному из показателей. Например, симметрирующие трансформаторы дают возможность снижать несимметрию напряжений, а активные и пассивные фильтры гармоник позволяют уменьшать несинусоидальность кривых токов и напряжений в системах электропитания ЭК.

В настоящее время в электроэнергетике начинают

использоваться технологии smart grid, основанные на интеллектуальном управлении потоками электроэнергии, использовании установок распределенной генерации и полупроводниковых преобразовательных устройств, предназначенных для повышения качества ЭЭ и надежности работы СЭС и ЭК потребителей [1-3].

Одна из технологий Smart Grid состоит в создании энергетических роутеров (ЭР), представляющих собой специальные ЭК, способные активно влиять на параметры электроэнергии и режимы ее потребления [4-6]. Они включают в себя специальные трансформаторы и управляемые преобразовательные устройства [7-11] и предназначены для организации управляемого энергопотребления, подключения установок распределенной генерации, обеспечения двухсторонних перетоков энергии.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ РОУТЕРЫ

Для решения проблемы качества энергии в сетях, питающих нетяговые потребители с повышенными требованиями к качеству ЭЭ, можно эффективно использовать ЭР, обеспечивающие практически синусоидальное напряжение со стабильным действующим значением и отсутствием несимметрии. Современная элементная база силовой электроники позволяет создавать преобразовательные устройства, надежно работающие в сетях высокого напряжения, способных коммутировать большие токи и выполнять высокочастотные переключения. Мощность ЭР сопоставима

с аналогичным параметром для силовых трансформаторов, применяемых в сетях 10/0,4 кВ, и может достигать 2,5–3 МВ·А.

В состав ЭР входят следующие элементы:

- входной высоковольтный выпрямитель;
- инвертор 1, формирующий высокочастотные импульсы прямоугольной формы с частотой 5...15 кГц;
- высокочастотный трансформатор с магнитопроводом из листовой электротехнической стали для частоты до 6 кГц или из ферритов для больших частот;
- выходной управляемый выпрямитель;
- инвертор 2, формирующий выходное напряжение промышленной частоты практически синусоидальной формы, выполненный, например, по резонансному принципу.

На рис. 1 представлены схемы ЭР с высокочастотным трансформатором [3, 8], мощностью 3 МВ·А.

Для роутеров малой и средней мощности в высокочастотном инверторе используются полевые Mosfet-транзисторы, которые обладают хорошими динамическими характеристиками, позволяющими использовать их в ЭК с частотой до 100 кГц. Рабочая частота таких ЭР составляет примерно 20 кГц. Однако эти полупроводниковые элементы имеют ограничения по величине пропускаемого тока.

В высокочастотном инверторе рассматриваемого ЭР используются биполярные IGBT-транзисторы, способные коммутировать токи выше 1 кА. Эффективное применение такого транзистора ограничено частотой переключений в 5 кГц, при которой потери находятся в допустимых пределах, обеспечивающих КПД преобразования выше 90%.

На основе схемы, показанной на рис. 1, разработана модель ЭР в среде Matlab-Simulink. Модель имеет два выпрямителя в высоковольтной и низковольтной частях схемы и два инвертора, предназначенных для получения импульсов частотой 5 кГц и выходного напряжения 50 Гц (рис. 2). Модель ЭР выполнена в виде подпрограммы, которую можно интегрировать в любую модель СЭС. Ниже представлены результаты исследования СЭС железной дороги, где ЭР используется для подачи качественной электроэнергии на ЭК нетяговых потребителей.

В представленной схеме имеется модель трехфазного тягового трансформатора, вторичные обмотки которого служат для подачи энергии на электроподвижной состав и на ЭК нетяговых потребителей. Мощность нагрузки для ЭР составляет 2,24 МВ·А при $\cos\varphi=0,89$. Исследования проводились при отключенном и включенном ЭР.

На рис. 3 представлены результаты моделирования для отключенного ЭР, при этом наблюдается значительная несимметрия и несинусоидальность: коэффициент несимметрии по обратной последовательности k_{2U} равен 5,3 при предельно допустимом значении 4; суммарный коэффициент гармоник k_U равен 6,6 при нормально допустимом значении, не превышающем 5.

Работа ЭР характеризуется графиками напряжений (рис. 4) на обмотках высокочастотного трансформатора.

На рис. 5 представлены графики изменения напряжений, поступающих на электроустановки потребителя через ЭР.

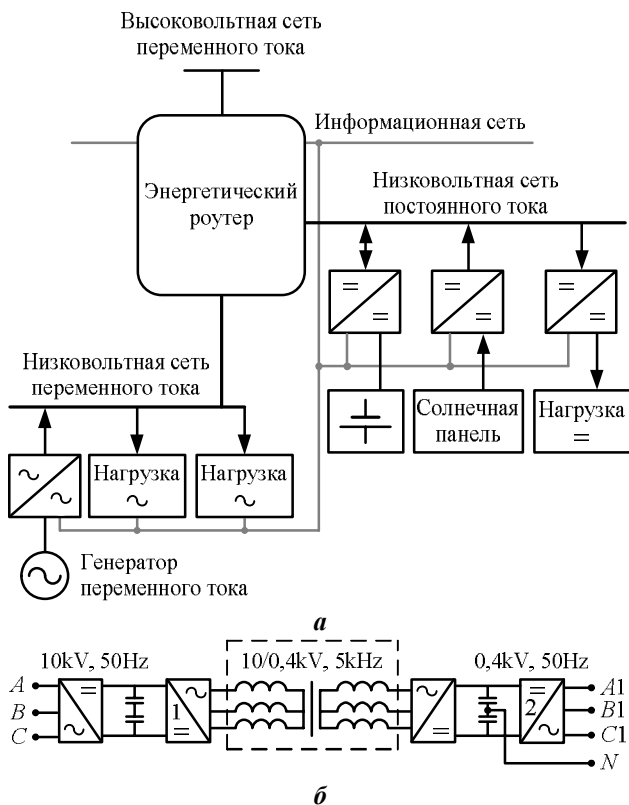


Рис. 1. Энергетический роутер:
а – схема СЭС с энергетическим роутером;
б – схема роутера, построенного на основе твердотельного трансформатора

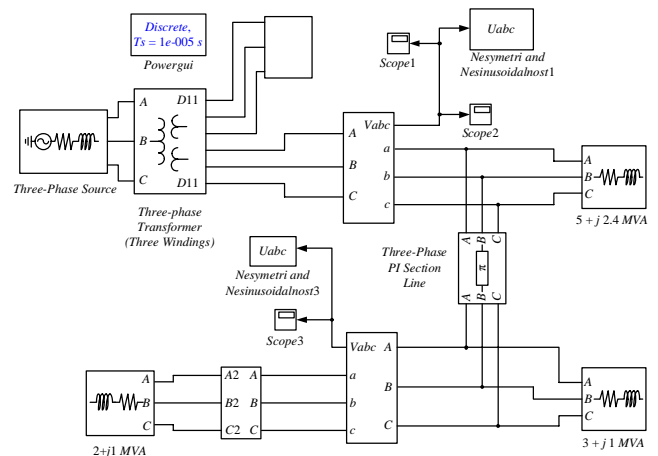


Рис. 2. Модель энергетического роутера

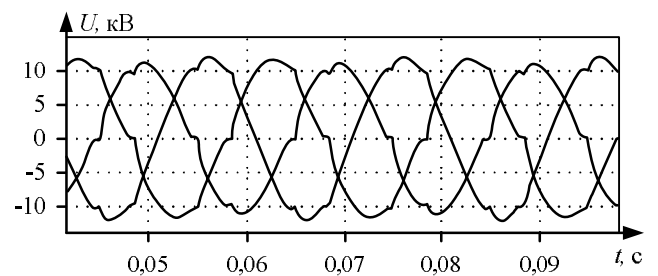
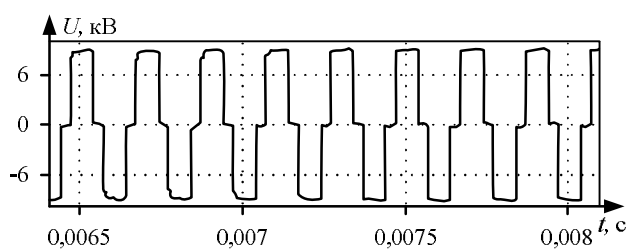
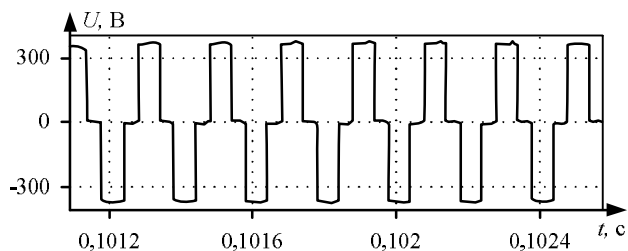


Рис. 3. Напряжение и параметры качества электроэнергии нетягового потребителя без ЭР



a



b

Рис. 4. Напряжения на высокочастотном трансформаторе, со стороны 10 и 0,4 кВ

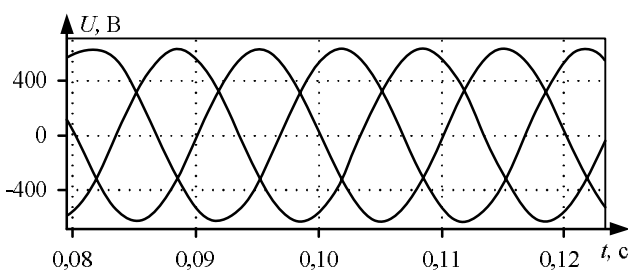


Рис. 5. Напряжение и параметры качества электроэнергии нетягового потребителя при наличии ЭР

Напряжение, подаваемое потребителю, имеет практически синусоидальную форму с частотой 50 Гц и стабильной амплитудой, несимметрия и несинусоидальность практически отсутствуют.

**РАСЧЕТЫ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ТРАНСФОРМАТОРА**

Наименее изученным сегментом ЭР, требующим конструкторской и экспериментальной проработки, является блок высокочастотного трансформатора, определяющего работоспособность и массогабаритные показатели энергоузел. Конструкции выпрямителей и инверторов достаточно хорошо апробированы и могут без значительных вариаций использоваться в составе ЭР. Возможность технической реализации высокочастотного трансформатора экспериментально проверена на базе преобразователя, разработанного ООО «Транс-Атом» для блока питания электронных устройств по заказу Кубинской железной дороги (Ferrocarriles de Cuba).

Принцип действия преобразователя основан на двойном преобразовании электрической энергии. Сначала сетевое трёхфазное напряжение поступает на мостовой выпрямитель. Затем выпрямленное напряжение с помощью мостового однофазного инвертора на Mosfet-транзисторах преобразуется в переменное напряжение частотой до 15 кГц с прямоугольной формой кривой. Далее напряжение подаётся на первичную обмотку силового трансформатора. К вторичной обмотке подключается нагрузка.

Регулирование эффективного значения напряжения на нагрузке производится платой управления за счёт изменения скважности импульсов на выходе силового инвертора. На **рис. 6** представлен внешний вид высокочастотного блока, а на **рис. 7** показано фото центральной части экспериментальной установки. Общий вид экспериментальной установки включает в себя объект исследований и измерительный прибор – осциллограф Tektronix TPS 2024B, позволяющий получать точные значения частоты, что является важным при регулировании эффективного напряжения. Для получения результатов, совместимых с компьютерной обработкой, использовался цифровой осциллограф Nantek DSO-2090.

Нагрев обмоток определяется плотностью тока в проводах, максимальное значение которой принято на основании практического опыта равным 3,2 А/мм². Расчет трансформатора проводился из условия работы магнитной системы на линейном участке характеристики намагничивания. По технологическим условиям диапазон изменения частоты находился в пределах 10–15 кГц. Для обеспечения высокоточного регулирования лучшая настройка частоты обеспечивалась при линейных характеристиках, при этом определяющим фактором являлся выбор величины магнитной индукции, зависящей от свойств материала магнитопровода.

При проектировании трансформатора необходимо было обеспечить возможность размещения обмоток в окне сердечника магнитопровода. Рекомендованное значение коэффициента заполнения окна медью K_m для каркасных броневых или стержневых сердечников составляет 0,45. При широких каркасах и большой длине обмотки одного слоя значение K_m может достигать и до 0,5–0,55, как, например, у магнитопроводов типа Б69 и Б35. При бескаркасной промышленной обмотке K_m может достигать 0,6–0,65. Теоретический предел значения K_m для слоевого размещения круглого провода в квадратном окне составляет 0,87.

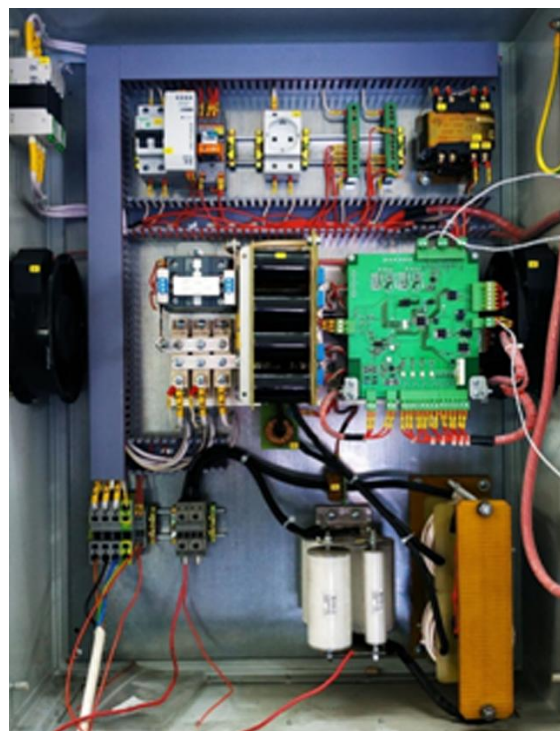


Рис. 6. Высокочастотный блок питания

Таблица 1

Результаты расчет трансформатора на феррите N97 U141/78/30 (B67374G0000X197)

Обозначение	Наименование параметра, единицы измерения	Численное значение
S_c	Площадь поперечного сечения сердечника, см ²	13,65
S_o	Площадь окна, см ²	33,5
η	КПД, о.е.	0,95
B	Магнитная индукция, Тл	0,35
j	Плотность тока в проводе обмоток, А/мм ²	3,2
K_m	Коэффициент заполнения окна сердечника медью, о.е.	0,3
K_c	Коэффициент заполнения сечения сердечника сталью, о.е.	0,93
U_1	Первичное напряжение, В	535
U_2	Вторичное напряжение, В	100
I_1	Ток в первичной обмотке, А	54
I_2	Ток во вторичной обмотке, А	290
F_1	Сечение провода в первичной обмотке, мм ²	16
F_2	Сечение провода во вторичной обмотке, мм ²	90
G	Вес, кг	6
–	Габариты, мм (ДхШхВ)	196×84×150
f	Частота, кГц	10 12 15
P	Расчетная мощность, кВт	31 37 46
n_1	Число витков в первичной обмотке, ед.	27 23 18
n_2	Число витков во вторичной обмотке, ед.	5 4 3

Таблица 2

Сравнительные характеристики сухих трансформаторов промышленной частоты

№ п/п	Тип	Габариты, мм	Вес, кг
1	ТС – 25/10	880×520×925	340
2	ТС – 40/10	940×520×985	420
3	ОСУ – 20/0,5	540×420×555	136
4	ОСУ – 40/0,5	740×575×765	283

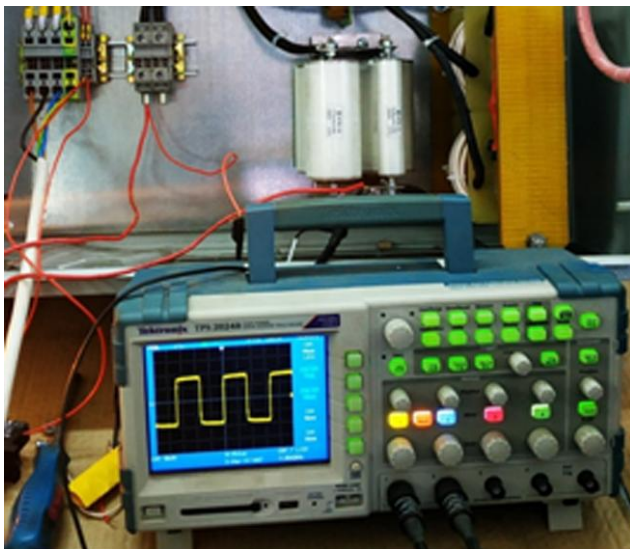


Рис. 7. Экспериментальная установка

Приведенные значения K_m достижимы лишь при ровной укладке провода строго виток к витку, тонкой межслойной и межобмоточной изоляции и заделке выводов за пределами окна сердечника на боковых вылетах обмотки. При изготовлении каркасных обмоток в условиях лабораторного или опытного производства следует принимать значение K_m не более 0,3–0,4.

Габаритная мощность трансформатора P , Вт, определяется по выражению

$$P = \frac{4,44\eta S_c S_o f B j K_m K_c}{100(1 + \eta)}$$

где η – КПД трансформатора, о.е.; S_c и S_o – соответственно площади поперечного сечения сердечника и окна, см²; f – нижняя рабочая частота трансформатора, Гц; B – магнитная индукция, Тл; j – плотность тока в проводе обмоток, А/мм²; K_c – коэффициент заполнения сечения сердечника сталью.

При известном напряжении в обмотках количество витков можно рассчитать по формуле

$$n_1 = \frac{U_1 10^4}{4,44 f B S_c K_c}$$

где U_1, U_2, U_3, \dots – напряжения обмоток, В; n_1, n_2, n_3, \dots – число витков обмоток.

В табл. 1 приведены основные параметры спроектированного высокочастотного трансформатора.

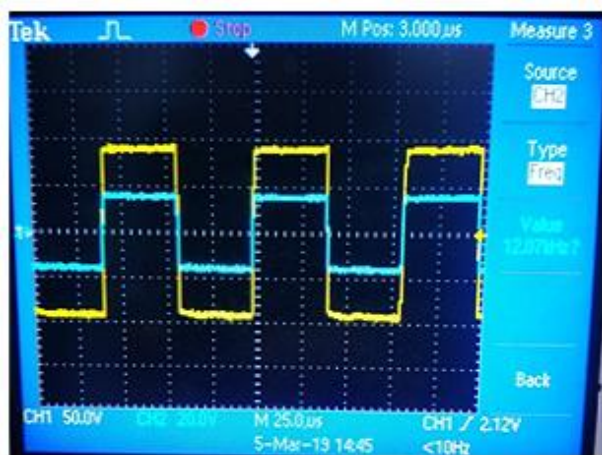
По приведенным расчетным данным был изготовлен высокочастотный трансформатор, являющийся одним из основных компонентов блока питания. Применение такого трансформатора позволило снизить массогабаритные показатели установки. Это подтверждается сравнением с показателями сухих силовых трансформаторов промышленной частоты, приведенными в табл. 2.

Очевидно, что все представленные в табл. 2 трансформаторы значительно уступают высокочастотному устройству. В зависимости от исполнения массы трансформаторов отличаются более чем в 70 для трехфазных и 48 раз для однофазных. По габаритным показателям отличия составляют от 3 до 6 раз.

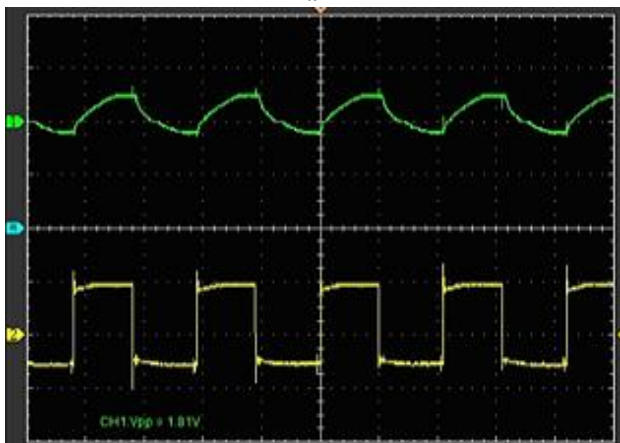
Исследование работы высокочастотного блока питания проводилось на экспериментальной установке (см. рис. 7) путем осциллографирования сигналов токов и напряжений (рис. 8).

На рис. 8, а показаны результаты экспериментальных исследований по определению характеристик высокочастотного трансформатора: коэффициента трансформации, искажений импульсов, фазовых сдвигов входных и выходных характеристик, частоты преобразования.

Измерения показали, что высокочастотный трансформатор полностью соответствует расчетным данным (см. табл. 1): коэффициент трансформации составил 5,4; импульсы напряжений имеют четко выраженный прямоугольный характер; сигнал передается через магнитопровод без искажений по форме и углу фазового сдвига; частота составила 12,07 кГц.



а



б

Рис. 8. Результаты экспериментальных исследований:
а – характеристики высокочастотного трансформатора;
б – токи и напряжения в первичной обмотке

На рис. 8, б приведены совмещенные осциллограммы токов и напряжений на высокой стороне трансформатора. Амплитуда импульсов напряжений составила 550 В при частоте 12,1 кГц. Токовая осциллограмма соответствует по времени импульсам напряжения, амплитудное значение составляет 51 А. Токи и напряжения практически совпадают по фазе, то есть после автоматической подстройки частоты происходит компенсация реактивной мощности и трансформатор включается на чисто активную нагрузку. Получение такого режима работы обосновано формированием жестких выходных характеристик.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование интеллектуальных элементов в СЭС нетяговых потребителей позволяет решать задачи по повышению качества и надежности энергообеспечения объектов железнодорожного транспорта. Использование энергетических роутеров для электроснабжения

ответственных потребителей дает возможность полностью снять проблемы с качеством электроэнергии.

Разработанная модель ЭР может применяться для анализа режимов СЭС, оснащенных этими устройствами.

Результаты экспериментальных исследований работы высокочастотного трансформатора подтвердили его соответствие расчётным параметрам. Эффект применения таких трансформаторов в ЭК потребителей приводит к значительному снижению массогабаритных показателей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Smart grid technologies / J. Wang, A.Q. Huang, W. Sung, Y. Liu, B.J. Baliga // IEEE Industrial Electronics Magazine. 2009. Vol. 3. No. 2. Pp. 16-23. doi: 10.1109/MIE.2009.932583.
2. Buchholz B.M., Styczynski Z.A.. Smart Grids – Fundamentals and Technologies in Electricity Networks. Springer: Verlag Berlin Heidelberg, 2014. 396 p. doi: 10.1002/ente.201402181.
3. Energy router: Architectures and functionalities toward Energy Internet / Y. Xu, J. Zhang, W. Wang, A. Juneja, S. Bhattacharya // IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm). IEEE, 2011. Pp. 31-36. doi: 10.1109/SmartGridComm.2011.6102340.
4. The future renewable electric energy delivery and management (FREEDM) system: The energy internet / A.Q. Huang, M.L. Crow., G.T. Heydt, J.P. Zheng, S.J. Dale // Proceedings of the IEEE. 2010. Vol. 99. Iss. 1. Pp. 133-148. doi: 10.1109/JPROC.2010.2081330.
5. Review of modular power converters solutions for smart transformer in distribution system / R.P. Alzola, G.V. Gohil, L. Mathe, M. Liserre, F. Blaabjerg // Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). IEEE, 2013. Pp. 380-387. doi: 10.1109/ECCE.2013.6646726.
6. Mao X., Falcones S., Ayyanar R. Energy-based control design for a solid state transformer // Power and Energy Society General Meeting. IEEE, 2010. doi: 10.1109/PES.2010.5590097.
7. Bansode S.G., Joshi P.M. Solid state transformers: new approach and new opportunity // Proceedings of 11th IRF International Conference. India: Pune, 2014. Pp. 15-21. https://www.digitalxplore.org/up_proc/pdf/84-140299091015-21.pdf.
8. Bulatov Y.N., Kryukov A.V., Arsentiev G.O. Use of power routers and renewable energy resources in smart power supply systems // International Ural Conference on Green Energy (UralCon). IEEE, 2018. Pp. 143-148. doi: 10.1109/URALCON.2018.8544289.
9. Bulatov Y.N., Kryukov A.V., Arsentiev G.O. Intelligent electrical networks based on controlled energy routers // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). IEEE, 2018. doi:10.1109/ICIEAM.2018.8728738.
10. Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Арсентьев Г.О. Распределенная генерация и энергетические роутеры в системах электроснабжения железных дорог. Москва; Берлин: Директ-Медиа, 2020. 172 с.
11. Кирюхин Ю.А., Степанов В.С., Аршинов С.А. Проектирование силовых высокочастотных трансформаторов. Москва; Вологда: Инфра-инженерия, 2019. 152 с.

Поступила в редакцию 25 декабря 2020 г.

INFORMATION IN ENGLISH

APPLICATION OF ENERGY ROUTERS IN ELECTROTECHNICAL COMPLEXES OF AC RAILWAYS

Grigori O. Arsentiev

Post-graduate student, Power Supply and Electrical Equipment Department, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia. E-mail: arsentev_1986@bk.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6841-1477>.

Oleg V. Arsentiev

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Head of the Department, Electric Drive and Electric Transport Department, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia. E-mail: arsenteyevov@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2546-5969>.

Andrey V. Kryukov

D. Sc. (Engineering), Professor, Power Supply and Electrical Equipment Department, Irkutsk National Research Technical University, Transport Electric Engineering Department, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia. E-mail: and_kryukov@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6543-1790>.

Currently, Smart Grid technologies based on energy flow management, the use of distributed generation units and semiconductor converting devices designed to improve the quality of electricity and the reliability of the work of electrical complexes are actively applied in the electric power industry. One of the technologies of Smart Grid is the creation of energy routers that can actively influence the parameters of electricity and its consumption modes. They include special transformers and controlled converters and are designed to manage energy consumption, connect distributed generation units and provide two-way energy flows. The results of a computer and experimental study of energy routers with high-frequency transformers designed for intelligent power supply systems are presented. The issues of improving the quality of electricity in networks of non-traction consumers of railways through the use of energy routers are considered. The results obtained confirm the possibility of using energy routers for power supply of railway facilities with increased requirements for the quality of electricity. On the basis of computer research, it has been shown that the use of intelligent elements in the power supply systems of non-traction consumers allows us to solve problems of improving the quality and reliability of energy supply of railway transport facilities. The use of energy routers for power supply to responsible consumers makes it possible to completely eliminate problems with the quality of electricity. The developed model of an energy router can be used to analyze the modes of power supply systems equipped with these devices. The results of experimental studies of the operation of the high-frequency transformer confirmed its compliance with the calculated parameters. The effect of using such transformers in consumer electrical complexes leads to a significant reduction in overall dimensions. The measurements showed that the high-frequency transformer fully complies with the calculated data: the voltage pulses have a pronounced rectangular character, the signal is transmitted through the magnetic circuit without distortion in shape and phase shift angle, the frequency was 12.07 kHz.

Keywords: electrotechnical complexes of railway power supply systems, energy router, high-frequency transformer, modeling, power quality.

REFERENCES

1. Wang J., Huang A.Q., Sung W., Liu Y., Baliga B.J. Smart grid technologies. *IEEE Industrial Electronics Magazine*. Vol. 3. No. 2. Pp. 16-23. doi: 10.1109/MIE.2009.932583.
2. Buchholz B.M., Styczynski Z.A. *Smart Grids – Fundamentals and Technologies in Electricity Networks*. Springer, Verlag Berlin Heidelberg, 2014. 396 p. doi: 10.1002/ente.201402181.
3. Xu Y., Zhang J., Wang W., Juneja A., Bhattacharya S. Energy router: Architectures and functionalities toward Energy Internet. 2011 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm), Brussels, Belgium. 2011. pp. 31-36. doi: 10.1109/SmartGridComm.2011.6102340.
4. Huang A.Q., Crow M.L., Heydt G.T., Zheng J.P., Dale S.J. The future renewable electric energy delivery and management (FREEDM) system: The energy internet Proceedings of the IEEE. Vol. 99. No. 1. pp. 133-148. doi: 10.1109/JPROC.2010.2081330.
5. Alzola R.P., Gohil G.V., Mathe L., Liserre M., Blaabjerg F. Review of modular power converters solutions for smart transformer in distribution system. 2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, Denver, CO, USA. 2013. Pp. 380-387. doi: 10.1109/ECCE.2013.6646726.
6. Mao X., Falcones S., Ayyanar R. Energy-based control design for a solid state transformer. IEEE PES General Meeting, Minneapolis, MN, USA. 2010. Pp. 1-7, doi: 10.1109/PES.2010.5590097.
7. Bansode S.G., Joshi P.M. Solid state transformers: new approach and new opportunity // Proceedings of 11th IRF International Conference. India: Pune, 2014. Pp. 15-21. https://www.digitalxplore.org/up_proc/pdf/84-140299091015-21.pdf.
8. Bulatov Y.N., Kryukov A.V., Arsentiev G.O. Use of power routers and renewable energy resources in smart power supply systems. 2018 International Ural Conference on Green Energy (UralCon), Chelyabinsk, Russia. 2018. Pp. 143-148. doi: 10.1109/URALCON.2018.8544289.
9. Bulatov Y.N., Kryukov A.V., Arsentiev G.O. Intelligent electrical networks based on controlled energy routers. 2018 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Moscow, Russia. 2018. Pp. 1-5. doi: 10.1109/ICIEAM.2018.8728738.
10. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Arsentiev G.O. *Raspredeleniye generatsiya i energeticheskie routery v sistemakh elektrostabzheniya zheleznykh dorog* [Distributed generation and power routers in railway power supply system]. Moscow, Berlin, Direct Media Publ., 2019. 172 p. (in Russian)
11. Kiryukhin Yu.A., Stepanov V.S., Arshinov S.A. *Proektirovaniye silovykh vysokochastotnykh transformatorov* [Design of power high-frequency transformers]. Moscow, Vologda, Infra-engineeriya Publ., 2019. 152 p. (in Russian)

Арсентьев Г.О., Арсентьев О.В., Крюков А.В. Применение энергетических роутеров в электротехнических комплексах железных дорог переменного тока // Электротехнические системы и комплексы. 2021. № 1(50). С. 10-15. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-1\(50\)-10-15](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-1(50)-10-15)

Arsentiev G.O., Arsentiev O.V., Kryukov A.V. Application of Energy Routers in Electrotechnical Complexes of AC Railways. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2021, no. 1(50), pp. 10-15. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-1\(50\)-10-15](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-1(50)-10-15)

Безъязычный В.С., Троицкий А.И.

Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М.И. Платова, г. Новочеркасск

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОМ УСЛОВНО-ПОСТОЯННЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ МОДУЛЯ «ТРАНСФОРМАТОР – НАГРУЗКА» С ДВОЙНЫМ ПРИВЕДЕНИЕМ ЕГО ПАРАМЕТРОВ

Распределительные электрические сети – совокупность модулей, каждый из которых включает в себя трансформатор с его нагрузкой. Чем точнее выполнено исследование отдельного модуля, тем достовернее будет результат по их совокупности. В известных в этой области исследованиях используют Т-, Г-образные приведенные схемы замещения модулей. Наиболее точные результаты исследований оказываются при использовании Т-образных схем, но для совокупности модулей затруднено их свёртывание. Г-образные схемы с идеальными трансформаторами предоставляют возможность свёртывать совокупности модулей не только в сетях одного, но и разных классов напряжений. Однако при этом пренебрегают потерями в обмотке высокого напряжения (ВН). Гипотеза исследований заключена в том, чтобы использовать одновременно преимущества обеих схем замещения. Цель исследований – определить зависимость электропотребления модулем и потерь в трансформаторе от характера нагрузки и совершенствовать их расчёты на предмет эффективности модулей. Для целей исследования использован метод условно-постоянных коэффициентов (УПК), разработанный в ЮРГПУ (НПИ), а также двойное приведение параметров Г-образной схемы замещения модуля по аналогии с асинхронными электродвигателями в системах электропривода. Моделирование режимов электропотребления методом УПК с использованием программного комплекса MathCad позволило решить некоторые актуальные задачи в системах электроснабжения. Например, как на основе каталожных данных по коэффициенту рассеяния обмоток ВН и НН выбирать энергосберегающий трансформатор на стадии проектирования или реконструкции систем электроснабжения. Результаты исследования внедрены в городских электрических сетях г. Майкопа и в учебный процесс.

Ключевые слова: схема замещения, модуль «трансформатор – нагрузка», двойное приведение параметров, потребление и потери мощности, электрические сети, метод УПК.

ВВЕДЕНИЕ

Методы расчётов распределительных сетей постоянно совершенствуются. Например, в работах М.А. Шакирова [1-3] представлена новая теория трансформатора, базирующаяся на понятии вектора Пойтинга, и предложены методы с использованием 2Т- и 4Т-образных схем замещения трансформаторов. Метод условно-постоянных коэффициентов (УПК) разработан на предмет наиболее точного определения потребления и потерь электрической энергии [4, 5]. Его дальнейшее развитие выполнено в работах [3, 6-8].

При расчетах режимов электрических сетей, в целях упрощения свёртывания схем, применяют Г-образную схему замещения, пренебрегая потерями в обмотке высокого напряжения (ВН). Известно, что Т-образная схема замещения является наиболее точной [9-13]. Поскольку через силовые трансформаторы осуществляются транзиты больших потоков мощностей, а число их трансформаций при передаче от генераторов до приемников составляет 4-6 раз, то эту погрешность необходимо учитывать. Для чего рекомендуется метод УПК при использовании Г-образной схемы замещения модуля с двойным приведением её параметров [8].

ПОТРЕБЛЕНИЕ МОЩНОСТИ МОДУЛЕМ «ТРАНСФОРМАТОР – НАГРУЗКА» ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ Г-ОБРАЗНОЙ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ С ДВОЙНЫМ ПРИВЕДЕНИЕМ ЕЁ ПАРАМЕТРОВ

Полная мощность \dot{S}_{TH} модуля «трансформатор – нагрузка» (далее по тексту – «модуля») равна

$$\dot{S}_{\text{TH}} = 3U_1^2 Y_{\text{1ВХ}}^* \quad (1)$$

где U_1 – абсолютное значение напряжения на сетевых зажимах фазы трансформатора; $Y_{\text{1ВХ}}^*$ – входная сопряженная проводимость одной фазы модуля.

Согласно работам [12, 14] входное сопротивление цепи сетевой катушки воздушного трансформатора увеличивается при подключении в цепь нагрузочной катушки приёмника за счёт вносимого им сопротивления. Поскольку оно имеет положительную вещественную часть, отрицательную мнимую часть, то подключение к нагрузочной катушке приёмника приводит к увеличению активного и уменьшению реактивного входного сопротивления цепи сетевой катушки [13] при активно-индуктивном характере нагрузки.

У трансформатора с магнитопроводом закономерность в части вносимого нагрузкой сопротивления сохраняется. При увеличении индуктивной нагрузки снижается совокупное индуктивное сопротивление модуля. Задача отыскания оптимального соотношения между индуктивными сопротивлениями трансформатора и нагрузки требует решения. В качестве критериев приняты потребление мощности модулем и потери мощности в нём.

В отличие от воздушных трансформаторов, входное сопротивление фазы трансформатора с магнитопроводом определяют, используя Т-образную или Г-образную схему замещения с приведением параметров обмотки низкого (НН) и нагрузки к ВН.

При расчетах режимов электрических сетей, в целях удобства свёртывания не только цепей одного напряжения, но и различных напряжений, используют

Г-образную схему замещения одной фазы трансформатора, пренебрегая потерями в обмотке ВН. Их учет возможен при использовании Т-образной схемы замещения. При применении Г-образной схемы с идентичной, как у Т-образной схемы, точностью по критерию потерь в работе [7] предложено двойное приведение параметров Г-образной схемы замещения двухобмоточных трансформаторов по аналогии с асинхронными электродвигателями в системах электропривода [11].

Г-образная схема замещения с двойным приведением параметров одной фазы модуля

В этом случае схема замещения одной фазы модуля имеет вид, показанный на **рис. 1** [8]:

На **рис. 1** приняты следующие обозначения:

- \dot{U}_1 – комплексное напряжение фазы на сетевых зажимах трансформатора;
- Z_0 – полное сопротивление ветви намагничивания;
- Z_1 – полное сопротивление рассеяния обмотки ВН трансформатора;
- Z'_2 – приведенное к ВН полное сопротивление рассеяния обмотки НН;
- Z'_n – приведенное к ВН полное сопротивление нагрузки;
- \dot{I}_2 – ток в цепи нагрузки схемы замещения одной фазы модуля с двойным приведением её параметров;
- \dot{I}_0 – ток в ветви намагничивания;
- \dot{I}_1 – линейный ток модуля;
- K_1 – комплексный коэффициент двойного приведения,

$$K_1 = \frac{Z_1 + Z_0}{Z_0}. \tag{2}$$

Поскольку $Z_1 \ll Z_0$, модуль K_1 имеет значение несколько большее единицы, при этом разница между абсолютным значением K_1 и единицей составляет тысячные доли. Аргумент у K_1 – угол сдвига между ЭДС и напряжением обмотки ВН. Хотя его величина составляет доли градуса, при умножении сопротивлений на коэффициент приведения изменяется их характер.

На основе схемы замещения (см. **рис. 1**) определены входные проводимость $Y_{\text{МВ}}^r$ (вывод её формулы здесь не приводится) и сопротивление $Z_{\text{ГВ}}^r$ модуля, являющееся обратной величиной входной проводимости:

$$Y_{\text{МВ}}^r = \frac{Z_0 + Z'_2 + Z'_n}{Z_0 Z_1 + Z_0 Z'_2 + Z_1 Z'_2 + (Z_0 + Z_1) Z'_n}; \tag{3}$$

$$Z_{\text{МВ}}^r = \frac{Z_0 Z_1 + Z_0 Z'_2 + Z_1 Z'_2 + (Z_0 + Z_1) Z'_n}{Z_0 + Z'_2 + Z'_n}. \tag{4}$$

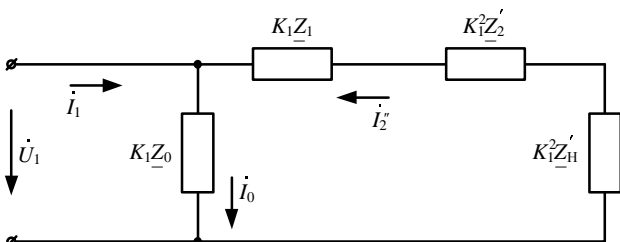


Рис. 1. Г-образная схема замещения одной фазы модуля с двойным приведением её параметров

Полная мощность модуля при использовании Г-образной схемы замещения с двойным приведением её параметров

Линейный ток в сетевой обмотке модуля равен частному от деления напряжения фазы на сопротивление $Z_{\text{ГВ}}^r$, а полная мощность модуля \dot{S}_M пропорциональна квадрату абсолютного значения тока в сетевой обмотке и входному сопротивлению:

$$\dot{S}_M = 3I_{\text{МВ}}^2 Z_{\text{МВ}}^r = 3 \frac{U_1^2 |A|^2 B}{|B|^2 A};$$

$$A = Z_0 + Z'_2 + Z'_n;$$

$$B = Z_0 Z_1 + Z_0 Z'_2 + Z_1 Z'_2 + (Z_0 + Z_1) Z'_n.$$

Сократим числитель и знаменатель дроби правой части последней формулы на комплексное алгебраическое выражение $(Z_0 + Z'_2 + Z'_n)$, после чего она принимает следующий вид:

$$\dot{S}_M = 3U_1^2 \frac{(Z_0^* + (Z'_2)^* + (Z'_n)^*) B}{|B|^2}, \tag{5}$$

где $Z_0^* + (Z'_2)^* + (Z'_n)^*$ – сумма сопряжённых сопротивлений ветви намагничивания и нагрузочной ветви фазы модуля.

Выполним некоторые преобразования в числителе дроби правой части формулы (5). В результате получим тождество:

$$\begin{aligned} & (Z_0^* + (Z'_2)^* + (Z'_n)^*) \times \\ & \times [Z_0 Z_1 + Z_0 Z'_2 + Z_1 Z'_2 + (Z_0 + Z_1) Z'_n] = \\ & = A_1 + B_1 (Z'_n)^2 + B_{2M} r'_n + B_3 x'_n + \\ & + j [A_2 + D_1 (Z'_n)^2 + D_2 r'_n + D_{3M} x'_n], \end{aligned}$$

где $B_{2M} = Z_0^2 + 2B_2$, $D_{3M} = Z_0^2 + 2D_3$, $A_1, A_2, B_1, B_2, B_3, D_1, D_2, D_3$ – условно постоянные коэффициенты (УПК), представляющие собой алгебраические выражения, в состав которых входят сопротивления схемы замещения на **рис. 1**. Формулы УПК приведены в **приложении**.

Полные комплексные сопротивления знаменателя дроби в правой части формулы (5) подменим их алгебраической формой записи, а также выполним ряд алгебраических преобразований, введя дополнительно ещё некоторые обозначения:

$$\begin{aligned} & |Z_0 Z_1 + Z_0 Z'_2 + Z_1 Z'_2 + (Z_0 + Z_1) Z'_n|^2 = \\ & = |G + B_1 r'_n - D_1 x'_n + j(H + D_1 r'_n + B_1 x'_n)|^2, \end{aligned} \tag{6}$$

где $G = 0,5 (B_2 - D_3)$; $H = 0,5 (D_2 + B_3)$.

Доказательство тождества (6) и вычисление квадрата абсолютного значения комплексного выражения под знаком модуля правой части тождества (6) громоздки, здесь не приводятся. При этом были использованы следующие УПК: A_3, C_1, C_2, C_3 (см. **приложение**).

С учётом принятых выше УПК формула полной мощности модуля принимает следующий вид:

$$\begin{aligned} \dot{S}_m &= 3U_1^2 \frac{E + jF}{T}; \\ E &= A_1 + B_1 (\underline{Z}'_n)^2 + B_{2m} r'_n + B_3 x'_n; \\ F &= A_2 + D_1 (\underline{Z}'_n)^2 + D_2 r'_n + D_{3m} x'_n; \\ T &= A_3 + C_1 (\underline{Z}'_n)^2 + C_2 r'_n + C_3 x'_n. \end{aligned} \quad (7)$$

Её компоненты активная и реактивная мощности соответственно равны реальной и мнимой составляющим комплексного выражения правой части равенства (7). Практическое использование формулы (7) возможно, если определены приведенные к ВН значения полного сопротивления нагрузки и его ортогональных составляющих. В условиях эксплуатации, как правило, известны активная и реактивная мощности нагрузки, заданные либо суточным графиком за наиболее загруженную смену, либо статическими характеристиками. Это препятствие устранимо, если для определения приведенных к ВН ортогональных составляющих и модуля сопротивления нагрузки применить формулы

$$\begin{aligned} r'_n &= U_1^2 \frac{P_n}{P_n^2 + Q_n^2}; \\ x'_n &= U_1^2 \frac{Q_n}{P_n^2 + Q_n^2}; \\ Z'_n &= \sqrt{(r'_n)^2 + (x'_n)^2} \end{aligned} \quad (8)$$

и возможности блока программного комплекса Mathcad, позволяющего производить операции как со скалярными, так и с матричными величинами и легко адаптирующегося под решения спектра поставленных задач (изменения расчетных параметров).

Использование модели (7) значительно расширяют возможности исследования режимов модуля, что является безусловным преимуществом метода УПК в сравнении с другими известными методами.

ПОТЕРИ ПОЛНОЙ МОЩНОСТИ В ТРАНСФОРМАТОРЕ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ Г-ОБРАЗНОЙ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ С ДВОЙНЫМ ПРИВЕДЕНИЕМ ЕЁ ПАРАМЕТРОВ

Потери мощности в трансформаторе складываются из потерь в ветвях намагничивания и в нагрузочных его ветвях, за исключением потерь и полных мощностей фаз нагрузки:

$$\Delta \dot{S}_\tau = 3(\underline{Z}_1 K_1 + \underline{Z}'_2 K_1^2) |i_2''|^2 + 3 \underline{Z}_0 K_1 |i_0|^2. \quad (9)$$

Первое слагаемое в правой части формулы (9) – нагрузочные потери, второе слагаемое – потери в режиме холостого хода полной мощности трансформатора.

Выполним в правой части равенства (9) алгебраические преобразования, аналогичные преобразованиям для равенства (5), получим значения потерь полной мощности в трансформаторе в нагрузочном режиме его работы, которое по форме записи аналогично уравнению (7), с той лишь разницей, что в нём произошла подмена B_{2m} и D_{3m} на УПК B_2 и D_3 .

Так как входное сопротивление модуля с использованием Г-образной схемы замещения с двойным приведением её параметров оказалось равным входно-

му сопротивлению Т-образной схемы замещения [4, 5], то формулы потерь в трансформаторе в обоих случаях оказались идентичными.

Метод УПК разработан на кафедре «Электроснабжение и электропривод» ЮРГПУ (НПИ) в 2014 году при использовании Т-образной схемы замещения в целях исследования влияния характера нагрузки на потери мощности в трансформаторах. Успешно апробирован в ряде магистерских диссертаций и при выполнении исследований аспирантами и докторантом кафедры. Материалы по использованию метода УПК составляют значительную часть учебных пособий [4, 5]. Моделирование режимов электропотребления методом УПК с использованием программного комплекса MathCad позволило решить ряд актуальных задач энергосбережения в системах электроснабжения. Например, в статье [6] наглядно показано, как на основе каталожных данных по коэффициенту рассеяния обмоток ВН и НН следует выбирать наиболее энерго-сберегающий трансформатор при проектировании или реконструкции систем электроснабжения.

ПОГРЕШНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛНОЙ МОЩНОСТИ МОДУЛЯ И ЕЁ ПОТЕРЬ В ТРАНСФОРМАТОРЕ ПРИ ОГРАНИЧЕНИИ $\underline{Z}_1 \approx \underline{Z}'_2$

Поскольку обмотки НН и ВН одной фазы стержневого трансформатора расположены коаксиально на стержнях магнитопровода, то в силу закона полного тока приведенное сопротивление обмотки НН несколько меньше сопротивления обмотки ВН. В подавляющем большинстве исследований, например в работах [4, 5, 13], их считают равными. Т-образная схема замещения одной фазы трансформатора становится симметричной, а математические модели – проще, что важно при программировании, так как УПК также принимают более компактный вид.

При этом допущении из равенства (4), если учесть формулу (3), следует, что входное сопротивление трансформатора приближённо равно $2\underline{Z}_1$, поскольку $\underline{Z}_1 / \underline{Z}_0 \rightarrow 0$ в силу неравенства $\underline{Z}_1 \ll \underline{Z}_0$, а абсолютная погрешность

$$\Delta = \frac{1 - Z_0}{Z_0 + Z_1} \quad (10)$$

зависит от коэффициента связи обмоток НН и ВН ($K_{св}$): $\Delta = 1 - K_{св}^2$. Относительная погрешность при определении сопротивлений рассеяния составляет сотые доли процента. Погрешность определения потерь в трансформаторе мощностью 25 кВА, напряжением 10 кВ при использовании Г-образной схемы замещения 1-й фазы трансформатора с одинарным приведением её параметров к ВН в сравнении со случаем двойного приведения её параметров составила 2 % по активной мощности, 1,5 % – по реактивной.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА И ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ, ВЫПОЛНЕННЫХ В РАБОТЕ

Модели потребления полной мощности модуля и её потерь в трансформаторе существенно расширяют возможности исследования как нормальных, так и особых режимов потребления электроэнергии в электрических распределительных сетях. В этом заключается научная новизна исследований, выполненных в данной

работе. Их применение позволяет более скрупулёзно определять потери как в самих трансформаторах, так и в их нагрузке, а также решать целый ряд специфических вопросов систем электроснабжения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Классическая двухчленная формула потерь активной мощности, как сумма потерь мощности холостого хода (ХХ) и потерь короткого замыкания (КЗ), умноженных на квадрат коэффициента загрузки трансформатора, к сожалению, не позволяет анализировать влияние её характера. Метод УПК устраняет этот недостаток, кроме того, с его помощью возможно исследование особых режимов модуля ДТН [4, 5].

Поскольку в электрических системах и сетях широко используют Г-образную схему замещения, то оказалось целесообразным адаптировать метод УПК к расчётам с использованием Г-образной схемы замещения. Причём, таким образом, что результаты расчётов соответствовали бы расчётам по Т-образной схеме.

ПРИЛОЖЕНИЕ

$$A_1 = Z_0^2 (r_1 + r_2') + (Z_2')^2 (r_0 + r_1) + 2r_1 (r_0 r_2' + x_0 x_2');$$

$$A_2 = Z_0^2 (x_1 + x_2') + (Z_1')^2 (x_0 + x_1) + 2x_1 (r_0 r_2' + x_0 x_2');$$

$$A_3 = Z_0^2 Z_1^2 + Z_0^2 (Z_2')^2 + Z_1^2 (Z_2')^2 + 2Z_0^2 (r_1 r_2' + x_1 x_2') + 2Z_1^2 (r_0 r_2' + x_0 x_2') + 2(Z_2')^2 (r_0 r_1 + x_0 x_1);$$

$$B_1 = r_0 + r_1;$$

$$B_2 = 2r_0 r_1 + 2r_0 r_2' + 2r_1 r_2';$$

$$B_3 = 2x_0 r_1 + 2r_0 x_2' + 2r_1 x_2';$$

$$C_1 = Z_0^2 + Z_1^2 + 2(r_0 r_1 + x_0 x_1);$$

$$C_2 = 2Z_0^2 (r_0 + r_2') + 2Z_1^2 (r_0 + r_2') + 4r_2' (r_0 r_1 + x_0 x_1);$$

$$C_3 = 2Z_0^2 (x_0 + x_2') + 2Z_1^2 (x_0 + x_2') + 4x_2' (r_0 r_1 + x_0 x_1);$$

$$D_1 = x_0 + x_1;$$

$$D_2 = 2r_0 x_1 + 2x_0 r_2' + 2x_1 r_2';$$

$$D_3 = 2x_0 x_1 + 2x_0 x_2' + 2x_1 x_2';$$

$$B_{2,m} = Z_0^2 + 2r_0 r_1 + 2r_0 r_2' + 2r_1 r_2' = Z_0^2 + 2B_2;$$

$$D_{3,m} = Z_0^2 + 2x_0 x_1 + 2x_0 x_2' + 2x_1 x_2' = Z_0^2 + 2D_3;$$

$$G = 0,5(B_2 - D_3);$$

$$H = 0,5(D_2 + B_3); \quad L = r_0 + r_2';$$

$$M = x_0 + x_2'.$$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шакиров М.А. 2Т-образные схемы замещения трансформатора // Электричество. 2010. № 5. С. 19-36.
2. Шакиров М.А. Вектор Пойтинга и новая теория трансформатора. Ч.1 // Электричество. 2014. № 9. С. 52-59.
3. Шакиров М.А. Вектор Пойтинга и новая теория трансформатора. Ч.2 // Электричество. 2014. № 10. С. 53-65.
4. Троицкий А.И., Костинский С.С. Безопасная и энергоэффективная эксплуатация систем электроснабжения: учеб. пособие. Новочеркасск: ЮРГПУ (НПИ), 2016. 244 с.
5. Троицкий А.И., Кравченко О.А. Энергосбережение в системах электроснабжения: учеб. пособие. Новочеркасск: ЮРГПУ (НПИ), 2018. 323 с.
6. Оценивание энергоэффективности трансформаторов по КПД и коэффициенту связи обмоток в зависимости от нагрузки / А.И. Троицкий, С.С. Костинский, В.В. Тропин, Н.И. Цыгулёв // Известия вузов. Электромеханика. 2018. Т. 61. № 5. С. 44-49. doi: 10.17213/0136-3360-2018-5-44-49.
7. Безязычный В.С. Двойное приведение параметров Г-образной схемы замещения двухобмоточных трансформаторов // Электроэнергетика глазами молодежи: материалы XI Международной научно-технической конференции. Ставрополь: Северо-Кавказский федеральный университет, 2020. Т. 1. С. 236-239.
8. Безязычный В.С., Костинский С.С., Троицкий А.И. Исследование энергоэффективности модуля «двухобмоточный трансформатор – нагрузка наружного освещения» методом условно-постоянных коэффициентов // Энергоэффективность. Ценология. Экология и энергобезопасность: материалы научной конференции. Астрахань: Сорокин Р.В., 2020 С. 20-31.
9. Вольдек А.И., Попов В.В. Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы: учебник для вузов. СПб.: Питер, 2008. 320 с.
10. Герасименко А.А., Федин В.Т. Передача и распределение электрической энергии: учеб. пособие. М.: КНОРУС, 2012. 648 с.
11. Ильинский Н.Ф., Москаленко В.В. Электропривод: энерго- и ресурсосбережение: учеб. пособие. М.: Издательский центр «Академия», 2008. 208 с.
12. Лейтес Л.В. Электромагнитные расчёты трансформаторов и реакторов. М.: Энергия, 1981. 392 с.
13. Справочное пособие по электротехнике и основам электроники: учеб. пособие / Ермуратский П.В., Косякин А.А., Листвин В.С., Нетушил А.В. М.: Высш. шк., 1986. 248 с.
14. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: учебник. М.: Гардарики, 2006. 702 с.

Поступила в редакцию 15 января 2021 г.

INFORMATION IN ENGLISH

RESEARCH BY THE METHOD OF CONDITIONAL CONSTANTS COEFFICIENTS OF THE TRANSFORMER – LOAD MODULE WITH DOUBLE REDUCTION OF ITS PARAMETERS

Vladimir S. Bezyazychnyy

Postgraduate Student, Power engineering department, Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, Russia.

Anatoliy I. Troitskiy

D.Sc. (Engineering), Professor, Power engineering department, Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, Russia.

Electrical distribution networks is a set of modules, each of which includes a transformer with its load. The more accurately the study of an individual module is performed, the more reliable the result will be in total. In well-known studies in this field, T-shaped and L-shaped reduced module substitution schemes are used. The most accurate research results are obtained when using T-shaped schemes, but for a set of modules, their folding is difficult. L-shaped circuits with ideal transformers provide the ability to roll up sets of modules not only in networks of the same classes, but also different voltage classes. However, the losses in the high-voltage winding (HV) are neglected. The hypothesis of the research lies in the fact that the benefits of the both circuits could be used at the same time.

The purpose of the research is to determine the dependence of the power consumption of the module and the losses in the transformer on the nature of the load and to improve their calculations for the efficiency of the modules. For the purposes of the study, the method of conditionally constant coefficients (CPC) developed at the SRSPU (NPI) was used, as well as the double reduction of the parameters of the L-shaped module replacement circuit by the analogy with asynchronous electric motors in electric drive systems.

Modeling of power consumption modes by the CPC method using the MathCad software package allowed us to solve some actual problems in power supply systems. For example, the choice of an energy-saving transformer at the stage of design or reconstruction of power supply systems based on the catalog data on the scattering coefficient of HV and HH windings.

The results of the study are implemented in the city electric networks of Maykop and in the educational process.

Keywords: substitution scheme, transformer – load module, double reduction of parameters, power consumption and loss, electrical networks, CPC method.

REFERENCES

1. Shakirov M.A. 2T-shaped transformer substitution schemes. *Elektrichestvo* [Electrical Technology Russia], 2010, no. 5, pp. 19-36. (In Russian)
2. Shakirov M.A. Poyting vector and the new theory of the transformer. Part 1. *Elektrichestvo* [Electrical Technology Russia], 2014, no. 9, pp. 52-59. (In Russian)
3. Shakirov M.A. Poyting vector and the new theory of the transformer. Part 2. *Elektrichestvo* [Electrical Technology Russia], 2014, no. 10, pp. 53-65. (In Russian)
4. Troitskiy A.I., Kostinsky S.S. *Bezopasnaya i energoeffektivnaya ekspluatatsiya sistem elektrosnabzheniya* [Safe and energy-efficient operation of power supply system], Novocherkassk, Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI) Publ., 2016. 244 p. (In Russian)

5. Troitskiy A.I., Kravchenko O.A. *Energoberezhenie v sistemakh elektrosnabzheniya* [Energy saving in power supply system]. Novocherkassk, Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI) Publ., 2018. 323 p. (In Russian)
6. Troitskiy A.I., Kostinsky S.S., Tropin V.V., Tsygulev N.I. Evaluation of the energy efficiency of transformers by efficiency and the coupling coefficient of windings depending on the load. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika* [Russian Electromechanics], 2018, vol. 61, no. 5, pp. 44-49. (In Russian). doi: 10.17213/0136-3360-2018-5-44-49.
7. Bez"yazychnyy V.S. Double reduction of the parameters of the L-shaped substitution circuit of two-winding transformers. *Materialy XI Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Elektroenergetika glazami molodezhi"* [Materials of the XI International Scientific and Technical Conference "Electric power industry through the eyes of youth"]. Stavropol North-Caucasus Federal University Publ., 2020, pp. 236-239. (In Russian)
8. Bez"yazychnyy V.S., Kostinsky S.S., Troitskiy A.I. Study of the energy efficiency of the module "two-winding transformer – load of outdoor lighting" by the method of conditionally constant coefficients. *Materialy nauchnoy konferentsii "Energoeffektivnost'. Tsenologiya. Ekologiya i energobezopasnost"* [Materials of the scientific conference "Energy efficiency. Cenology. Ecology and energy security"]. Astrakhan, Sorokin R.V. Publ., 2020, pp. 20-31. (In Russian)
9. Voldek A.I., Popov V.V. *Elektricheskie mashiny. Vvedenie v elektromekhaniku. Mashiny postoyannogo toka i transformatory* [Electric machines. Introduction to electrical engineering. DC machines and transformers]. St. Petersburg, Peter Publ., 2008. 320 p. (In Russian)
10. Gerasimenko A.A., Fedin V.T. *Peredacha i raspredelenie elektricheskoy energii* [Transmission and distribution of electric power]. Moscow, KNORUS Publ., 2012. 648 p. (In Russian)
11. Ilyinsky N.F., Moskalenko V.V. *Elektroprivod: energo- i resursoberezhenie* [Electric drive: energy and resource saving]. Moscow, Publishing center "Academy", 2008. 208 p. (In Russian)
12. Leites L.V. *Elektromagnitnye raschety transformatorov i reaktorov* [Electromagnetic calculations of transformers and reactors]. Moscow, Energiya Publ., 1981. 392 p. (In Russian)
13. Ermuratsky P.V., Kosyakin A.A., Listvin V.S., Netushil A.V. *Spravochnoe posobie po elektrotekhnike i osnovam elektroniki* [Reference manual on electrical engineering and the basics of electronics]. Moscow, Higher School of Economics Publ., 1986. 248 p. (In Russian)
14. Bessonov L.A. *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki. Elektricheskie tsepi*. [Theoretical foundations of electrical engineering. Electrical circuits]. Moscow, Gardariki Publ., 2006. 702 p. (In Russian)

Безъязычный В.С., Троицкий А.И. Исследование методом условно-постоянных коэффициентов модуля «трансформатор – нагрузка» с двойным приведением его параметров // Электротехнические системы и комплексы. 2021. № 1(50). С. 16-20. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-1\(50\)-16-20](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-1(50)-16-20)

Bezyazychnyy V.S., Troitskiy A.I. Research by the Method of Conditional Constants Coefficients of the Transformer – Load Module with Double Reduction of its Parameters. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2021, no. 1(50), pp. 16-20. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-1\(50\)-16-20](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-1(50)-16-20)

Корнилов Г.П., Газизова О.В., Абдулвелеев И.Р., Бунин А.А., Лыгин М.М.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

РАСШИРЕНИЕ СВОЙСТВ ФИЛЬТРОКОМПЕНСИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ В СИСТЕМАХ ВНУТРИЗАВОДСКОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Одним из наиболее энергоемких производств металлургического предприятия является кислородно-конвертерное. Потребители электроэнергии таких цехов предъявляют высокие требования к качеству напряжения. В то же время электроприемники таких цехов могут существенно снижать показатели качества электроэнергии. В представленной работе оценен уровень напряжения в действующей сети кислородно-конвертерного цеха напряжением 10 кВ. Выявлено снижение напряжения ниже уровня, допустимого по условиям работы электроприемников. Определены причины снижения напряжения в условиях работы сети сложной конфигурации. Разработана математическая модель для исследования показателей качества электроэнергии рассматриваемого цеха с учетом характеристик питающей сети. Исследовано влияние уровня напряжения питающей сети, регулирующего эффекта нагрузки, мощности нагрузки и конфигурации питающей сети на уровень напряжения. Разработан комплекс мероприятий по повышению качества напряжения. С учетом показателей качества электроэнергии рекомендованы к установке компенсирующие устройства. Произведено технико-экономическое сравнение вариантов установки компенсирующих устройств с учетом потерь мощности и электроэнергии в питающей и распределительной сети цеха. Оценен общий уровень потерь в составе электропотребления кислородно-конвертерного цеха. Показано его снижение при внедрении рекомендованных мероприятий.

Ключевые слова: кислородно-конвертерный цех, качество напряжения, потери мощности и электроэнергии, потребление электроэнергии, компенсирующие устройства.

ВВЕДЕНИЕ

Совершенствование систем управления технологическими режимами и повышение энергоемкости цехов металлургических предприятий повышает требования к поддержанию качества электроэнергии на шинах главных понизительных подстанций. Повышенные требования к поддержанию уровня напряжения на шинах 10 кВ обусловлены тем, что большая часть цеховых электроприемников – крановые асинхронные двигатели, тиристорные преобразователи – весьма чувствительны к снижению напряжения. Снижение напряжения для таких приемников может вызвать аварийную ситуацию и простой оборудования. В то же время сами электроприемники обладают характеристиками, снижающими качество электроэнергии в сети. Основная сложность анализа подобных режимов заключается в том, что уровень напряжения цеховой сети зависит от большого количества факторов. К ним относятся уровень напряжения со стороны питающей сети, потребляемая нагрузкой активная и реактивная мощность, регулирующий эффект нагрузки и наличие дополнительных источников реактивной мощности. Задача поддержания заданного уровня напряжения осложняется различными условиями работы питающей сети и невозможностью постоянного использования системы регулирования напряжения питающего трансформатора 110/10 кВ. В рамках данной работы предполагается исследование изложенных вопросов и разработка рекомендаций по обеспечению поддержания показателей качества напряжения заводской сети.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ

Исследованию влияния параметров электроприемников и характеристики питающей сети на уровень

напряжения посвящено большое число работ отечественных и зарубежных ученых. Работа [1] посвящена разработке нового метода расчета параметров гармонических фильтров статического компенсатора дуговой печи. В труде [2] изложены вопросы экспериментального исследования электромагнитной совместимости современных электроприводов, применяемых в системе электроснабжения металлургического предприятия. Технико-экономическое сравнение компенсирующих устройств для дуговых печей широкого класса мощности показано в работе [3]. Работа [4] излагает новый метод контроля состояния стабильности напряжения шины взаимосвязанной энергосистемы с использованием измерений переменных шин. Исследованию оптимального местоположения и настройки STATCOM с помощью улучшения устойчивости переходных процессов на основе генетического алгоритма посвящена работа [5]. Вопросы управления изложены в трудах [6], представляющем обобщенную схему управления активными фронтальными многоуровневыми преобразователями, и [7], показывающем эффективный метод торможения для управляемых приводов переменного тока с передней панелью диодного выпрямителя. Вопросы управления выпрямителями представлены в трудах [8-10]. В них показано управление активным входным выпрямителем при несбалансированном напряжении питания и пульсациях постоянного тока и при несбалансированном напряжении сети с использованием интеллектуального управления током. Вопросам устранения пульсаций и коррекции коэффициента мощности посвящены работы [11-13]. Анализ электромагнитной совместимости цепи переменного и постоянного тока посвящены работы [14, 15]. Особую роль при выборе параметров компенсирующих устройств играют резонансы в мощной активной выпрямительной системе с активным фронтом, изложенные в [16]. Метод полуволновой симметрии SHE-PWM для многоуровневых преобразователей напряжения

© Корнилов Г.П., Газизова О.В., Абдулвелеев И.Р., Бунин А.А., Лыгин М.М., 2021

изложен в работе [17]. Моделированию прогнозирующего управления выпрямителем AFE с динамическими ссылками посвящен труд [18]. Работа DFIG, подключенного к сети, в условиях несбалансированного напряжения сети изложена в труде [19]. Стратегии управления, основанные на симметричных компонентах для преобразователей, подключенных к сети, при провалах напряжения показаны в работе [20].

Очевидно, что большая часть работ исследует влияние отдельных показателей на уровень напряжения. Данная работа предполагает комплексное исследование факторов, определяющих уровень напряжения в разветвленной цеховой сети. Также предполагается разработка мероприятий по повышению качества напряжения. Альтернативным средством повышения и стабилизации напряжения на шинах 10 кВ является использование конденсаторов в составе фильтров высших гармоник, настроенных на 5-ю и 7-ю гармоники. При этом необходимо выполнить расчет установленной мощности, выбор конфигурации дополнительных устройств компенсации реактивной мощности, а также мест их установки.

ОПИСАНИЕ ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объекта исследования была выбрана система электроснабжения кислородно-конвертерного цеха. Источником питания главной понизительной подстанции является сетевая подстанция 110 кВ с мощностью короткого замыкания 6000 МВА и сложной конфигурацией. В связи с этим уровни напряжения на вводах подстанции могут изменяться от 104 до 116 кВ. От питающей подстанции до главной понизительной подстанции цеха проложены кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена длиной 840 м. На главной понизительной подстанции установлены два понижающих трансформатора установленной мощностью 80 МВА каждый. Далее к шинам распределительного устройства 10 кВ проложены кабели по 100 м с изоляцией из сшитого полиэтилена и последовательно с целью снижения токов короткого замыкания подключены реакторы. Основными электроприемниками цеха являются асинхронные двигатели мощностью от 400 до 3150 кВт, комплектные трансформаторные подстанции 10/0,4 кВ, выпрямительные подстанции, полупроводниковые преобразователи серии КТЭ, три синхронных двигателя управляемых частотными преобразователями мощностью 5600 кВт. Суммарная максимальная активная мощность нагрузки достигает 80 МВт, реактивная 64 Мвар. Нагрузка в системе электроснабжения цеха имеет спокойный характер, без сильных набросов. Основная часть потребителей относится к первой и второй категориям электроснабжения.

Перерыв в электроснабжении практически любого электроприемника приводит к простоям основного оборудования и недовыпуску либо снижению качества продукции. Наиболее ответственными потребителями являются: шламовая насосная станция, насосно-фильтровальная станция, блок очистных сооружений, кислородная компрессорная станция №7, насосная высокого давления, дымососы конвертерного отделения, паросилового цеха, а также потребители конвертерного отделения и непрерывной разливки стали. Перерыв в электроснабжении каждого из этих электроприемников

приведет к длительным простоям всего основного оборудования ККЦ. К наиболее чувствительным к качеству электрической энергии и к снижению напряжения на шинах подстанции можно отнести тиристорные преобразователи и краны, работающие на переменном напряжении без частотного регулирования. В частности, крановая нагрузка транспортно-отгрузочной линии.

Как было отмечено ранее, основной проблемой данного объекта является поддержание напряжения на шинах цеховой подстанции 10 кВ на заданном уровне. В условиях кислородно-конвертерного цеха оптимальный уровень напряжения на шинах 10 кВ лежит в пределах 9,8-10 кВ. Причем в силу технических причин встречное регулирование напряжения трансформатора 80 МВА исключено. Увеличение напряжения на шинах до 10,4 кВ на практике не приводит к видимым негативным процессам. Повышение напряжения на шинах 10 кВ выше 10,5-10,6 кВ нередко влечет за собой сокращение срока службы и выход из строя тормозных соленоидов, катушек контакторов в оперативных цепях на кранах, питаемых от сети переменного напряжения, в частности транспортно-отгрузочной линии. Однако снижение напряжения на шинах 10 кВ подстанции ниже 9,6 также влечет за собой негативные последствия, выражающиеся в заметном снижении скорости и момента электродвигателей кранового и другого оборудования. Возникают отказы в работе кранового оборудования по причине отпадания сердечников контакторов или недостаточного прижима. При снижении напряжения на шинах 10 кВ ниже 9,4 кВ возникают отказы тиристорных преобразователей и преобразователей частоты. Также в нормальных режимах работы при снижении напряжения ниже 9,8, возникает вопрос о снижении надежности электроснабжения. Это связано с тем, что если один из трансформаторов выйдет из работы, то напряжение снизится до 9,3-9,2 кВ. Работа на таком уровне напряжения может повлечь за собой череду отказов в работе различного оборудования.

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ МЕТОДЫ И МЕТОДИКИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ. ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Наличие большого количества электроприемников на основных секциях 10 кВ и отсутствие достоверной информации о режимах электропотребления обусловили необходимость проведения экспериментальных исследований для уточнения фактических значений тока, активной и реактивной мощностей электроприемников, а также напряжения на 1-4 сборных шинах при различных конфигурациях сети, а также напряжения на стороне сети 110 кВ на шинах питающей подстанции. По каждой секции шин произведена подготовка архивных данных по следующим присоединениям: вводные фидеры (ток, активная, реактивная мощности), трансформатор напряжения и напряжение на соответствующей секции на стороне 110 кВ, а также по вводам на все литерные распределительные устройства 10 кВ (ток, активная, реактивная мощности). Все архивные данные синхронизированы по времени с периодичностью в пять секунд. Сбор данных производился в течение суток. Для проведения наиболее полного анализа и выявления зависимости изменения напряжения на секции шин от напряжения со стороны сети

110 кВ и нагрузок на литерных подстанциях были собраны данные во время нормального режима работы сети 10 кВ и для ремонтного режима работы подстанции на одном трансформаторе.

На подстанции 10 кВ цеха системы шин нагружены несколько неравномерно. На 1-й и 2-й системах шин нагрузка несколько выше, чем на 3-й и 4-й. Также на 1-й и 2-й системах шин основная нагрузка имеет индуктивный характер, это асинхронные двигатели насосно-фильтровальной станции, ЦВС, кислородная компрессорная, НВД. Коэффициент мощности на данных системах шин находится в пределах 0,73-0,82. На 3-й и 4-й системах шин нагрузка несколько ниже, чем на 1-й и 2-й.

Исходя из этого на первом этапе исследования было решено наибольшее внимание обратить на исследование характера нагрузок и выявить основные параметры и режимы, приводящие к снижению напряжения до уровня 9,4 кВ при штатном режиме сети 10 кВ. На **рис. 1** представлена совокупность графиков изменения напряжения на шинах питающей и цеховой подстанции на одном временном диапазоне.

Для анализа зависимости уровня напряжения на цеховой подстанции 10 кВ от уровня нагрузки и от напряжения на шинах 110 кВ головной подстанции был проведен статистический анализ данных. Одномерный статистический анализ совокупности данных, состоящих из наблюдений и характеризующих их переменных, заключается в рассмотрении каждой отдельной переменной и исследовании их попарной взаимосвязи. Естественно, такой подход весьма ограничен, так как закономерности и взаимосвязи, присущие всей совокупности, невозможно выявить, исследуя каждую переменную в отдельности. Исходя из данных корреляционного анализа, прослеживается ряд зависимостей напряжения на цеховой подстанции, в первую очередь от напряжения в сети 110 кВ (коэффициент корреляции 0,75). Для анализа воздействия на уровень напряжения значений тока, активной и реактивной мощностей по всем присоединениям, а также уровня напряжения на стороне 110 кВ был проведен регрессионный анализ. На основании массива данных найдены оценки этих параметров, статистические ошибки оценок и проверена адекватность этой модели экспериментальным данным.

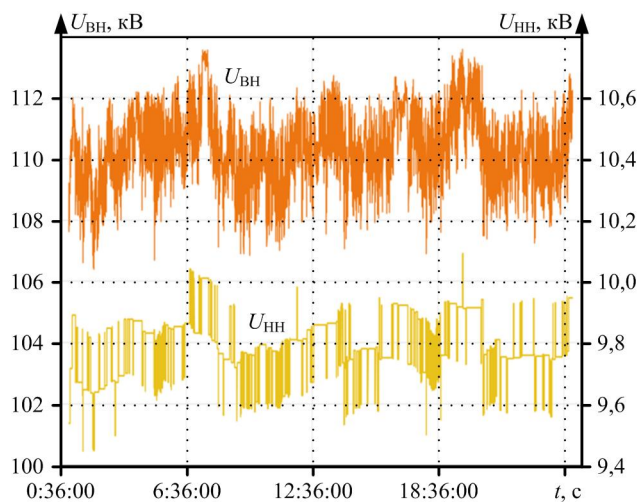


Рис. 1. Изменение напряжения на питающей и цеховой подстанциях

Анализ результатов регрессионного анализа показал, что потребление активной мощности не слишком влияет на уровень напряжения на шинах 10 кВ в нормальном режиме работы. Таким образом, основным по значимости фактором, оказывающим влияние на уровень напряжения 1-й и 2-й секций 10 кВ является напряжение на питающей подстанции 110 кВ. Вторым по значимости фактором является генерация реактивной мощности на уровне 10 кВ собственными компенсирующими устройствами. Поэтому для разработки мероприятий по обеспечению уровня напряжения подстанции необходимо выбрать рекомендуемую мощность компенсирующих устройств в зависимости от напряжения питающей сети и величины нагрузки.

В качестве основного средства регулирования напряжения предлагается использовать фильтрокомпенсирующие устройства различных номинальных мощностей на 5-ю и 7-ю гармоники. Сначала в виде пассивного эксперимента был оценен спектр высших гармоник на цеховой подстанции. С помощью программы просмотра и анализа файлов сигналов SignW версии 3.6 компании ООО «Прософт-Системы» и соответствующего измерительного оборудования был произведен анализ фактического гармонического состава. Далее с целью анализа возможности поддержания напряжения на шинах цеховой подстанции 10 кВ был произведен ряд вычислительных экспериментов с помощью математической модели подстанции и ее нагрузки, созданной в программе «MATLAB». Как показали расчеты, несимметричные составляющие не превышают допустимых значений.

Далее с целью определения мощности компенсирующих устройств проводился ряд расчетов для выбранного наиболее тяжелого режима работы с учетом величины выбранных компенсирующих устройств на основной гармонике. Допустимая область режимов, в которой поддерживается напряжение от 9,8 до 10,4 кВ обеспечивается при мощности компенсирующих устройств 4-8 Мвар на секцию в зависимости от уровня напряжения питающей сети. Результаты расчета наиболее тяжелого режима при работе одного трансформатора приведены на **рис. 2**.

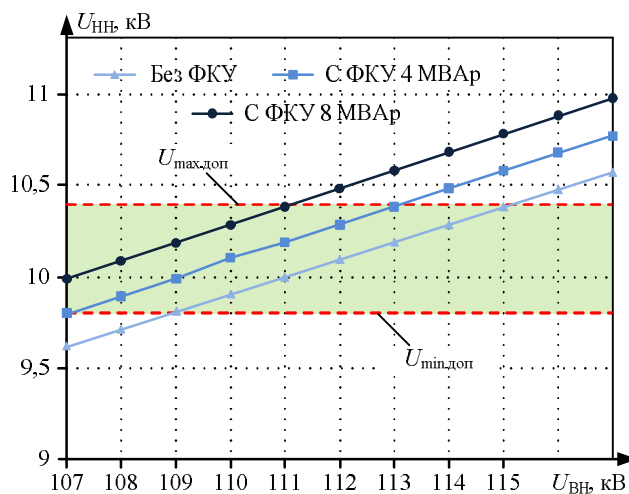


Рис. 2. Изменение напряжения на питающей $U_{ВН}$ и цеховой $U_{НН}$ подстанциях

Как видим, поддержание допустимого уровня напряжения также возможно при установках поперечной компенсации по 8 Мвар на каждую секцию. Аналогичные расчеты были проведены для максимального и минимального режимов работы. Расчеты показали, что при минимальном режиме фильтрокомпенсирующие устройства мощностью 4 Мвар на секцию необходимо отключать при напряжении 114 кВ на шинах питающей подстанции, а мощностью 8 Мвар на секцию необходимо отключать при напряжении 112 кВ.

Таким образом, для технико-экономического обоснования были приняты фильтрокомпенсирующие устройства мощностью 4 и 8 Мвар на секцию с равномерным распределением мощностей по 5-й и 7-й гармоникам. Кроме того, расчеты показали относительно невысокий уровень высших гармоник. Поэтому в качестве альтернативного был принят вариант нерегулируемых батарей статических компенсаторов такой же мощности.

В ходе технико-экономического сравнения учитывались потери в питающих кабелях 110 и 10 кВ, трансформаторах главной понизительной подстанции и в самих фильтрокомпенсирующих устройствах. Кроме того, установка компенсирующих устройств 4 Мвар на секцию позволит повысить уровень напряжения на 2%, а 8 Мвар – на 4 %. Это повлияет на уровень токов, потерь в кабелях и цеховых трансформаторах. Потери в данных элементах также были учтены при проведении расчетов.

Таким образом, установка компенсирующих устройств суммарной мощностью 16 Мвар позволит снизить потери электроэнергии в цехе на 5,92% и потребление электроэнергии цехом на 0,15%. Увеличение суммарной мощности компенсирующих устройств в два раза позволит снизить потери соответственно на 7,8 и 0,2%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Произведен анализ качества напряжения системы электроснабжения кислородно-конвертерного цеха. Опыт эксплуатации показал, что для нормальной работы диапазон изменения напряжения на шинах подстанции должен составлять 9,8-10,4 кВ. Показано, что при большой пропускной способности трансформаторов главной понизительной подстанции 110/10 кВ уровень напряжения на цеховой подстанции 10 кВ определяется прежде всего напряжением питающей сети, а также мощностью компенсирующих устройств. Определена мощность компенсирующих устройств, необходимая для поддержания заданного уровня напряжения.

Установка компенсирующих устройств помимо снижения потерь мощности и электроэнергии в питающей сети приводит к повышению уровня напряжения в целом на стороне 10 кВ. Это ведет к изменению мощности потребителей в соответствии с их статическими характеристиками, снижению токов, потерь мощности и электроэнергии в кабелях и трансформаторах цеховой сети. В то же время повышаются емкостные токи кабельных линий и потери холостого хода в трансформаторах.

С учетом данных факторов разработана методика выбора компенсирующих устройств в цеховой сети, имеющей разветвленную сеть. Методика позволяет

определять целесообразность установки компенсирующих устройств с учетом всех видов потерь в цеховой сети, а также источников реактивной мощности. Может быть использована при выборе компенсирующих устройств промышленных цехов.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации для молодых ученых – кандидатов наук МК-499.2020.8.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Николаев А.А., Корнилов Г.П., Денисевич А.С. Разработка усовершенствованной методики расчета параметров фильтрокомпенсирующих цепей статического тиристорного компенсатора электродуговой печи // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». 2018. Т. 18. № 4. С. 89-100. doi: 10.14529/power180410.
2. Экспериментальное исследование электромагнитной совместимости современных электроприводов в системе электроснабжения металлургического предприятия / А.А. Николаев, Г.П. Корнилов, Т.Р. Храшкин, Г.В. Никифоров, Ф.Ф. Муталлапова // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2016. Т. 14. № 4. С. 96-105. doi: 10.18503/1995-2732-2016-14-4-96-105.
3. Корнилов Г.П., Николаев А.А., Пястолова Д.Ю. Технико-экономическое сравнение компенсирующих устройств дуговых печей широкого класса мощности // Электротехнические системы и комплексы. 2016. № 1(30). С. 34-38. doi: 10.18503/2311-8318-2016-1(30)-34-38.
4. Hazarika D. New method for monitoring voltage stability condition of a bus of an interconnected power system using measurements of the bus variables // IET Generation, Transmission & Distribution. 2012. Vol. 6 Is. 10. Pp. 977-985. doi: 10.1049/iet-gtd.2011.0786.
5. Karthikeyan K., Dhal P.K. Investigation of optimal location and tuning of STATCOM by genetic algorithm based transient stability improvement // Journal of Electrical Systems. 2018. 14-2. Pp. 103-117.
6. A generalized control scheme for active front-end multilevel converters / F. Hernandez, T. Moran, J. Espinoza, J. Dixon // 27th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON) 2001. Vol. 2. Pp. 915-920. doi: 10.1109/IECON.2001.975887.
7. Jiang J., Holtz J. An efficient braking method for controlled AC drives with a diode rectifier front end // Conference Record of the 2000 IEEE Industry Applications Conference. Thirty-Fifth IAS Annual Meeting and World Conference on Industrial Applications of Electrical Energy. 2000. Vol. 3. Pp. 1446-1453. doi: 10.1109/IAS.2000.882074.
8. Operating region in active-front-end voltage/current source rectifiers / J.R. Espinoza, G. Joos, M.A. Perez, L.A. Moran // Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE). 2000. Vol. 2. Pp. 459-464. doi: 10.1109/ISIE.2000.930341.
9. Chomat M., Schreier L., Bendl J. Control of active front-end rectifier under unbalanced voltage supply and DC-link pulsations // IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC). 2011. Pp. 324-329. doi: 10.1109/IEMDC.2011.5994868.
10. Power control of an AFE rectifier during unbalanced grid voltage using predictive current control / G. Hunter, R. Peña, I. Andrade, J. Riedemann, R. Blasco-Gimenez // IEEE 24th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE). 2015. Pp. 385-390. doi: 10.1109/ISIE.2015.7281499.
11. AFE rectifier control based on virtual flux direct power control and active power ripple elimination under un-balanced network condition / M.H. Saedinia, M. Mehreganfar, S.A Davari, D.A. Khaburi // 9th Annual Power Electronics,

- Drives Systems and Technologies Conference (PEDSTC). 2018. Pp. 253-258. doi: 10.1109/PEDSTC.2018.8343805.
12. Maklakov A.S., Radionov A.A., Gasiyarov V.R. Power factor correction and minimization THD in industrial grid via reversible medium voltage AC drives based on 3L-NPC AFE rectifiers // 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON). 2016. Pp. 2551-2556. doi: 10.1109/IECON.2016.7793315.
 13. Haijun T., Di H. Study of Control Strategy Based Dual-PWM Converter under Unbalanced Input Voltage Condition // Advances in Electronic Engineering, Communication and Management (EECM). 2011. Vol. 1. Pp. 267-272. doi: 10.1007/978-3-642-27287-5_43.
 14. EMC analysis of 18-pulse AC-DC circuit consisting of three level AFE rectifiers based on PWM-SHE method with three switching angles for quarter-period / A.A. Radionov, A.S. Maklakov, E.A. Maklakova, V.R. Gasiyarov, S.S. Voronin // IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EIconRusNW). 2016. Pp. 659-663. doi: 10.1109/EIconRusNW.2016.7448269.
 15. A Flexible Selective Harmonic Mitigation Technique to Meet Grid Codes in Three-Level PWM Converters / L.G. Franquello, J. Napoles, R.C.P. Guisado, J.I. Leon, M.A. Aguirre // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2007. Vol. 54. No. 6. Pp. 3022-3029. doi: 10.1109/TIE.2007.907045.
 16. Resonances in a high-power active-front-end rectifier system / J.R. Rodriguez, J. Pontt, R. Huerta, G. Alzamora, N. Becker, S. Kouro, P. Cortes, P. Lezana // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2005. Vol. 52. No. 2. Pp. 482-488. doi: 10.1109/TIE.2005.843907.
 17. Fei W., Du X., Wu B. Half-wave symmetry SHE-PWM method for multilevel voltage inverters // Twenty-Fifth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). 2010. Pp. 1732-1735. doi: 10.1109/APEC.2010.5433466.
 18. Model Predictive Control of an AFE Rectifier With Dynamic References / D.E. Quevedo, R.P. Aguilera, M.A. Perez, P. Cortes, R. Lizana // IEEE Transactions on Power Electronics. 2012. Vol. 27. No. 7. Pp. 3128-3136. doi: 10.1109/TPEL.2011.2179672.
 19. Operation of Grid-Connected DFIG Under Unbalanced Grid Voltage Condition / Y. Zhou, P. Bauer, J.A. Ferreira, J. Pierik // IEEE Transactions on Energy Conversion. 2009. Vol. 24. No. 1. Pp. 240-246. doi: 10.1109/TEC.2008.2011833.
 20. Control Strategies Based on Symmetrical Components for Grid-Connected Converters Under Voltage Dips / S. Alepuz, S. Busquets-Monge, J. Bordonau, J.A. Martinez-Velasco, C.A. Silva, J. Pontt, J. Rodriguez // IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, vol. 56, no. 6, pp. 2162-2173. doi: 10.1109/TIE.2009.2017102.

Поступила в редакцию 21 декабря 2020 г.

INFORMATION IN ENGLISH

EXPANDING THE PROPERTIES OF FILTER COMPENSATION DEVICES IN INTERNAL FACTORY POWER SUPPLY SYSTEMS

Gennady P. Kornilov

D.Sc. (Engineering), Professor, Head of the Department, Department of 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>.

Olga V. Gazizova

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: logan_b_7@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9416-672X>.

Ildar R. Abdulvelev

Ph.D. (Engineering), Electric Power Supply of Industrial Enterprises Department, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: leggyild@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2748-6533>.

Aleksandr A. Bunin

Postgraduate student, Electric Power Supply of Industrial Enterprises Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: buninworks1@rambler.ru.

Maxim M. Lygin

Postgraduate student, Electric Power Supply of Industrial Enterprises Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: eligin@ya.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8884-4846>.

One of the most energy-intensive departments of a metallurgical enterprise is the oxygen-converter plant. Consumers of electricity in such workshops have high requirements for the quality of voltage. At the same time, the electric receivers of such workshops can significantly reduce the quality of electricity. The paper estimates the voltage level in the current network of a 10 kV oxygen-converter plant. A decrease in voltage below the permissible level under the operating conditions of electric receivers was revealed. The reasons for voltage reduction in the conditions of a complex network configuration were determined. A mathematical model was developed to study the power quality

indicators of the shop under consideration taking into account the characteristics of the supply network. The influence of the level of supply voltage, the regulating effect of load, power load and configuration of the supply network on the voltage level was investigated. A set of measures to improve the quality of voltage was developed. Compensating devices were recommended for installation taking into account the power quality indicators. A technical and economic comparison of options for installing compensating devices was made taking into account power and electricity losses in the supply and distribution network of the shop. The total level of losses in the power consumption of the

oxygen-converter plant was estimated. It was shown to decrease when implementing the recommended measures.

Keywords: the oxygen-converter plant, voltage quality, power and energy loss, power consumption of the electric power, compensating device.

REFERENCES

1. Nikolaev A.A., Kornilov G.P., Denisevich A.S. Developing of a new calculation method for harmonic filters parameters of arc furnace static var compensator. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya Energetika*. [Bulletin of the South Ural State University. Series: power engineering], 2018, vol. 18, no. 4, pp. 89-100. (In Russian). doi: 10.14529/power180410. (In Russian)
2. Nikolaev A.A., Kornilov G.P., Khramshin T.R., Nikiforov G.V., Mutallapova F.F. Experimental study of electromagnetic compatibility of modern electric drives used in the power supply system of a metallurgical enterprise. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Bulletin of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2016, vol. 14, no. 4, pp. 96-105. (In Russian). doi: 10.18503/1995-2732-2016-14-4-96-105.
3. Kornilov G.P., Nikolaev A.A., Pyastolova D.Y. Technical and Economic Comparison of Compensating Devices For Arc Furnaces in Broad Class of Power. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2016, no. 1(30), pp. 34-38. (In Russian). doi: 10.18503/2311-8318-2016-1(30)-34-38
4. Hazarika D. New method for monitoring voltage stability condition of a bus of an interconnected power system using measurements of the bus variables. *IET Generation, Transmission & Distribution*. 2012. Vol. 6. Is. 10. Pp. 977-985. doi: 10.1049/iet-gtd.2011.0786.
5. Karthikeyan K., Dhal P.K. Investigation of optimal location and tuning of STATCOM by genetic algorithm based transient stability improvement. *Journal of Electrical Systems*. 2018. 14-2. Pp. 103-117.
6. Hernandez F., Moran T., Espinoza J., Dixon J. A generalized control scheme for active front-end multilevel converters. 27th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON) 2001. Vol. 2. Pp. 915-920. doi: 10.1109/IECON.2001.975887.
7. Jiang J., Holtz J. An efficient braking method for controlled AC drives with a diode rectifier front end. Conference Record of the 2000 IEEE Industry Applications Conference. Thirty-Fifth IAS Annual Meeting and World Conference on Industrial Applications of Electrical Energy. 2000. Vol. 3. Pp. 1446-1453. doi: 10.1109/IAS.2000.882074.
8. Espinoza J.R., Joos G., Perez M., Moran L.A. Operating region in active-front-end voltage/current source rectifiers. Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE). 2000. Vol. 2. Pp. 459-464. doi: 10.1109/ISIE.2000.930341.
9. Chomat M., Schreier L., Bendl J. Control of active front-end rectifier under unbalanced voltage supply and DC-link pulsations. IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC). 2011. Pp. 324-329. doi: 10.1109/IEMDC.2011.5994868.
10. Hunter G., Peña R., Andrade I., Riedemann J., Blasco Gimenez R. Power control of an AFE rectifier during unbalanced grid voltage using predictive current control. IEEE 24th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE). 2015. Pp. 385-390. doi: 10.1109/ISIE.2015.7281499.
11. Saeedinia M.H., Mehreganfar M., Davari S.A., Khaburi D.A. AFE rectifier control based on virtual flux direct power control and active power ripple elimination under un-balanced network condition. 9th Annual Power Electronics, Drives Systems and Technologies Conference (PEDSTC). 2018. Pp. 253-258. doi: 10.1109/PEDSTC.2018.8343805.
12. Maklakov A.S., Radionov A.A., Gasiyarov V.R. Power factor correction and minimization THD in industrial grid via reversible medium voltage AC drives based on 3L-NPC AFE rectifiers. 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON). 2016. Pp. 2551-2556. doi: 10.1109/IECON.2016.7793315.
13. Haijun T., Di H. Study of Control Strategy Based Dual-PWM Converter under Unbalanced Input Voltage Condition. *Advances in Electronic Engineering, Communication and Management (EECM)*. 2011. Vol. 1. Pp. 267-272. doi: 10.1007/978-3-642-27287-5_43.
14. Radionov A.A., Maklakov A.S., Maklakova E.A., Gasiyarov V.R., Voronin S.S. EMC analysis of 18-pulse AC-DC circuit consisting of three level AFE rectifiers based on PWMSHE method with three switching angles for quarter-period. IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EIconRusNW). 2016. Pp. 659-663. doi: 10.1109/EIconRusNW.2016.7448269.
15. Franquelo L.G., Napoles J., Guisado R.C.P., Leon J.L., Aguirre M.A. A Flexible Selective Harmonic Mitigation Technique to Meet Grid Codes in Three-Level PWM Converters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2007. Vol. 54. No. 6. Pp. 3022-3029. doi: 10.1109/TIE.2007.907045.
16. Rodriguez J.R., Pontt J., Huerta R., Alzamora G., Becker N., Kouro S., Cortes P., Lezana P. Resonances in a high-power active-front-end rectifier system. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2005. Vol. 52. No. 2. Pp. 482-488. doi: 10.1109/TIE.2005.843907.
17. Fei W., Du X., Wu B. Half-wave symmetry SHE-PWM method for multilevel voltage inverters. Twenty-Fifth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). 2010. Pp. 1732-1735. doi: 10.1109/APEC.2010.5433466.
18. Quevedo D.E., Aguilera R.P., Perez M.A., Cortes P., Lizana R. Model Predictive Control of an AFE Rectifier With Dynamic References. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2012. Vol. 27. No. 7. Pp. 3128-3136. doi: 10.1109/TPEL.2011.2179672.
19. Zhou Y., Bauer P., Ferreira J.A., Pierik J. Operation of Grid-Connected DFIG Under Unbalanced Grid Voltage Condition. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2009. Vol. 24. No. 1. Pp. 240-246. doi: 10.1109/TEC.2008.2011833.
20. Alepuz S., Busquets-Monge S., Bordonau J., Martinez-Velasco J.A., C.A. Silva, Pontt J., Rodriguez J. Control Strategies Based on Symmetrical Components for Grid-Connected Converters Under Voltage Dips. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, vol. 56, no. 6, pp. 2162-2173. doi: 10.1109/TIE.2009.2017102.

Расширение свойств фильтрокомпенсирующих устройств в системах внутривзаводского электро-снабжения / Г.П. Корнилов, О.В. Газизова, И.П. Абдулвелеев, А.А. Бунин, М.М. Лыгин // *Электротехнические системы и комплексы*. 2021. № 1(50). С. 21-26. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-1\(50\)-21-26](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-1(50)-21-26)

Kornilov G.P., Gazizova O.V., Abdulvelev I.R., Bunin A.A., Lygin M.M. Expanding the Properties of Filter Compensation Devices in Internal Factory Power Supply Systems. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2021, no. 1(50), pp. 21-26. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-1\(50\)-21-26](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-1(50)-21-26)

ДВОЙНАЯ ИНВЕРТОРНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ПИТАНИЯ ШАГОВОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С УМЕНЬШЕННЫМ НАПРЯЖЕНИЕМ ЗВЕНА ПОСТОЯННОГО ТОКА

В настоящее время для биполярного управления шаговыми двигателями (ШД) широко применяется мостовая схема соединения силовых элементов. Среди недостатков данного решения можно отметить малый диапазон скоростей, достижимых при фиксированной нагрузке для шагового электропривода, образующийся высокий размах пульсаций фазного напряжения и, как следствие, высокие динамические потери в полупроводниковом преобразователе, а также высокий размах пульсаций генерируемого электроприводом момента. Указанные особенности, а также значительная величина реактивной составляющей мощности, потребляемой ШД при высоких скоростях вращения вала, указывают на целесообразность последовательного включения в состав классической преобразовательной системы дополнительных инверторов (по одному на каждую фазу электродвигателя), компенсирующих потребляемую ШД реактивную энергию. Целью данной работы является исследование возможности применения двойной инверторной системы в электроприводе на основе ШД, а также синтез алгоритма векторного управления ШД, адаптированного для работы с данным преобразователем. Проверка работоспособности и оценка показателей работы предложенной инверторной системы в сравнении с классической мостовой схемой проводилась методом сравнительного имитационного моделирования в графической среде *Matlab/Simulink*. Результаты имитационного моделирования указывают на сокращение потерь в преобразовательной части на 30%, уменьшение размаха пульсаций генерируемого момента и увеличение диапазона скоростей вращения вала при работе электропривода с применением двойной инверторной системы со сравнительно меньшим напряжением звена постоянного тока. Предложенный алгоритм работы предусматривает регулирование напряжения звеньев постоянного тока дополнительных инверторов для уменьшения размаха пульсаций напряжения на обмотках двигателя и снижения динамических потерь в преобразователе. Предположительными областями применения данного преобразователя являются автономные промышленные объекты, автономные робототехнические системы, системы аэрокосмической отрасли и т.д.

Ключевые слова: шаговый электродвигатель, мостовой преобразователь, двойная инверторная система, автономные инверторы напряжения, векторное управление, сдвоенные инверторы напряжения.

ВВЕДЕНИЕ

Шаговые электродвигатели (ШД) по причине низкой стоимости их изготовления и простоте организации разомкнутых систем управления широко используются в робототехнике, станках с числовым программным управлением, промышленных системах автоматизации, бытовой технике и т.д. [1, 2].

Характерной эксплуатационной особенностью ШД по сравнению с другими типами электродвигателей является существенное увеличение импеданса фазы на средних и высоких скоростях вращения вала, что обусловлено высоким эквивалентным числом пар полюсов (обычно 50 и более). Таким образом, значительная (а иногда – большая) часть энергии, генерируемая преобразователем, является реактивной и не участвует в образовании электромагнитного момента.

С другой стороны, интенсивное развитие силовой полупроводниковой техники открывает новые возможности в сфере исследований систем электропривода с нестандартной схемой силовой части преобразовательной [3-9]. Так, например, в работах [4-9] исследуется перспективная схема силовой части электропривода на основе электрической машины с разомкнутыми обмотками, питаемой от преобразовательной системы, состоящей из двух трехфазных инверторов, использующих независимые источники питания для соответствующих звеньев постоянного тока. Интересен тот факт, что в подобных системах один из инверторов может работать вообще без источника питания в

звене постоянного тока [9], компенсируя реактивную энергию электрической машины. Преимуществами таких систем по сравнению с классической схемой преобразовательной части является увеличенный диапазон скоростей вращения вала электродвигателя, повышенная отказоустойчивость, сниженные динамические потери преобразователя.

Данная работа посвящена исследованию возможности и целесообразности применения дополнительного преобразователя в составе инверторной системы для компенсации реактивной энергии электропривода на основе ШД, а также синтез модифицированной версии алгоритма векторного управления ШД, адаптированной для работы с двойной инверторной системой.

СТРУКТУРА ЭЛЕКТРОПРИВОДА И АЛГОРИТМ РАБОТЫ

Силовая часть исследуемого преобразователя для питания двухфазного ШД приведена на **рис. 1**.

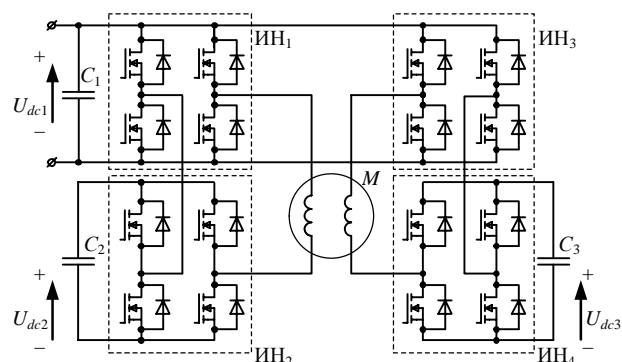


Рис. 1. Силовая часть исследуемой инверторной системы

Схема содержит четыре полномостовых инвертора ИН₁–ИН₄ – по два на каждую фазу электродвигателя. Звено постоянного тока основных инверторов ИН₁ и ИН₃ подключено к источнику питания, тогда как к звеньям постоянного тока дополнительных инверторов ИН₂ и ИН₄ подключены только конденсаторы C_2 и C_3 соответственно. Инверторы ИН₁ и ИН₂ соединены последовательно с одной из обмоток ШД, их генерируемые напряжения складываются. Аналогично для инверторов ИН₃ и ИН₄.

В данной работе предполагается, что система управления получает информацию о текущем положении ротора электродвигателя (например, от соответствующего датчика или наблюдателя состояния). Для управления данной инверторной системой предлагается использовать специальным образом адаптированное векторное управление электродвигателем. При векторном управлении в зоне ослабления поля векторная диаграмма, описывающая уравнение статорной цепи принимает вид, изображенный на **рис. 2**.

Регулятор тока формирует вектор напряжения задания $\bar{u}_{dq.ref}$ (в относительных единицах) в осях ротора dq таким образом, чтобы формировать заданный вектор тока статора \bar{i} , содержащий компоненты i_d (ослабления поля ротора ψ_m) и i_q (создания электромагнитного момента). Поскольку инверторы ИН₂ и ИН₄ не обладают собственными источниками электроэнергии, необходимо управлять ими таким образом, чтобы они компенсировали потребляемую реактивную мощность электродвигателя и не генерировали при этом активную мощность. Для этого необходимо разбить вектор напряжения задания $\bar{u}_{dq.ref}$ на проекции $u_{d'.ref}$ и $u_{q'.ref}$ по осям d' и q' , направленным по вектору тока статора \bar{i} , согласно уравнению

$$\begin{bmatrix} u_{d'.ref} \\ u_{q'.ref} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\varphi_i) & \sin(\varphi_i) \\ -\sin(\varphi_i) & \cos(\varphi_i) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{d.ref} \\ u_{q.ref} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где $u_{d.ref}$, $u_{q.ref}$ – проекции вектора напряжения задания $\bar{u}_{dq.ref}$, о.е., в осях ротора dq ; φ_i – угол поворота системы координат $d'q'$ относительно системы координат dq , рад.

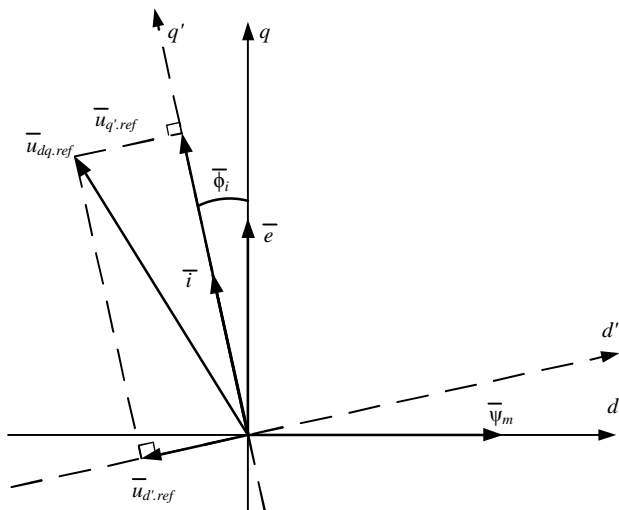


Рис. 2. Векторная диаграмма цепи статора ШД

В общем случае (модуль вектора $\bar{u}_{d'.ref}$ не превышает единицу) векторы управления основной группой инверторов ИН1 и ИН3 $\bar{u}_{main.inv}$, о. е., и дополнительной группой инверторов ИН2 и ИН4 $\bar{u}_{aux.inv}$, о. е., определяются согласно выражению

$$\begin{cases} |\bar{u}_{d'.ref}| \leq 1, \\ \bar{u}_{main.inv} = \bar{u}_{q'.ref}, \\ \bar{u}_{aux.inv} = \bar{u}_{d'.ref}. \end{cases} \quad (2)$$

При этом основная инверторная группа генерирует только активную мощность, а вспомогательная инверторная группа – только реактивную мощность. Векторы генерируемого выходного напряжения основной и дополнительной инверторной группы при этом расположены друг относительно друга под прямым углом.

В зависимости от соотношений напряжения питания преобразователя, конструктивных параметров электрической машины и режима работы электропривода могут возникать ситуации, при которых модуль вектора $\bar{u}_{d'.ref}$ превышает единицу, что означало бы работу инверторов ИН2 и ИН4 в режиме овермодуляции. Чтобы этого не происходило, система управления формирует векторы управления основной группой инверторов ИН1 и ИН3 $\bar{u}_{main.inv}$, о.е., и дополнительной группой инверторов ИН2 и ИН4 $\bar{u}_{aux.inv}$, о.е., согласно выражению

$$\begin{cases} |\bar{u}_{d'.ref}| > 1, \\ \bar{u}_{main.inv} = \bar{u}_{q'.ref} + \bar{u}_{d'.ref} - \frac{\bar{u}_{d'.ref}}{|\bar{u}_{d'.ref}|}, \\ \bar{u}_{aux.inv} = \frac{\bar{u}_{d'.ref}}{|\bar{u}_{d'.ref}|}. \end{cases} \quad (3)$$

При этом вектор задания дополнительной группы преобразователей формируется из вектора $\bar{u}_{d'.ref}$, ограниченного по модулю единицей, а вектор задания основной группы инверторов – из суммы оставшейся части вектора $\bar{u}_{d'.ref}$ и вектора $\bar{u}_{q'.ref}$. Таким образом, при полной загрузке дополнительных инверторов основные инверторы ИН₁ и ИН₃ начинают вырабатывать не только активную, но и реактивную мощность. Векторы генерируемого выходного напряжения основной и дополнительной инверторной группы при этом расположены друг относительно друга под некоторым острым углом.

Функциональная схема предлагаемой в данной работе системы управления преобразователем представлена на **рис. 3**. Основные инверторы ИН₁, ИН₃, а также вспомогательные инверторы ИН₂ и ИН₄ на данной схеме объединены в группы попарно. Каждая из этих инверторных групп генерирует напряжение в статорной системе координат ab шагового двигателя ШД согласно описанию, приведенному выше. Датчики тока, установленные в каждую из фаз ШД, образуют вектор тока статора \bar{i}_{ab} . Алгоритм, описанный выражениями (2) и (3), на функциональной схеме не отражен.

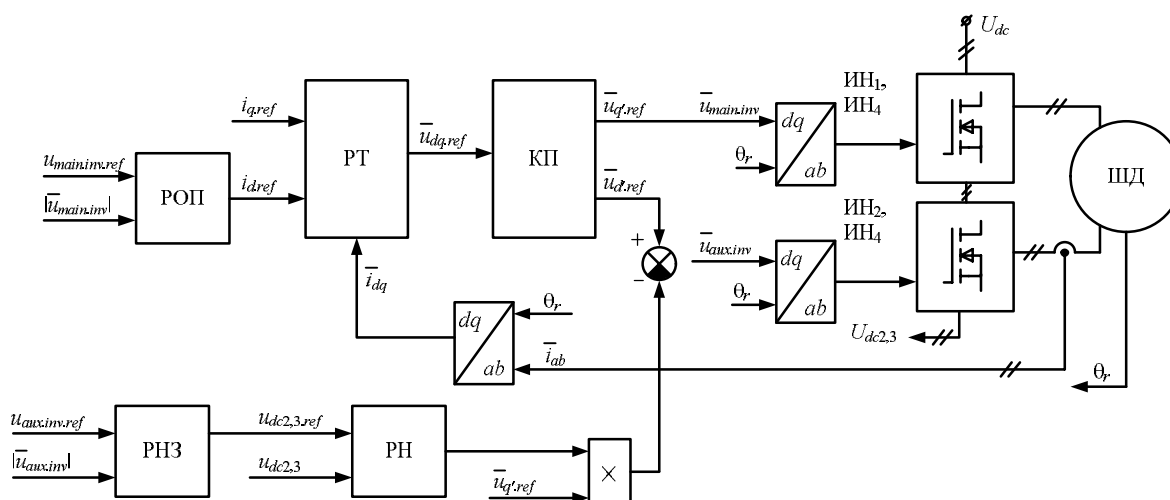


Рис. 3. Функциональная схема системы управления преобразователем

Схема содержит четыре регулятора: ослабления поля РОП, тока РТ, напряжения дополнительной инверторной группы РН, напряжения задания дополнительной инверторной группы РНЗ. Блок координатного преобразования КП осуществляет вышеуказанную операцию разделения напряжения задания $\bar{u}_{dq.ref}$ на составляющие согласно уравнению (1). РНЗ является регулятором интегрального типа и, сравнивая напряжение задания $u_{aux.inv.ref}$ вспомогательной группы инверторов с некоторой фиксированной эталонной величиной $u_{aux.inv.ref}$, устанавливает необходимое задание на напряжение звена постоянного тока вспомогательных инверторов ИН2 и ИН4. РН сравнивает напряжение звеньев постоянного тока вспомогательных инверторов $u_{dc2,3}$ с заданной величиной $u_{dc2,3.ref}$ и в зависимости от знака и величины ошибки регулирования корректирует вектор $\bar{u}_{aux.inv}$, добавляя к исходному вектору $\bar{u}_{d'.ref}$ некоторую небольшую величину вектора $\bar{u}_{q'.ref}$. Это вынуждает вспомогательную группу инверторов потреблять или отдавать активную мощность, регулируя тем самым собственное входное напряжение.

Таким образом, напряжение звеньев постоянного тока инверторов ИН2 и ИН4 варьируется в зависимости от режима работы электропривода с целью минимизации размаха пульсаций напряжения на обмотках электродвигателя, а также с целью минимизации динамических потерь в преобразователе.

РЕАЛИЗАЦИЯ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ
В СРЕДЕ MATLAB/SIMULINK

Для выполнения целей исследования в программной среде *Matlab/Simulink* была построена модель, отражающая электромеханические процессы, происходящие в исследуемом электроприводе, а также работу алгоритмов системы управления. Один из возможных вариантов реализации данной модели представлен на рис. 4 и 5.

Структура модели, представленная на рис. 5, в отличие от упрощенной функциональной схемы (рис. 3) полностью отражает весь функционал системы управления исследуемым преобразователем, описанный ранее. Следует отдельно отметить блок «coordinate transformation block» (см. рис. 5), соответствующий блоку координатного преобразования КП функциональной схемы (см. рис. 3). Его выходные сигналы управления

инверторными группами генерируются в виде векторов $\bar{u}_{d'.ref}$ и $\bar{u}_{q'.ref}$ в системе координат dq . Следует также отметить, что библиотечные элементы, связанные с действиями над комплексными числами (выделение фазы, амплитуды и т.д.), используются для удобства построения системы в виде блоков. Здесь оси действительных и мнимых чисел уподобляются осям d и q системы управления соответственно. Блоки суммирования, расположенные справа от блока координатного преобразования, как следует из вышесказанного, обозначают векторные операции над сигналами.

Таким образом, в зависимости от текущего состояния электропривода основные инверторы могут частично компенсировать реактивную энергию электродвигателя в случае, если дополнительные инверторы уже работают с единичной глубиной модуляции, а последние, в свою очередь, могут потреблять или отдавать в статорную цепь активную энергию, регулируя тем самым собственное входное напряжение. Регулирование этого напряжения в данной модели осуществляется по среднему значению напряжения двух инверторов, что, безусловно, является некоторым упрощением системы управления. В работе реального образца преобразователя будет требоваться возможность независимого регулирования напряжения звена постоянного тока для каждого из дополнительных инверторов. Это может быть реализовано, например, путем организации сложения векторов в осях статора ab . Сигнал на потребление или отдачу активной мощности при этом может быть установлен отдельно для каждого из дополнительных преобразователей АИН2 и АИН4.

В рамках данной работы сравниваются две преобразовательные системы: классическая схема с напряжением звена постоянного тока 72 В и двойная инверторная система с напряжением звена постоянного тока основных инверторов 48 В и напряжением звена постоянного тока дополнительных инверторов, регулируемым в диапазоне 18–48 В.

С целью проведения сравнительного анализа энергоэффективности указанных инверторных систем в представленную имитационную модель в среде *Matlab/Simulink* внесена функция, выполняющая подсчет потерь от протекания прямого тока, а также динамических потерь в преобразователе по методике, описанной в [10].

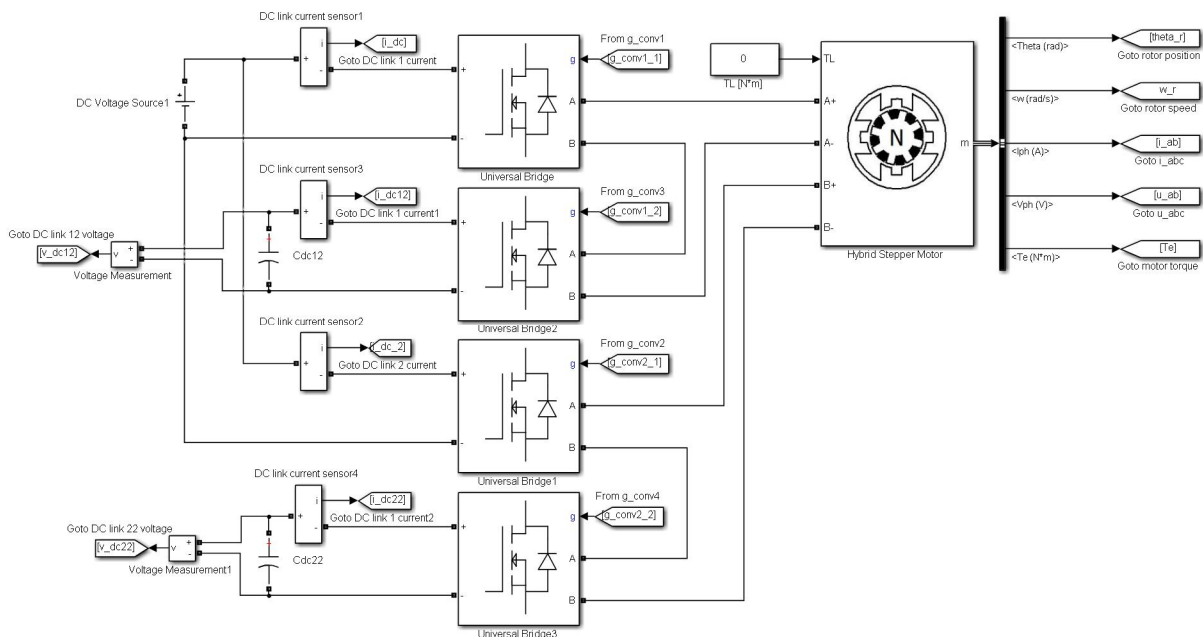


Рис. 4. Реализация силовой части имитационной модели электропривода с двойной инверторной системой в среде Matlab/Simulink

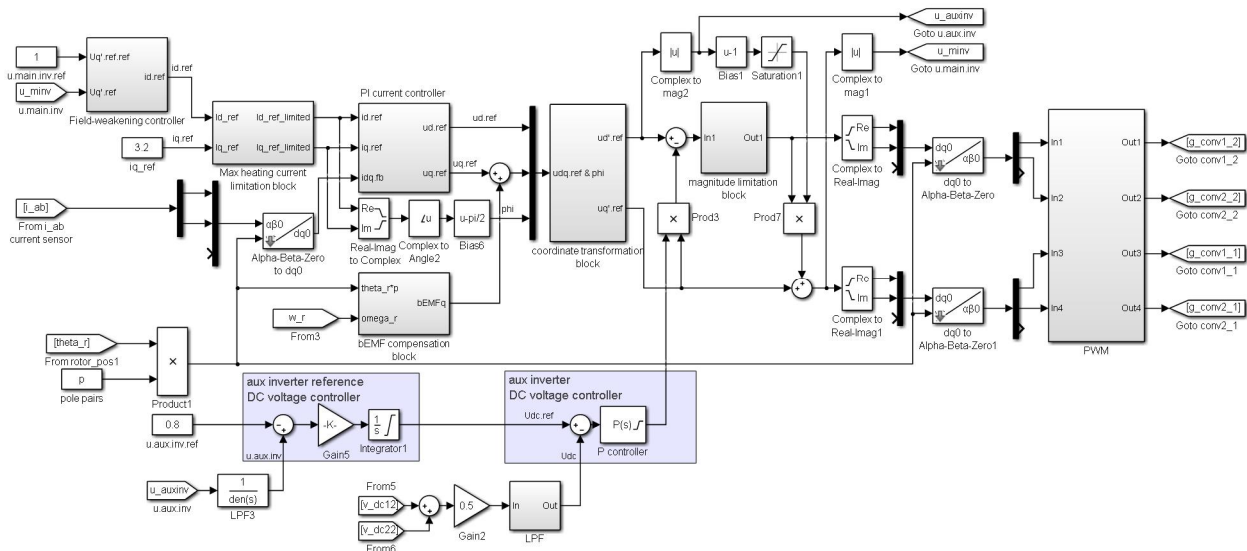


Рис. 5. Реализация системы управления имитационной модели электропривода с двойной инверторной системой в среде Matlab/Simulink

Одним из ключевых факторов, определяющих количество потерь в преобразователе, является выбор модели силовых полупроводниковых элементов. Для каждой из двух исследуемых схем силовой части преобразователя была подобрана соответствующая необходимому классу напряжения модель транзистора компании *Infineon Technologies*, обладающая согласно методике расчета, представленной в [10], наименьшими суммарными потерями среди группы аналогов.

Характеристики моделируемого шагового двигателя представлены в табл. 1. Поскольку целью данной работы является сравнительный анализ преобразовательных систем, моделирование ШД проводилось при следующих допущениях: параметры статора симметричны; индуктивность фазы не зависит от положения ротора, реактивная составляющая момента ШД отсутствует; насыщение магнитной цепи отсутствует; форма ЭДС синусоидальна; вязкое трение отсутствует.

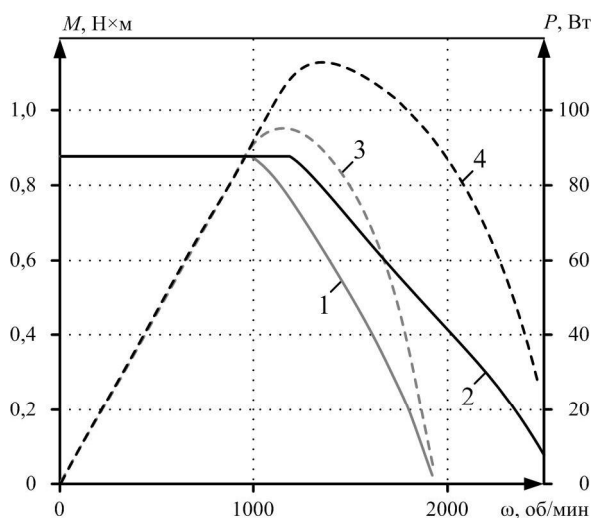
Таблица 1

Характеристики шагового электродвигателя

Характеристика	Значение
Число шагов на оборот	200
Число фаз	2
Номинальный момент, Н·м	0,89
Сопrotивление фазы, Ом	1,6
Индуктивность фазы, мГн	4
Номинальный ток фазы, А	2,3
Масса, кг	0,47

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

С помощью представленной имитационной модели в среде Matlab/Simulink была получена электромеханическая характеристика серийного шагового двигателя при работе от преобразователя классической схемы с векторным управлением и при работе от двойного преобразователя (рис. 6).



- 1 - Момент ШД, Н×м, при питании от мостового инвертора
- 2 - Момент ШД, Н×м, при питании от двойной инверторной системы
- 3 - Мощность на валу ШД, Вт, при питании от мостового инвертора
- 4 - Мощность на валу ШД, Вт, при питании от двойной инверторной системы

Рис. 6. Электромеханическая характеристика ШД при питании от различных преобразователей

Точки электромеханических характеристик получены при работе инверторов с глубиной модуляции не более единицы; форма фазного тока при этом стремилась к синусоиду амплитудой 3,2 А. Диапазон регулирования скорости ШД при работе от двойного преобразователя шире, переход в зону ослабления поля происходит при большей на 20 % скорости вращения вала. Максимальная развиваемая ШД мощность на валу выше на 18 %. Это связано с большими возможностями (при указанных уровнях входных напряжений сравниваемых преобразователей) по компенсации реактивной энергии ШД представленного двойного преобразователя. Инверторные группы способны генерировать выходные напряжения, векторы которых направлены друг относительно друга под острым углом. Так, амплитуда основной гармоники прикладываемого к обмоткам электродвигателя напряжения в момент перехода в зону ослабления поля равняется приблизительно 82 В (и увеличивается с дальнейшим разгоном ШД, асимптотически приближаясь к 96 В, когда энергия, генерируемая обеими группами преобразователей, становится практически полностью реактивной, а генерируемый электроприводом момент стремится к нулю), тогда как при классической схеме преобразователя амплитуда основной гармоники прикладываемого к обмоткам электродвигателя напряжения ограничена напряжением звена постоянного тока (72 В).

Осциллограммы момента, фазного тока и напряжения, тока потребления преобразователя при питании ШД от двойной инверторной системы на различных скоростях вращения вала представлены на рис. 7-9. По осциллограммам входного тока инверторной системы, снятым при моделировании ШД на низких скоростях вращения вала (см. рис. 7, 8), можно сделать вывод о

том, что система управления работает согласно выражению (2). Для этого режима работы характерно отсутствие передачи энергии из электрической машины обратно в источник питания. Другими словами, инверторы ИН₁ и ИН₃ генерируют только активную энергию, в то время как инверторы ИН₂ и ИН₄ – только реактивную. Для более высоких скоростей работы электропривода (см. рис. 9) характерна работа системы управления согласно выражению (3), когда основная группа инверторов вырабатывает часть реактивной энергии, потребляемой электродвигателем.

Также были измерены потери в преобразователе и показатели коэффициента гармонических искажений электромагнитного момента и фазного тока при различных скоростях работы электропривода. Результаты моделирования классической схемы были получены при неизменной частоте ШИМ и в данной работе считаются опорными при определении частоты ШИМ исследуемого преобразователя. Последняя выбиралась таким образом, чтобы соответствовать показателям искажений генерируемого электроприводом момента и тока фазы, заданным преобразователем с классической схемой силовой части. Полученные результаты измерений сведены в табл. 2, 3.

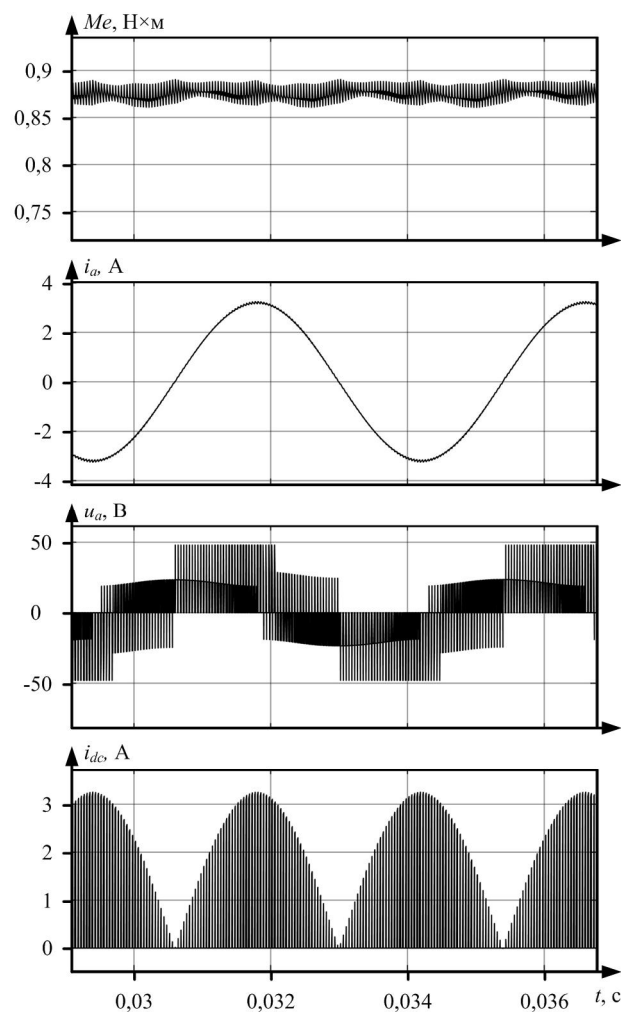


Рис. 7. Осциллограммы (сверху вниз) момента, фазного тока, фазного напряжения, потребляемого тока двойной инверторной системы при угловой скорости вала ШД 250 об/мин

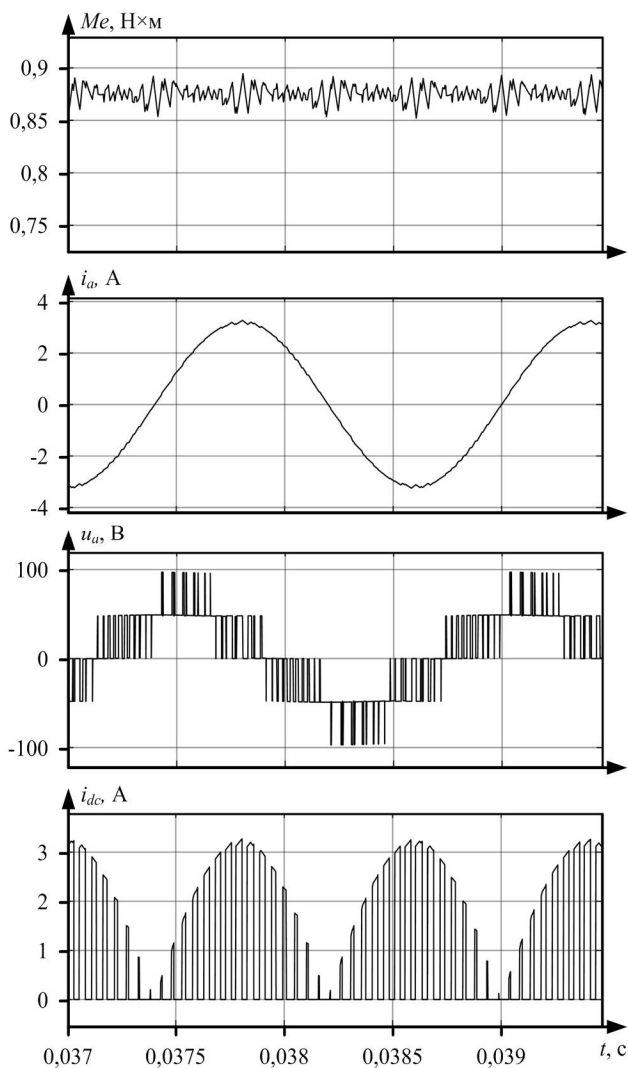


Рис. 8. Осциллограммы (сверху вниз) момента, фазного тока, фазного напряжения, потребляемого тока двойной инверторной системы при угловой скорости вала ШД 750 об/мин

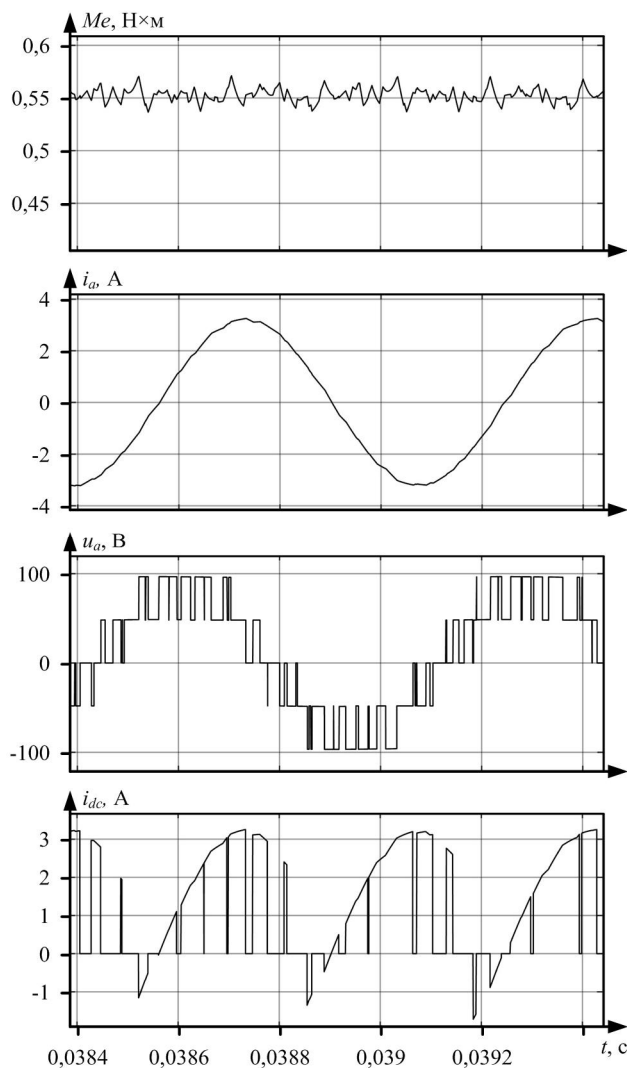


Рис. 9. Осциллограммы (сверху вниз) момента, фазного тока, фазного напряжения, потребляемого тока двойной инверторной системы при угловой скорости вала ШД 1750 об/мин

Таблица 2

Потери в преобразователе, коэффициенты гармонического искажения момента и фазного тока при различных скоростях работы электропривода с классическим инвертором

Модель силового транзистора			BSZ146N10LS5		
Скорость вращения вала, об/мин	Частота ШИМ, кГц	Напряжение звена постоянного тока, В	Потери в преобразователе, Вт	КГИ момента, %	КГИ фазного тока, %
0	30	72	0,4477	0,52	0,52
250	30	72	0,4387	1,05	1,21
500	30	72	0,4387	1,22	1,62
750	30	72	0,4387	1,21	1,55
1000	30	72	0,4387	1,43	1,52
1250	30	72	0,4387	1,50	1,32
1500	30	72	0,4387	2,45	1,33
1750	30	72	0,4387	7,27	1,34

Потери в преобразователе, коэффициенты гармонического искажения момента и фазного тока при различных скоростях работы электропривода с исследуемой двойной инверторной системой

Модель силового транзистора		BSZ065N06LS5			
Скорость вращения вала, об/мин	Частота ШИМ, кГц	Напряжение звена постоянно тока основных / дополнительных инверторов, В	Потери в преобразователе, Вт	КГИ момента, %	КГИ фазного тока, %
0	30,0	48 / 18	0,3148	0,5	0,5
250	24,0	48 / 20	0,2929	1,06	0,76
500	20,0	48 / 41	0,3001	1,19	1,05
750	19,3	48 / 48	0,3031	1,15	0,95
1000	18,5	48 / 48	0,2998	1,22	1,3
1250	19,5	48 / 48	0,3049	1,26	1,48
1500	20,3	48 / 48	0,3075	1,3	1,39
1750	21,5	48 / 48	0,3125	1,67	1,3
2000	24,0	48 / 48	0,3232	2,25	1,34
2250	27,0	48 / 48	0,3359	3,62	1,27

Потери в исследуемом преобразователе меньше в среднем на 30 %, что обусловлено главным образом выбором модели силовых полупроводниковых элементов. МОП-транзисторы с меньшим максимальным допустимым напряжением сток-исток, как правило, обладают меньшим сопротивлением канала, а также большей скоростью протекания процессов включения и выключения. Следует отметить, что при расчетах потерь преобразователей время включения и выключения транзисторов было выбрано минимально возможным для выбранных моделей, что для некоторых приложений может быть недопустимо из соображений электромагнитной совместимости. При ограничении скорости нарастания напряжения некоторой фиксированной величиной, знак разницы в потерях сохраняется на низких скоростях за счет уменьшения входного напряжения дополнительных преобразователей (которые, строго говоря, в этом случае могут не использоваться совсем), а на средних и высоких скоростях – за счет меньшей частоты ШИМ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе предложено использовать двойную инверторную систему в составе замкнутого по положению шагового электропривода.

Сравнительное имитационное моделирование в среде *Matlab/Simulink* позволяет сделать вывод о том, что предложенный преобразователь обладает более низким уровнем потерь при аналогичном или меньшем уровне искажений генерируемого электроприводом фазного тока и момента. Кроме того, данная преобразовательная система позволяет организовать больший диапазон регулирования по скорости шагового электропривода при меньшем напряжении источника питания по сравнению с классической мостовой схемой.

Наличие в каждой фазе двух мостовых инверторов позволяет с помощью соответствующих коммутаций силовой цепи сохранить работоспособность системы при выходе одного из инверторов из строя, что позволяет судить о большей степени отказоустойчивости исследуемой схемы силовой части.

Низкий уровень потерь, а также повышенная отказоустойчивость предложенной инверторной системы позволяет рекомендовать ее для применения в автономных системах, таких как автономные промышленные объекты и роботы, системы аэрокосмической отрасли, устройства преобразования энергии окружающей среды (*energy harvesting*) и т.д.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. The efficiency of hybrid stepping motors: analyzing the impact of control algorithms / S. Derammelaere, B. Vervisch, F.D. Belie, B.V.J. Cottyn, P. Cox, G.V.D. Abeele, K. Stockman, L. Vandeveldel // *IEEE Industry Applications Magazine*. 2014. Is. 4. Pp. 50-60. doi: 10.1109/MIAS.2013.2288403.
2. Le K.M., Hoang H.V., Jeon J.W. An advanced closed-loop control to improve the performance of hybrid stepper motor // *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2016. Vol. 32. Is. 9. Pp. 7244-7255. doi: 10.1109/TPEL.2016.2623341.
3. Разработка модели систем высококачественного бесколлекторного электропривода постоянного тока / Т.Х. Абузяров, А.С. Плехов, А.Б. Дарьенков, А.И. Ермолаев // *Вестник ИГЭУ*. 2020. № 1. С. 31-45. doi: 10.17588/2072-2672.2020.1.031-045.
4. The age of multilevel converters arrives / L.G. Franquelo, J. Rodriguez, J.I. Leon, S. Kouro, R. Portillo, M.A.M. Prats // *IEEE Industrial Electronics Magazine*. 2008. Vol. 2. No. 2. Pp. 28-39. doi: 10.1109/IEE.2008.923519.
5. Multilevel inverters: a survey of topologies, controls, and applications / J. Rodriguez, J.S. Lai, F.Z. Peng // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2002. Vol. 49. No. 4. Pp. 724-738. doi:10.1109/TIE.2002.801052.
6. Абузяров Т.Х. Особенности имитационного моделирования двоячного преобразователя для электротранспорта с пространственно-векторным управлением // *Интеллектуальная электротехника*. 2020. № 3(11). С. 100-109. doi: 10.46960/2658-6754_2020_3_100.
7. Абузяров Т.Х., Плехов А.С. Каскадный преобразователь для электротранспорта с пространственно-векторным управлением // *Актуальные проблемы электроэнергетики: материалы VI Всерос. науч.-техн. конф. Нижний Новгород: Изд-во Нижегородск. гос. техн. ун-та им. Р.Е. Алексеева*. 2020. С. 56-63. doi: 10.46960/39255930_2020_41.
8. Dual inverter-fed drives with the synchronised multilevel voltage waveforms / V.I. Oleschuk, A.S. Sizov, A.M. Stankovic, E.M. Yaroshenko // *Problems of the Regional Energetics*. 2006. №1. Pp. 106-119.

9. Kim J., Jung J., Nam K. Dual-inverter control strategy for high-speed operation of EV induction motors // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2004. Vol. 51. No. 2. Pp. 312-320. doi: 10.1109/TIE.2004.825232.
10. Graovac D., Marco P., Andreas K. MOSFET Power Losses Calculation Using the Data-Sheet Parameters. Germany: Published by Infineon Technologies AG, 2006. 22 p.

Поступила в редакцию 12 января 2021 г.

INFORMATION IN ENGLISH

DUAL-INVERTER FEEDING SYSTEM FOR STEPPER MOTOR DRIVE WITH REDUCED DC LINK VOLTAGE

Tagir H. Abuzyarov

Postgraduate student, Electrical Equipment, Electric Drive and Automatics Department, Institute of Electric Power Engineering, R.E. Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod, Russia. E-mail: atx888@yandex.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2527-7677>.

At present, bridge connection of power elements is widely used for bipolar control of stepping motors. The disadvantages of this solution include a low range of speeds achieved at the set load for the step drive, a wide amplitude of phase voltage ripple and, as a consequence, high dynamic losses in the semiconductor converter and the wide amplitude of ripple of the torque generated by the electric drive. The described disadvantages, as well as the high value of reactive power component consumed by a stepping motor at high shaft speeds, make it reasonable to include additional inverters (one inverter per each phase of the electric motor) into the common conversion system; these inverters are supposed to compensate the reactive energy consumed by the stepping motor. The aim of this research work is to investigate the possible application of the double inverter system in the electric drive based on a stepping motor and the synthesis of the vector control algorithm of the stepping motor adapted for operation with this kind of the converter. The performance check and the performance evaluation of the proposed inverter system as compared with the common bridge system were carried out using the comparative simulation method in the Matlab/Simulink graphical environment. The simulation modeling results point at loss reduction in the converting part by 30%, reduction of the amplitude of the generated torque ripple and the increase in the shaft speed range during electric drive operation when the double inverter system was used with a comparatively lower voltage in the DC link. The suggested operation algorithm provides voltage control in the DC links of the additional inverters to decrease the amplitude of the voltage ripple on the motor windings and to reduce the dynamic losses in the converter. This converter can be used in autonomous industrial objects, autonomous robotic systems, airspace systems, etc.

Keywords: stepping motor, bridge converter, dual inverter system, autonomous voltage inverter, vector control, dual voltage inverters.

REFERENCES

1. Derammelaere S., Vervisch B., Belie F.D., Cottyn B.V.J., Cox P., Abeele G.V.D., Stockman K., L. Vandeveldel The efficiency of hybrid stepping motors: analyzing the impact of control algorithms. IEEE Industry Applications Magazine. 2014. Is. 4. Pp. 50-60, doi: 10.1109/MIAS.2013.2288403.
2. Le K.M., Hoang H.V., Jeon J.W. An advanced closed-loop control to improve the performance of hybrid stepper motor. IEEE Transactions on Power Electronics. 2016. Vol. 32. Is. 9. Pp. 7244-7255. doi: 10.1109/TPEL.2016.2623341.
3. Abuzyarov T.H., Plekhov A.S., Daryenkov A.B., Ermolaev A.I. Model development of a high-quality brushless direct current electric drive. *Vestnik IGEU* [Vestnik IGEU], 2020, no. 1, pp. 31-45. (In Russian) doi: 10.17588/2072-2672.2020.1.031-045.
4. Franquelo L.G., Rodriguez J., Leon J.I., Kouro S., Portillo R., Prats M.A.M. The age of multilevel converters arrives. IEEE Industrial Electronics Magazine. 2008. Vol. 2. No. 2. Pp. 28-39. doi: 10.1109/MIE.2008.923519.
5. Multilevel inverters: a survey of topologies, controls, and applications / J. Rodriguez, J.S. Lai, F.Z. Peng // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2002. Vol. 49. No. 4. Pp. 724-738. doi:10.1109/TIE.2002.801052.
6. Abuzyarov T.H. Simulation modeling of a dual converter for electric transport with space-vector control. *Intellectualnaya elektrotehnika* [Smart Electrical Engineering], 2020, no. 3(11), pp. 100-109. (In Russian) doi: 10.46960/2658-6754_2020_3_100.
7. Abuzyarov T.H., Plekhov A.S. Cascade converter for electric transport with space-vector control. *Materialy VI Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Aktual'nye problemy elektroenergetiki"* [Materials of the VI All-Russian Scientific and Technical Conference "Urgent Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev Publ., 2020, pp. 56-63. (In Russian) doi: 10.46960/39255930_2020_41.
8. Oleschuk V.I., Sizov A.S., Stankovic A.M., Yaroshenko E.M. Dual inverter-fed drives with the synchronised multilevel voltage waveforms. Problems of the Regional Energetics. 2006. No.1. Pp. 106-119.
9. Kim J., Jung J., Nam K. Dual-inverter control strategy for high-speed operation of EV induction motors. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2004. Vol. 51. No. 2. Pp. 312-320. doi: 10.1109/TIE.2004.825232.
10. Graovac D., Marco P., Andreas K. MOSFET Power Losses Calculation Using the Data-Sheet Parameters. Infineon Technologies AG Publ., 2006. 22 p.

Абузаров Т.Х. Двойная инверторная система для питания шагового электродвигателя с уменьшенным напряжением звена постоянного тока // Электротехнические системы и комплексы. 2021. № 1(50). С. 27-34. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-1\(50\)-27-34](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-1(50)-27-34)

Abuzyarov T.H. Dual-Inverter Feeding System for Stepper Motor Drive with Reduced Dc Link Voltage. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2021, no. 1(50), pp. 27-34. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-1\(50\)-27-34](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-1(50)-27-34)

СРАВНЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ИМПУЛЬСНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИМИТАЦИОННОГО КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Динамические потери и коэффициент полезного действия импульсного полупроводникового преобразователя зависят от схемы используемого преобразователя. Цель исследования заключается в том, чтобы показать, что при использовании схемы частотно-импульсного преобразователя можно уменьшить динамические потери и увеличить коэффициент полезного действия преобразователя относительно схемы широтно-импульсного преобразователя. Для анализа и сравнения полупроводниковых схем широтно-импульсного и частотно-импульсного преобразователей в статье применены методы имитационного моделирования. Описан принцип работы и основные отличия широтно-импульсного и частотно-импульсного преобразователей. Разработаны и смоделированы схемы широтно-импульсного и частотно-импульсного преобразователей в среде Matlab с использованием блоков из библиотеки Simulink / SimPowerSystem / Simscape. Смоделирован блок модели, рассчитывающий статические и динамические потери мощности IGBT-транзистора. Для расчета потерь мощности, а именно статических и динамических потерь, использован метод аппроксимации графиков потерь. Полученные математические зависимости достаточно точно описывают графики потерь мощностей IGBT-транзистора. В качестве IGBT-транзистора выбран силовой транзистор фирмы MITSUBISHI типа CM800HC-66H. Показано, что при использовании схемы частотно-импульсного преобразователя можно уменьшить динамические потери и увеличить коэффициент полезного действия преобразователя относительно схемы широтно-импульсного преобразователя. Проведя анализ полученных характеристик импульсных полупроводниковых преобразователей, было отмечено, что при изменении значений скважности от 0,1 до 0,5 коэффициент полезного действия частотно-импульсного преобразователя значительно превысил коэффициент полезного действия широтно-импульсного преобразователя. Это превышение сильнее проявилось при большей частоте коммутации импульсного полупроводникового преобразователя и большей мощности силовых ключей преобразователей.

Ключевые слова: импульсный полупроводниковый преобразователь, широтно-импульсная модуляция, частотно-импульсная модуляция, аппроксимация, динамические потери, коэффициент полезного действия, частота.

ВВЕДЕНИЕ

Использование преобразователей постоянного тока до настоящего времени играет важную роль в ряде отраслей науки и техники, таких как автоматизация промышленных установок, электрический транспорт, сварочные аппараты, бытовая техника, радиоэлектроника, радиотехника и т.п. В этих же областях появилась потребность в электроэнергии, отличающейся от промышленной по частоте, форме выходного напряжения или тока, числу фаз, возможности регулирования параметров электроэнергии. Эти задачи наиболее часто возникают при разработке регулируемого электропривода постоянного и переменного тока, на долю которого приходится около 60% всего потребления электроэнергии в стране [1].

Из всех существующих способов управления электроприводами в настоящее время лучшим считается способ управления с применением широтно-импульсной модуляции (ШИМ) [1, 2]. Для управления электроприводами постоянного тока используются широтно-импульсные преобразователи (ШИП). Этот способ управления позволяет сформировать требуемые форму и амплитуду напряжения питания двигателя, добиться высокой плавности и большего диапазона регулирования угловой скорости при изменении нагрузки в широких пределах [2, 3].

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ С ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНЫМ И ЧАСТОТНО-ИМПУЛЬСНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

Широтно-импульсный модулятор представляет собой главный блок системы управления широтно-импульсного преобразователя. Широтно-импульсный преобразователь преобразует постоянное напряжение [4, 5] в импульсное, среднее значение которого (то есть его постоянную составляющую, выделяемую в нагрузке фильтрами) можно регулировать. Принцип регулирования выходного напряжения ШИП основан на периодическом замыкании и размыкании вентильных ключей – транзисторов или тиристоров. На **рис. 1** приведена простейшая базовая схема импульсного полупроводникового преобразователя (ИПП) с широтно-импульсным или частотно-импульсным управлением.

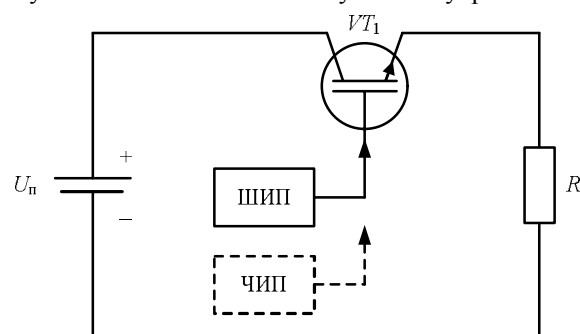


Рис. 1. Импульсный полупроводниковый преобразователь с широтно-импульсным или частотно-импульсным управлением

Схема состоит из транзистора VT_1 , который работает в режиме ключа, источника питания постоянного тока U_n и активной нагрузки R_1 . Показанная схема на **рис. 1** обеспечивает только однополярную модуляцию. При включении транзистора VT_1 (в режиме ключа) на нагрузке формируется положительный импульс напряжения. При выключении транзистора VT_1 формируется пауза напряжения на нагрузке (**рис. 2**).

В преобразователях высокого напряжения и большой мощности модули биполярных транзисторов с изолированным затвором (IGBT) стали одними из наиболее широко используемых силовых полупроводниковых приборов [4, 6-7]. Однако стремительное развитие силовой полупроводниковой техники приводит к увеличению номинальной мощности и уменьшению габаритов, что влечет за собой неизбежные проблемы с тепловыделением силовых электронных преобразователей.

Увеличение температуры влияет на качество соединения припоя и проволочной связи, что в результате приводит к уменьшению срока службы силовых полупроводниковых компонентов.

Потери в ИПП в основном создаются IGBT-транзисторами и диодами. К основным потерям относятся статические (потери проводимости) и динамические (коммутационные) потери [8].

Статические потери происходят при включенном состоянии (или в устойчивом состоянии) IGBT-транзисторов. Статические потери P_{cond} можно рассчитать как произведение тока коллектора I_c и напряжения коллектора-эмиттера U_{ce} :

$$P_{cond} = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi (I_c U_{ce}) dt, \quad (1)$$

где I_c – ток коллектора; U_{ce} – напряжение коллектора-эмиттера.

Динамические потери в IGBT-транзисторах происходят при переходе из одного установившегося режима в другой, то есть при переходе от выключенного состояния во включенное (динамические потери включения) и, наоборот, от включенного состояния в выключенное (динамические потери выключения) [6-9].

Величина средней мощности коммутационных потерь определяется как

$$P_{sw} = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi [(E_{on}(I_c) + E_{off}(I_c)) f] dt, \quad (2)$$

где $E_{on}(I_c)$ – энергия включения, которая зависит от величины тока коллектора; $E_{off}(I_c)$ – энергия выключения, которая тоже зависит от значения тока коллектора; f – частота коммутации.

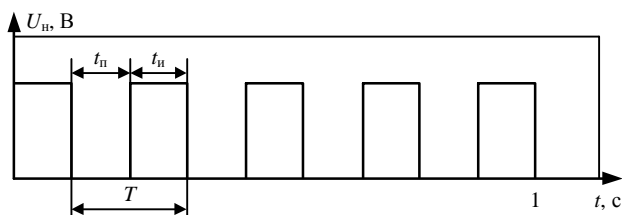


Рис. 2. Диаграммы напряжения ШИП при скважности 0,5 и частоте 5 Гц

В силовом преобразователе потери на переключение обычно вносят значительный вклад в общие потери схемы. Чтобы повысить надежность конструкции, необходимо точно рассчитать коммутационные потери.

Как видно из (2), динамические потери прямо пропорционально зависят от частоты коммутации: чем больше частота коммутации, тем больше динамические потери.

Для уменьшения динамических потерь, а следовательно, увеличения КПД ИПП можно использовать другой метод управления, который основывается на применении частотно-импульсной модуляции (ЧИМ). Способ управления с ЧИМ используется в частотно-импульсном преобразователе (ЧИП) [5, 9, 10].

При изменении скважности длительность импульса t_n выходного напряжения ШИП изменяется, при этом период импульсов T остается постоянным. Следовательно, частота ШИП остается постоянной.

В случае ЧИП длительность импульса t_n не изменяется, то есть остается постоянным. При этом частота коммутации ЧИП будет меньше, чем ШИП. Уменьшение частоты коммутации приводит к уменьшению динамических потерь и, соответственно, к увеличению КПД преобразователя.

На **рис. 3** показан график зависимости скважности γ от частоты импульсов. Как видно, при изменении скважности частота импульсов f у широтно-импульсного преобразователя остается постоянной. В то же время у частотно-импульсного преобразователя при изменении скважности частота импульсов меняется прямо пропорционально.

Основные отличия ЧИП от ШИП [5, 10, 11]:

- длительность импульса выходного напряжения ЧИП постоянна (длительность импульса выходного напряжения ШИП изменяется);
- период выходного напряжения ЧИП изменяется (период выходного напряжения ШИП постоянен);
- выходная частота ЧИП изменяется (выходная частота ШИП постоянна).

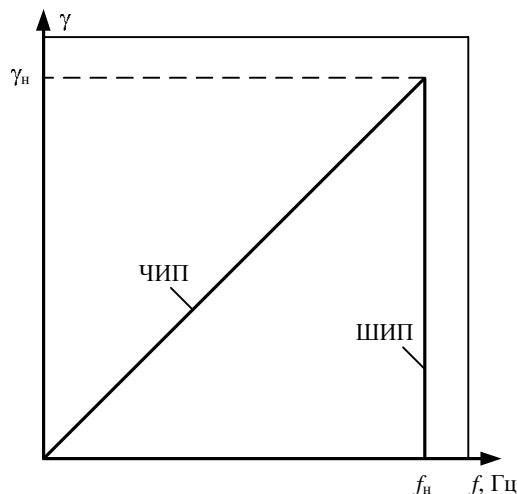


Рис. 3. График зависимости скважности от частоты импульсов

МОДЕЛИРОВАНИЕ СХЕМЫ ИПП С ШИП И ЧИП

Таблица 1

Основные характеристики IGBT-транзистора

Марка	$I_{c,n}, A$	$V_{ce,n}, B$	$V_{ce,sat}, B$	$E_{on}, Дж$	$E_{off}, Дж$
CM800HC-66H	8800	3300	3,6	1,1	11,05

В среде Matlab с использованием блоков из библиотеки Simulink/SimPowerSystem/Simscape [12-15] смоделированы схемы ШИП и ЧИП. Полученная модель показана на **рис. 4**.

Модели ИПП с ШИП и ЧИП содержат следующие блоки:

- Блок изменения скважности, которая регулируется с помощью напряжения управления. Напряжение управления в модели ШИП регулируется от 0 до 10 В, а в модели ЧИП – от 2 до 30 В.

Система управления в модели ШИП сконструирована с использованием блоков из библиотеки Simulink.

Система управления ЧИП сконструирована с использованием элементов библиотеки Simscape, которая показана на **рис. 5** и подробно описана в [16].

Simscape – это среда имитационного моделирования физических систем. Базовая библиотека блоков Simscape расширяется на несколько специализированных библиотек, таких как: Foundation Library, Driveline, Electrical, Fluids, Multibody и др. В данной среде можно моделировать электронные, электромеханические, электрические, механические, гидравлические, термальные и другие виды систем.

- Блок силовой схемы ШИП или ЧИП, который состоит из силового полупроводникового преобразователя, активной нагрузки R_n и силового (питающего) звена, представленного в виде батареи с напряжением 3300 В. В качестве силового полупроводникового преобразователя использовался IGBT-транзистор из фирмы MITSUBISHI типа CM800HC-66H, характеристики которого приведены в **табл. 1**.

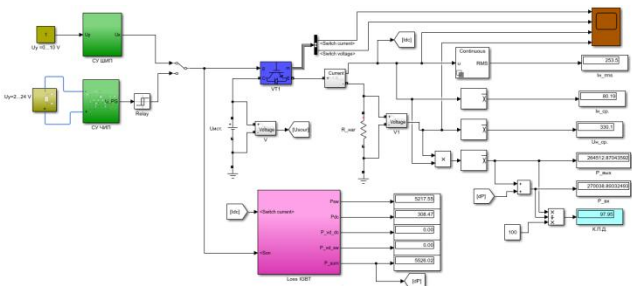


Рис. 4. Модель схемы импульсного полупроводникового преобразователя с ШИП- и ЧИП-управлением

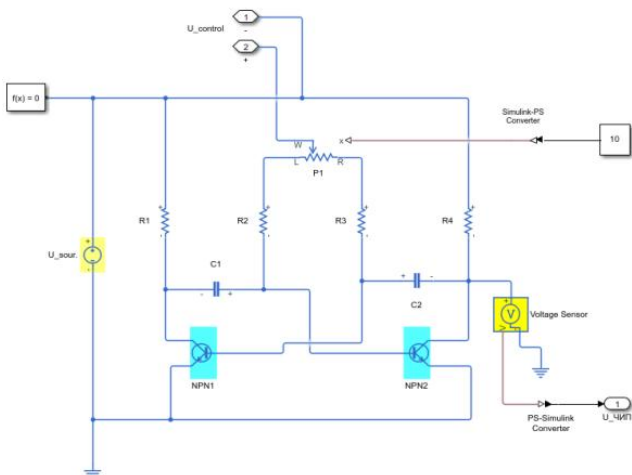


Рис. 5. Модель схемы системы управления ЧИП

- Блок расчета потерь мощности ИПП с ШИП и ЧИП показан на **рис. 4**. Расчет потерь мощности IGBT разными методами подробно описан в [4-9, 12-19]. В [6] использован расчет потерь мощности IGBT методом аппроксимации графиков потерь. Энергетические графики зависимостей $U_{ce}(I_c)$, $E_{on}(I_c)$, $E_{off}(I_c)$ из документации (характеристики помечены цифрой 1) и после аппроксимации (характеристики помечены цифрой 2) показаны на **рис. 6** и **7**. Используя данный метод расчета, можно определить статические потери, динамические потери, суммарные потери IGBT-транзистора и КПД преобразователя. На **рис. 8** показана блок-модель расчета статических потерь IGBT-транзистора.

Аппроксимация графиков потерь мощности IGBT-транзистора типа CM800HC-66H проведена уравнениями (3-5):

$$U_{ce}(I_c) = -1,29I^4 + 5,297I^3 - 7,7961I^2 + 7,22936I + 0,8666; \tag{3}$$

$$E_{on}(I_c) = -0,1002I^3 + 1,237I^2 + 0,5766I + 0,138; \tag{4}$$

$$E_{off}(I_c) = 1,2243I + 0,284. \tag{5}$$

Полученные математические зависимости (3-5) достаточно точно описывают энергетические графики потерь мощности IGBT-транзистора.

Результаты моделирования статических потерь IGBT-транзистора приведены на **рис. 9**.

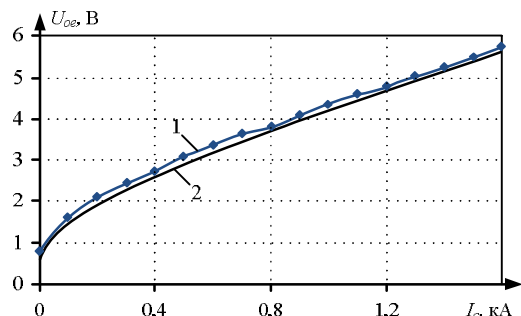


Рис. 6. Напряжение насыщения коллектор-эмиттера силового транзистора типа CM800HC-66H: 1 – из документации; 2 – после аппроксимации

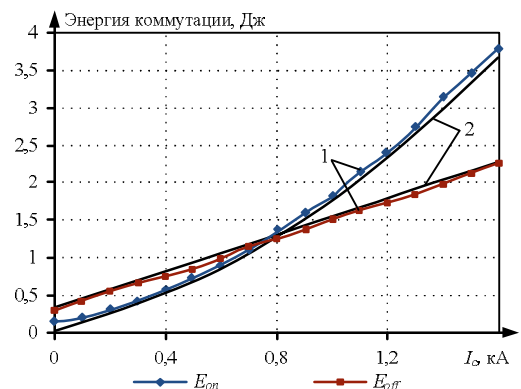


Рис. 7. Энергетические характеристики переключения силового транзистора типа CM800HC-66H: 1 – из документации; 2 – после аппроксимации

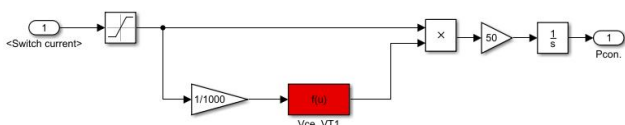


Рис. 8. Блок-модель расчета статических потерь IGBT-транзистора типа CM800HC-66H

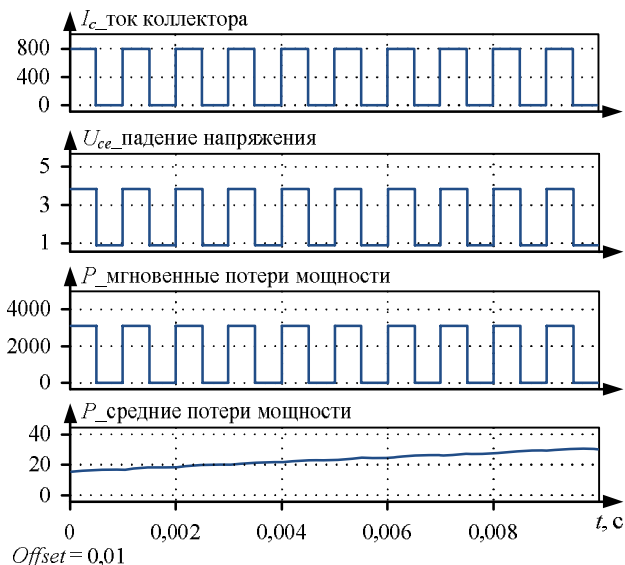


Рис. 9. Диаграммы статических потерь IGBT-транзистора типа CM800HC-66H

СРАВНЕНИЕ И АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ СХЕМ ШИП И ЧИП

На рис. 10 и 11 показаны диаграммы токов и напряжений схем ШИП и ЧИП, полученных в результате моделирования на активную нагрузку при скважностях 0,5. Как видно из диаграммы ШИП (см. рис. 10), при скважности 0,5 частота коммутации равна 2 кГц. А в случае ЧИП при скважности 0,5 частота коммутации уменьшается на 50%, то есть будет равна 1 кГц.

Анализ потерь, полученных при моделировании схем полупроводниковых преобразователей в режимах ШИП и ЧИП при разных скважностях γ , приведен в табл. 2.

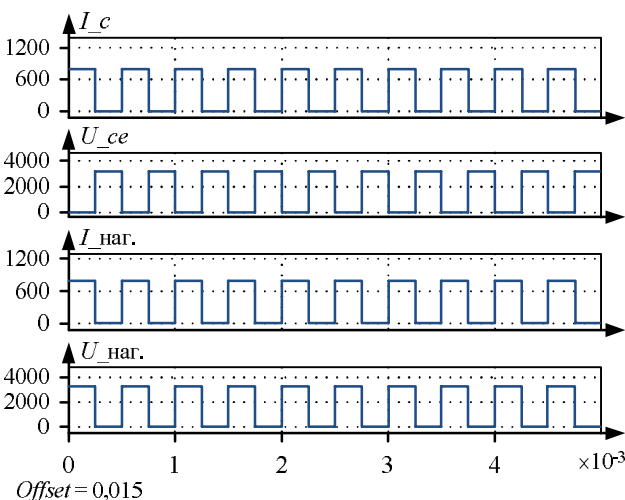


Рис. 10. Временные диаграммы ШИП при скважности 0,5 и частоте коммутации 2 кГц

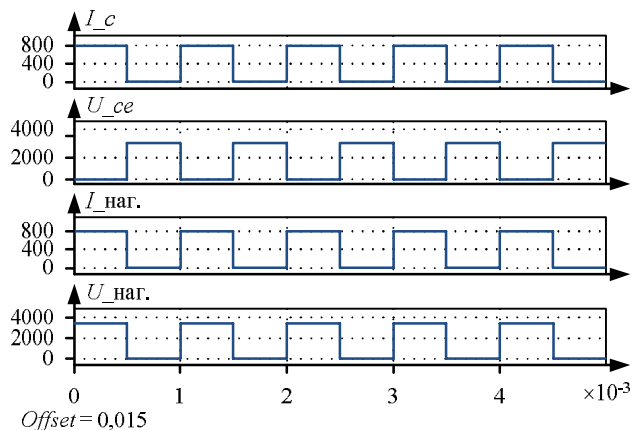


Рис. 11. Временные диаграммы ЧИП при скважности 0,5 и частоте коммутации 1 кГц

Таблица 2
Потери схем ШИП и ЧИП при частоте 2 кГц

γ	f , кГц		$I_{ср}$, кА	I_{rms} , кА	$I_{пикс}$, кА	P_{sw} , кВт		P_{dc} , кВт	КПД, %	
	ШИП	ЧИП				ШИП	ЧИП		ШИП	ЧИП
1	2	2	0,8	0,8	0,8	5,217	5,217	3,078	99,69	99,69
0,9	2	1,8	0,72	0,76	0,8	5,217	4,695	2,775	99,67	99,689
0,6	2	1,2	0,48	0,62	0,8	5,217	3,130	1,850	99,56	99,6885
0,3	2	0,6	0,24	0,43	0,8	5,217	1,565	0,925	99,23	99,688
0,1	2	0,2	0,08	0,25	0,8	5,217	0,521	0,308	97,95	99,687

На рис. 12-13 показаны диаграммы, где сравниваются динамические потери, а также КПД ШИП и ЧИП. В ШИП при изменении скважности от максимального значения в сторону уменьшения частота коммутации не меняется. При неизменной частоте коммутации динамические потери остаются постоянными, что приводит к уменьшению КПД преобразователя при низких скважностях.

В ЧИП по мере уменьшения скважности от максимального значения к минимальному частота коммутации уменьшается прямо пропорционально. Это приводит к уменьшению динамических потерь и значительному меньшему снижению КПД ЧИП по сравнению с ШИП.

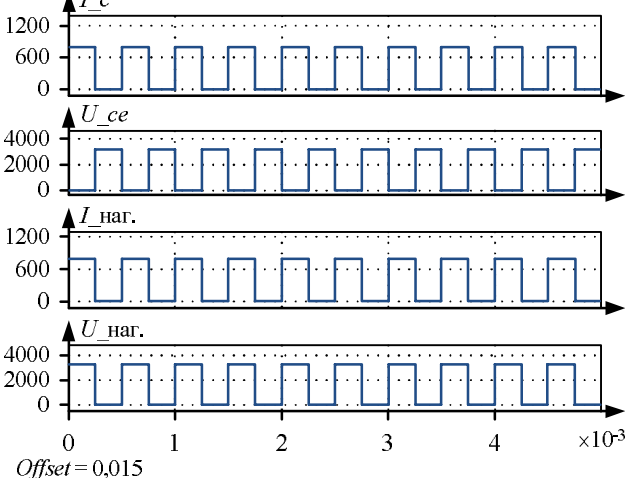


Рис. 10. Временные диаграммы ШИП при скважности 0,5 и частоте коммутации 2 кГц

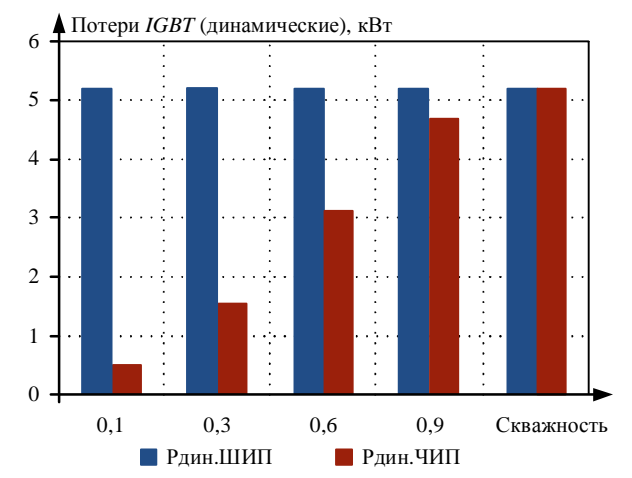


Рис. 12. Динамические потери IGBT в ШИП (частота коммутации 2 кГц) и ЧИП (максимальная частота 2 кГц)

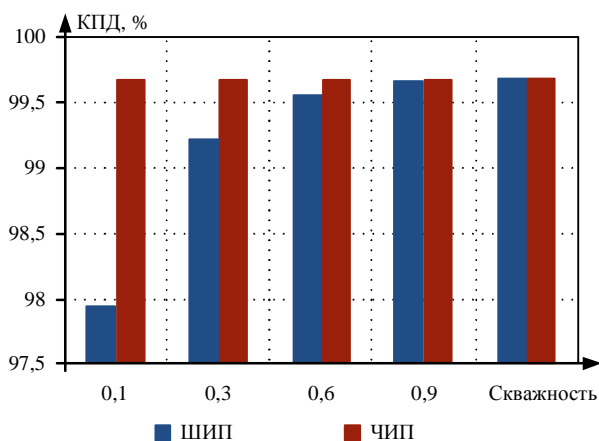


Рис. 13. Сравнение КПД ШИП (частота коммутации 2 кГц) и ЧИП (максимальная частота 2 кГц)

Проводя анализ полученных характеристик преобразователей, можно увидеть, что при изменении скважности от 0,1 до 0,5 КПД ЧИП значительно превышает КПД ШИП. Это превышение сильнее ощущается при большей частоте коммутации преобразователей. Например, при скважности 0,1 и частоте 2 кГц КПД ЧИП получается на 1,737 % больше, чем у ШИП; при 4 кГц КПД ЧИП получается на 3,5 % больше, чем у ШИП.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработаны модели схем ИПП с ШИП и ЧИП в среде Matlab с использованием блоков из библиотеки Simulink/SimPowerSystem/Simscape. Смоделирован блок расчета потерь мощности IGBT, где рассчитываются статические и динамические потери силового ключа на IGBT-транзисторе. Для расчета потерь мощности использован метод аппроксимации графиков потерь. Полученные математические зависимости достаточно точно описывают графики потерь мощностей IGBT-транзистора. В качестве IGBT-транзистора выбран силовой транзистор фирмы MITSUBISHI типа CM800HC-66H. Показано, что при использовании схемы ЧИП можно уменьшить динамические потери и увеличить КПД преобразователя относительно схемы ШИП. Проводя анализ полученных характеристик преобразователей, можно увидеть, что при изменении скважности от 0,1 до 0,5 КПД ЧИП значительно превышает КПД ШИП. Это превышение сильнее проявилось при большей частоте коммутации импульсного полупроводникового преобразователя и большей мощности силовых ключей преобразователей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кругликов О.В., Макаров Л.Н., Пискунов С.В. Разработка, производство и применение энергоэффективных электрических машин и приводов // *Электротехника*. 2015. № 3. С. 4-8.
2. Дунаев М.П., Довудов С.У. Моделирование схемы широтно-импульсного преобразователя // *Повышение эффективности производства и использования электроэнергии в условиях Сибири: труды Всероссийской научно-практической конференции*. Иркутск: ИРНТУ, 2019. С. 3-6.
3. Герман-Галкин С.Г. Широтно-импульсные преобразователи. Л.: Энергия, 1979. 96 с.
4. Ivakhno V., Zamaruev V.V., Pina O. Estimation of semiconductor switching losses under hard switching using Matlab/Simulink subsystem // *Electrical, Control and Com-*

5. munication Engineering. 2013. Vol. 2. Iss. 1. Pp. 20-26. doi: 10.2478/ece-2013-0003.
6. Modeling of conduction and switching losses for IGBT and FWD based on SVPWM in automobile electric drives / Y. Zhu, M. Xiao, X. Su, G. Yang, K. Lu, Z. Wu // *Applied Sciences*. 2020. No. 10(13). 4539. doi: 10.3390/app10134539.
7. Calculation of static and dynamic losses in power IGBT transistors by polynomial approximation of basic energy characteristics / Plakhtii O.A., Nerubatskyi V.P., Hordiienko D.A., Khoruzhevskiy H.A. // *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2020. No. 2. Pp. 82-88. doi: 10.33271/nvngu/2020-82.
8. The IGBT losses analysis and calculation of inverter for two-seat electric aircraft application / K. Wei, C. Zhang, X. Gong, T. Kang // *Energy Procedia*. 2017. Vol. 105. Pp. 2623-2628. doi: 10.1016/j.egypro.2017.03.756.
9. Дунаев М.П., Довудов С.У. Моделирование однофазного двухуровневого автономного инвертора напряжения с частотно-импульсной модуляцией // *Информационные и математические технологии в науке и управлении*. 2020. № 2 (18). С. 134-143. doi: 10.38028/ESI.2020.18.2.011.
10. Baodong B., Dezhi C. Inverter IGBT loss analysis and calculation // *International Conference on Industrial Technology (ICIT)*. IEEE, Cape Town, 2013. Pp. 563-569. doi: 10.1109/ICIT.2013.6505733.
11. Approximate novel loss formulae estimation for optimization of power controller of DC/DC converter / A. Shahin, A. Payman, J. Martin, S. Pierfederici, F. Meibody-Tabar // *IECON 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, Glendale, AZ, 2010. Pp. 373-378. doi: 10.1109/IECON.2010.5674999.
12. Дунаев М.П. Резонансные инверторы для управления электроприводами. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2004. 103 с.
13. Blinov A., Vinnikov D., Jalakas T. Loss calculation methods of half-bridge square-wave inverters // *Elektronika Ir Elektrotehnika*. 2011. No. 7(113). Pp. 9-14. doi: 10.5755/j01.eee.113.7.604.
14. Alemi P., Lee D. Power loss comparison in two- and three-level PWM converters // *8th International Conference on Power Electronics (ECCE Asia)*, IEEE, 2011. Pp. 1452-1457. doi: 10.1109/ICPE.2011.5944455.
15. Довудов С.У., Дунаев М.П. Анализ энергетических показателей импульсных преобразователей // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2020. Т. 24. № 2. С. 345-355. doi: 10.21285/1814-3520-2020-2-345-355.
16. Shirahama H., Muto T. A novel power loss calculation method for power converters by transforming switching-loss into impulse-waveforms // *21st International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, IEEE, 2018. Pp. 2226-2229. doi: 10.23919/ICEMS.2018.8549134.
17. Дунаев М.П., Довудов С.У. Моделирование схемы частотно-импульсного преобразователя // *Информационные и математические технологии в науке и управлении*. 2019. № 3(15). С. 144-152. doi: 10.25729/2413-0133-2019-3-13.
18. Жемеров Г.Г., Ивахно В.В., Ковальчук О.И. Расчет мощности потерь и температуры структуры транзисторно-диодных модулей при компьютерном моделировании преобразователей // *Электротехника и электромеханика*. 2011. №4. С. 21-28.
19. Bouzida A., Abdelli R., M'hamed O. Calculation of IGBT power losses and junction temperature in inverter drive // *8th International Conference on Modelling, Identification and Control (ICMIC-2016)*, IEEE, 2016. Pp. 768-773. doi: 10.1109/ICMIC.2016.7804216.
20. Simple methods to calculate IGBT and diode conduction and switching losses / G. Feix, S. Dieckerhoff, J. Allmeling, J. Schonberger // *13th European Conference on Power Electronics and Applications*, IEEE, 2009. Pp. 1-8. <https://ieeexplore.ieee.org/document/5278746>.

Поступила в редакцию 14 января 2021 г.

COMPARING THE ENERGY PERFORMANCE OF PULSED DC CONVERTERS ACCORDING TO THE RESULTS OF COMPUTER SIMULATION

Mikhail P. Dunaev

D.Sc. (Engineering), Professor, Department of Electric Drive and Electric Transport, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia. E-mail: mdunaev10@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1523-5553>.

Sarfaro U. Dovudov

Postgraduate student, Department of Electric Drive and Electric Transport, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia. E-mail: dsu_1991@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5600-4615>.

Dynamic losses and efficiency of a pulse semiconductor converter depend on the circuit of the converter used. The aim of the study is to show that when a pulse-frequency converter circuit is used, it is possible to reduce dynamic losses and increase the efficiency of the converter relative to the pulse-width converter circuit. To carry out the analysis and comparison of semiconductor circuits of pulse-width and pulse-frequency converters, the methods of simulation are used in the article. The principle of operation and the main differences between pulse-width and pulse-frequency converters are described. The schemes of pulse-width and pulse-frequency converters in the Matlab environment were developed and modeled using blocks from the Simulink/SimPowerSystem/Simscape library. A model block is simulated that calculates the static and dynamic power losses of the IGBT. To calculate power losses, namely static and dynamic losses, the method of approximating the loss graphs was used. The obtained mathematical dependences describe quite accurately the graphs of the power losses of the IGBT transistor. A power transistor of the MITSUBISHI company of the CM800HC-66H type was selected as an IGBT-transistor. It is shown that using a pulse-frequency converter circuit can reduce dynamic losses and increase the efficiency of the converter relative to the pulse-width converter circuit. After analyzing the obtained characteristics of pulse semiconductor converters, it was noted that when the duty ratio changed from 0.1 to 0.5, the efficiency of the pulse-frequency converter significantly exceeded the efficiency of the pulse-width converter. This increase was more pronounced at a higher switching frequency of a pulsed semiconductor converter and a higher power of the power switches of the converters.

Keywords: pulse semiconductor converter, pulse-width modulation, pulse-frequency modulation, approximation, dynamic loss, efficiency, frequency.

REFERENCES

- Kruglikov O.V., Makarov L.N., Piskunov S.V. Development, production and application of energy efficient electrical machines and drives. *Elektrotehnika* [Russian Electrical Engineering], 2015, no. 3, pp. 4-8. (In Russian)
- Dunaev M.P., Dovudov S.U. Modeling a Pulse-Width Converter Circuit. *Trudy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Povyshenie effektivnosti proizvodstva i ispol'zovaniya elektroenergii v usloviyakh Sibiri"* [Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference "Increasing the Efficiency of Production and Use of Electricity in Siberia"]. Irkutsk, Irkutsk National Research Technical University Publ., 2019, vol. 1, pp. 3-6. (In Russian)
- German-Galkin S.G. *Shirotno-impulsnyye preobrazovateli* [Pulse-width converters]. Leningrad, Energy Publ., 1979. 96 p. (In Russian)
- Ivakhno V., Zamaruev V.V., Ilina O. Estimation of semiconductor switching losses under hard switching using Matlab/Simulink subsystem. *Electrical, Control and Communication Engineering*. 2013. Vol. 2. Iss. 1. Pp. 20-26. doi: 10.2478/ecce-2013-0003.
- Zhu Y., Xiao M., Su X., Yang G., Lu K., Wu Z. Modeling of conduction and switching losses for IGBT and FWD based on SVPWM in automobile electric drives. *Applied Sciences*. 2020. No. 10(13). 4539. doi: 10.3390/app10134539.
- Plakhtii O.A., Nerubatskiy V.P., Hordienko D.A., Khoruzhevskiy H.A. Calculation of static and dynamic losses in power IGBT transistors by polynomial approximation of basic energy characteristics. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2020. No.2. Pp. 82-88. doi: 10.33271/nvngu/2020-82.
- Wei K., Zhang C., Gong X., Kang T. The IGBT losses analysis and calculation of inverter for two-seat electric aircraft application. *Energy Procedia*. 2017. Vol. 105. Pp. 2623-2628. doi: 10.1016/j.egypro.2017.03.756.
- Dunayev M.P., Dovudov S.U. Simulation of a single-phase two-level autonomous voltage inverter with pulse frequency modulation. *Informatsionnyye i matematicheskiye tekhnologii v nauke i upravlenii* [Information and mathematical technologies in science and management], 2020, no. 2(18), pp. 134-143. (In Russian) doi: 10.38028/ESI2020.18.2.011
- Baodong B., Dezhi C. Inverter IGBT loss analysis and calculation. 2013 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), Cape Town, South Africa. 2013. Pp. 563-569. doi: 10.1109/ICIT.2013.6505733
- Shahin A., Payman A., Martin J., Pierfederici S., Meibody-Tabar F. Approximate novel loss formulae estimation for optimization of power controller of DC/DC converter. *IECON 2010 - 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, Glendale, AZ, USA. 2010. Pp. 373-378. doi: 10.1109/IECON.2010.5674999.
- Dunaev M.P. *Rezonansnyye invertory dlya upravleniya elektropriivodami* [Resonant inverters controlling electric drives]. Irkutsk, Irkutsk National Research Technical University Publ., 2004. 103 p. (In Russian)
- Blinov A., Vinnikov D., Jalakas T. Loss calculation methods of half-bridge square-wave inverters. *Elektronika Ir Elektrotehnika*. 2011. No. 7(113). Pp. 9-14. doi: 10.5755/j01.eee.113.7.604.
- Alemi P., Lee D. Power loss comparison in two- and three-level PWM converters. 8th International Conference on Power Electronics - ECCE Asia, Jeju, Korea (South). 2011. Pp. 1452-1457. doi: 10.1109/ICPE.2011.5944455.
- Dovudov S.U., Dunayev M.P. Analysis of energy indicators of pulse converters. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2020, vol. 24, no 2, pp. 345-355. doi: 10.21285/1814-3520-2020-2-345-355 (In Russian)
- Shirahama H., Muto T. A novel power loss calculation method for power converters by transforming switching-loss into impulse-waveforms. 2018 21st International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Jeju, Korea (South). 2018. Pp. 2226-2229. doi: 10.23919/ICEMS.2018.8549134.
- Dunayev M.P., Dovudov S.U. Simulation of the frequency-

- pulse converter circuit. *Informatsionnyye i matematicheskiye tekhnologii v nauke i upravlenii* [Information and mathematical technologies in science and management], 2019, no. 3 (15), pp. 144-152. doi: 10.25729/2413-0133-2019-3-13. (In Russian)
17. Zhemerov G.G., Ivakhno V.V., Kovalchuk O.I. Calculation of power losses and temperature of the structure of transistor-diode modules in computer modeling of converters. *Elektrotehnika i elektromekhanika* [Electrical Engineering & Electromechanics], 2011, no. 4, pp. 21-28. (In Russian)
18. Bouzida A., Abdelli R., M'hamed O. Calculation of IGBT power losses and junction temperature in inverter drive. 2016 8th International Conference on Modelling, Identification and Control (ICMIC), Algiers, Algeria. 2016. Pp. 768-773. doi: 10.1109/ICMIC.2016.7804216.
19. Feix G., Dieckerhoff S., Allmeling J., Schonberger J. Simple methods to calculate IGBT and diode conduction and switching losses. 2009 13th European Conference on Power Electronics and Applications, Barcelona, Spain. 2009. Pp. 1-8.
-

Дунаев М.П., Довудов С.У. Сравнение энергетических показателей импульсных преобразователей постоянного тока по результатам имитационного компьютерного моделирования // *Электротехнические системы и комплексы*. 2021. № 1(50). С. 35-41. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-1\(50\)-35-41](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-1(50)-35-41)

Dunaev M.P., Dovudov S.U. Comparing the Energy Performance of Pulsed DC Converters According to the Results of Computer Simulation. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2021, no. 1(50), pp. 35-41. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-1\(50\)-35-41](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-1(50)-35-41)

Швидченко Н.В.¹, Лукьянов С.И.¹, Пишнограев Р.С.^{1,2}, Швидченко Д.В.^{1,2}, Красильников С.С.^{1,3}¹ Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова² ООО «Техноап Инжиниринг», г. Магнитогорск³ ООО «ММК-информсервис», г. Магнитогорск

ОПТИМИЗАЦИЯ СКОРОСТНОГО РЕЖИМА ОТВОДЯЩЕГО РОЛЬГАНГА СТАНА ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ

Существующий способ управления электроприводом отводящего рольганга стана горячей прокатки обеспечивает требуемое натяжение в полосе за счёт рассогласования скоростей транспортируемой полосы и бочек роликов рольганга. Наличие рассогласования скоростей приводит к повышенному износу бочек роликов и более частой их замене, что сопряжено с большими экономическими затратами. В связи с этим актуальной является задача повышения эффективности работы электропривода отводящих рольгангов станов горячей прокатки. На стане 2000 ПАО «ММК» были проведены экспериментальные исследования составляющих момента нагрузки электродвигателей роликов отводящего рольганга. В работе использовались аналитические методы решения алгебраических задач, методы компьютерного моделирования и статистические методы обработки временных диаграмм изменения токов нагрузки электродвигателей роликов отводящего рольганга. По результатам экспериментальных исследований была предложена методика расчёта требуемого момента электропривода ролика отводящего рольганга. Выполнена коррекция обязательных технологических требований к электроприводу роликов отводящего рольганга с позиции снижения интенсивности износа бочек роликов и повышения качества поверхности полосы. Разработаны способ управления и функциональная схема системы управления электроприводом роликов отводящего рольганга, обеспечивающие выполнение новых технологических требований. Отличительной особенностью функциональной схемы является наличие в ее структуре вычислительного блока, выполняющего расчет требуемого по технологии момента электродвигателя и соответствующего задания на скорость вращения якоря электродвигателя. Проведена экспериментальная оценка эффективности предложенных технических решений. В результате для 13 % прокатанных на стане полос в режиме транспортирования головной части полосы рассогласование скоростей между роликами отводящего рольганга и полосой удалось снизить более чем в 2 раза, обеспечивая при этом необходимое натяжение в полосе.

Ключевые слова: стан горячей прокатки, отводящий рольганг, электропривод отводящего рольганга, система управления электроприводом отводящего рольганга, износ бочек роликов, ламинарное охлаждение полосы, оптимизация скоростного режима отводящего рольганга.

ВВЕДЕНИЕ

Отводящий рольганг (ОР) стана горячей прокатки предназначен для транспортирования полосы от последней прокатной клетки до моталки. Ролики ОР работают в тяжёлых условиях, связанных с высокой температурой транспортируемых полос и трением между роликами и полосой в процессе транспортировки. В результате ролики подвергаются интенсивному износу и частым поломкам [1-3]. Кроме того, трение полосы о ролики рольгангов является одной из причин повреждения нижней поверхности прокатываемых полос [3].

Одним из способов снижения интенсивности износа бочек роликов ОР и повышения качества поверхности полосы является исключение проскальзывания между роликами и полосой [4-6]. Однако в режиме транспортирования головной части полосы с момента выхода её из последней прокатной клетки до момента захвата полосы моталкой опережение скорости роликов рольганга над скоростью полосы является обязательным технологическим требованием, направленным на обеспечение натяжения и надёжного транспортирования полосы. В режиме транспортирования хвостовой части полосы после её выхода из прокатной клетки обязательным технологическим требованием является отставание скорости рольганга от скорости полосы для обеспечения её натяжения и качественной смотки. На практике величины опережения и отставания подбираются экспериментальным путём с позиции обеспечения надёжного транспортирования и смотки полосы

и задаются посредством человеко-машинного интерфейса с поста оператора [7]. При этом значительное рассогласование скоростей роликов и полосы в данных режимах работы ОР приводит к интенсивному износу бочек роликов и повреждению поверхности полосы. Первой целью данного исследования является уменьшение рассогласования скоростей роликов и полосы, не нарушая известных требований по созданию тянущих усилий в головной и хвостовой частях полосы.

Второй целью данного исследования является минимизация усилий на контакте роликов с полосой в режиме транспортирования средней части полосы, когда головная часть полосы захвачена барабаном моталки. В данном режиме натяжение полосы осуществляется между моталкой и клетью, и наличие усилий на контакте роликов с полосой является нежелательным, поскольку приводит к износу бочек роликов и снижению качества поверхности полосы. На практике при транспортировании средней части полосы скорость роликов рольганга задаётся равной скорости полосы. Недостатком данного способа является то, что согласование скорости ролика и полосы не гарантирует минимизации усилий на их контакте, поскольку в условиях сцепления ролика с полосой усилие на их контакте может изменяться от максимального тормозящего усилия до максимального тянущего усилия. В работах [4, 5] авторами рекомендуется управлять не скоростью, а моментом электропривода ролика M , поддерживая последний на уровне момента холостого хода $M_{ХХ}$. Кроме того, в режимах разгона и торможения в дополнение к заданному моменту холостого хода добавляется составляющая динамического момента $M_{дин}$, рассчитанная по показаниям датчика скорости. Однако

известно [8], что помимо указанных составляющих в момент нагрузки электропривода M ролика рольганга присутствует момент сопротивления M_c , обусловленный трением в подшипниках ролика под действием веса полосы, который также нужно компенсировать. Кроме того, на момент нагрузки электропривода ролика ОР значимое влияние могут оказать такие технологические факторы, как скорость транспортирования полосы (изменяется в широких пределах от 2 до 20 м/с в зависимости от сортамента) и подача на полосу воды при включении установок охлаждения полосы. Однако в литературе подобные исследования отсутствуют.

Объектом данного исследования является ОР стана 2000 ПАО «ММК». Достижение поставленных целей потребовало решения следующих задач:

1. Проведение экспериментальных исследований составляющих моментов нагрузки электродвигателей роликов ОР стана 2000 ПАО «ММК».
2. Разработка методики расчёта требуемого момента электропривода ролика ОР в различных режимах транспортирования полосы на основании проведенных экспериментальных исследований.
3. Коррекция обязательных технологических требований к электроприводу роликов ОР с позиции снижения интенсивности износа бочек роликов и повышения качества поверхности полосы.
4. Разработка способа и системы управления электроприводом роликов ОР, обеспечивающих выполнение новых технологических требований.
5. Экспериментальная оценка эффективности предложенных технических решений.

ПРОЦЕССЫ, ПРОИСХОДЯЩИЕ НА ОТВОДЯЩЕМ РОЛЬГАНГЕ

Упрощенная структурная схема уборочной линии стана горячей прокатки 2000 ПАО «ММК» приведена на **рис. 1**. После выхода из последней прокатной клетки 1 полоса транспортируется роликами ОР 2 до моталки 3, где осуществляется её смотка. Транспортировка полосы по ОР выполняется с ускорением для обеспечения постоянства температуры на выходе из клетки. Для обеспечения требуемой температуры смотки полоса сверху и снизу охлаждается водой из установок ламинарного охлаждения 4.

Каждый ролик ОР приводится в движение индивидуальным приводом постоянного тока. ОР разделён на роликосекции с групповым управлением скоростью роликов каждой секции. Система управления электроприводом секции ОР приведена на **рис. 2**. Задание на скорость ОР V_3 формируется в АСУ ТП стана в соответствии с основными технологическими требованиями к электроприводу ОР. Оператор на посту управления имеет возможность корректировать задание на скорость роликов секции ОР.

Типовая временная диаграмма изменения задания на скорость первой секции ОР стана горячей прокатки 2000 ПАО «ММК» приведена на **рис. 3**. Дополнительно на **рис. 3** представлены вспомогательные сигналы наличия металла в клетке и наличия металла в моталке, а также относительное значение задания на скорость рольганга к скорости полосы.

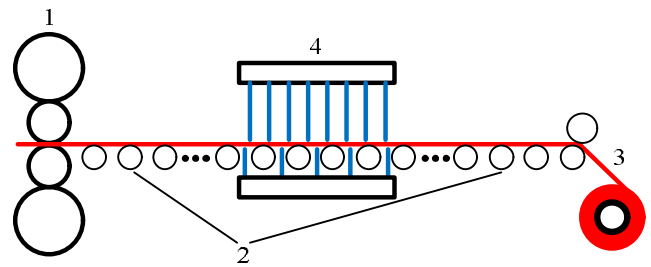


Рис. 1. Упрощенная структура отводящего рольганга

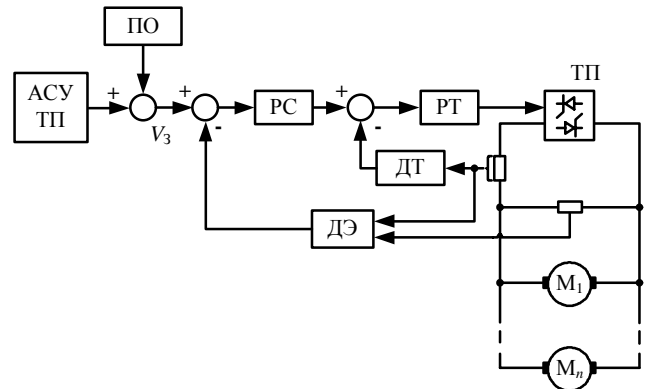


Рис. 2. Система управления скоростью секции ОР: ПО – пульт оператора; РС – регулятор скорости; РТ – регулятор тока; ТП – тиристорный преобразователь; ДЭ – датчик ЭДС; M_1 - M_n – электродвигатели

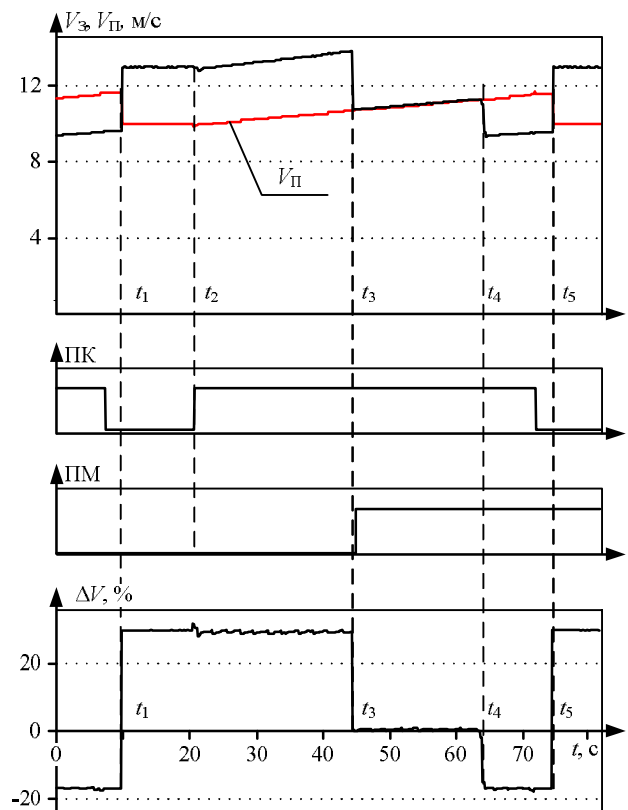


Рис. 3. Типовая временная диаграмма изменения задания на скорость 1-й секции ОР: V_3 – задание на скорость секции; $V_{П}$ – скорость полосы; ПК – сигнал наличия полосы в последней прокатной клетке; ПМ – сигнал наличия полосы в принимающей моталке; ΔV – изменение скорости секции ОР относительно скорости полосы

В момент времени t_1 выполняется разгон ОР для приёма головной части полосы. В интервале времени ($t_2; t_3$) осуществляется транспортирование головной части полосы. С момента t_3 захвата полосы роликотами моталки скорость роликов секции ОР задаётся равной скорости полосы (скорости прокатной клети). В момент времени t_4 перед выходом полосы из клети скорость роликов секции ОР задаётся с отставанием относительно скорости полосы (скорости моталки) с целью качественной смотки хвостовой части полосы. В момент времени t_5 заданная на скорость роликов секции ОР выставляется с опережением скорости прокатной клети для приёма следующей полосы.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Согласно [8] общий момент электродвигателя ролика ОР определяется выражением

$$M = M_{\text{XX}} + M_{\text{ДИН}} + M_{\text{С}} + M_{\text{ТР}}, \quad (1)$$

где $M_{\text{ТР}}$ – момент транспортирования, обусловленный наличием сил трения на контакте ролик-полоса в одном межроликовом пространстве.

На стане 2000 ПАО «ММК» проведены экспериментальные исследования составляющих момента нагрузки электродвигателей роликов ОР (1).

Исследование моментов холостого хода

Проведены исследования изменения токов холостого хода электродвигателей роликов ОР [9]. С этой целью на стане 2000 ПАО «ММК» выполнены измерения токов якоря электродвигателей роликов ОР I_{XXi} в режиме прокрутки роликов рольганга на холостом ходу. Измерения проводились на различном уровне скорости ОР и в различные временные интервалы для одного уровня скорости.

В результате статистического анализа полученных данных установлено:

Уровень скорости ОР значимо влияет на величину и распределение токов холостого хода I_{XXi} . Доказано, что изменение токов холостого хода I_{XXi} электроприводов роликов ОР в зависимости от скорости V_3 носит случайный характер.

Значения токов холостого хода I_{XXi} с течением времени претерпевают значительные изменения. Доказано, что в течение межремонтного периода (одна неделя) можно с вероятностью $p = 0,95$ утверждать, что ток холостого хода изменится не более чем на 4,63% при условии неизменного состояния механической части электропривода (исправность подшипниковых узлов).

На основании полученных результатов можно утверждать, что для определения моментов холостого хода электродвигателей роликов ОР целесообразно создавать массив токов холостого хода I_{XXi} электроприводов роликов ОР после завершения ремонтных работ при прокрутке роликов ОР на холостом ходу на различной скорости ОР V_3 в пределах рабочего диапазона скоростей.

Расчет значения момента M_{XXi} выполняется по известному выражению [10]:

$$M_{\text{XXi}} = I_{\text{XXi}}(c\Phi)_i, \quad (2)$$

где $(c\Phi)_i$ – произведение конструктивной постоянной электродвигателя на его поток, В·с.

Момент сопротивления

Значение $M_{\text{С}}$ для электродвигателя ролика ОР можно рассчитать по выражению

$$M_{\text{С}} = G_{\text{М}} K_{\text{ТР}} R_{\text{Ц}}, \quad (3)$$

где $G_{\text{М}}$ – вес полосы в межроликовом пространстве, Н; $K_{\text{ТР}} = 0,05-0,1$ – коэффициент трения в подшипниках ролика; $R_{\text{Ц}}$ – радиус цапфы ролика, м.

В работе [9] показано, что для более точного расчета момента $M_{\text{С}}$ можно использовать известные значения моментов холостого хода электродвигателей T_i :

$$M_{\text{С}} = M_{\text{XX}} \frac{G_{\text{П}}}{G_{\text{Р}}}, \quad (4)$$

где $G_{\text{Р}}$ – вес ролика ОР, Н.

Динамический момент

С целью определения динамической составляющей момента электропривода $M_{\text{ДИН}}$ ролика ОР для технологических параметров электропривода роликов ОР стана 2000 ПАО «ММК» разработана динамическая модель [9]. Доказана адекватность расчётов на данной динамической модели экспериментальным данным.

Момент транспортирования

Момент $M_{\text{ТР}}$ определяется силой трения на контакте ролик-полоса и зависит от соотношения скорости образующей бочки ролика $V_{\text{Р}}$ и полосы $V_{\text{П}}$ (рис. 4) [11, 12]. При согласовании скоростей электропривод работает в режиме сцепления ролика с полосой, при этом усилие на контакте изменяется от максимального тормозящего до максимального тянущего значений. При увеличении рассогласования скоростей электропривод ролика рольганга переходит в режим «буксовки» – трение на контакте ролик-полоса снижается.

Заданным режимом работы электропривода ОР при транспортировании головной и хвостовой частей полосы является режим «буксовки». Момент $M_{\text{ТР}}$ для данного режима рассчитывается по выражению:

$$M_{\text{ТР}} = \pm G_{\text{М}} \mu_{\text{Б}} R_{\text{Р}}, \quad (5)$$

где $\mu_{\text{Б}} = 0,2-0,3$ – коэффициент трения скольжения ролика о металл в режиме буксования [11, 12].

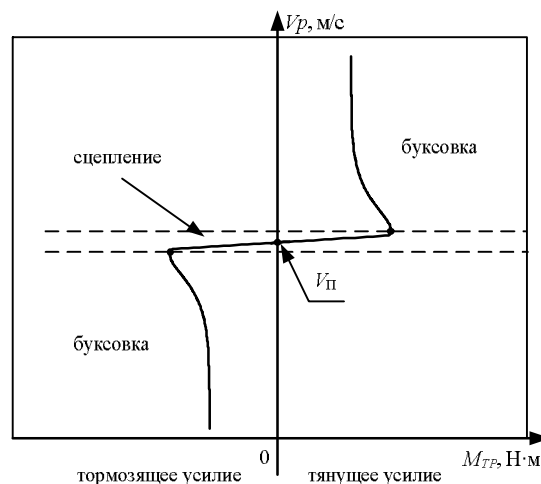


Рис. 4. Качественная зависимость момента транспортирования от рассогласования скоростей образующей бочки ролика и полосы

Знак «+» в выражении (5) используется для случая транспортирования головной части полосы, знак «-» – для случая транспортирования хвостовой части полосы.

В режиме транспортирования центральной части полосы заданным режимом является режим «сцепления». Момент $M_{тр}$ для данного режима рассчитывается по выражению

$$M_{тр} = G_M \mu_{сц} R_p, \quad (6)$$

где $\mu_{сц} = -0,3-0,3$ – коэффициент трения ролика о металл в режиме сцепления [11, 12].

Момент нагрузки от действия охлаждающей воды

На основании (1) с учётом (2), (4)-(6) был выполнен расчёт моментов нагрузки электродвигателей роликов ОР стана 2000 ПАО «ММК». Расчёт проведён для роликов первых двух секций ОР (120 роликов) при транспортировании полос различного сортамента для режимов транспортирования головной и средней частей полосы. Установлено, что для большинства роликов, находящихся в зоне действия ламинарного охлаждения (от 20 до 40 роликов в зависимости от схемы охлаждения), для всех исследуемых случаев расчётные и экспериментальные значения существенно различаются (до 190%). Таким образом, известная методика (1) требует уточнения с позиции учёта действия охлаждающей воды на нагрузку электропривода ролика.

Поскольку в технической литературе отсутствуют исследования влияния фактора включения ламинарного охлаждения на нагрузку электродвигателей роликов ОР, было принято решение провести экспериментальные исследования в условиях стана 2000 ПАО «ММК». На рис. 5 приведено типовое распределение токов нагрузки электродвигателей за вычетом измеренных значений токов холостого хода для первых двух секций ОР при включении одной из схем охлаждения полосы.

Анализ представленных распределений показал:

1. Включение ламинарного охлаждения приводит к увеличению токов нагрузки электродвигателей роликов, находящихся в зоне действия подачи воды.

2. Чем выше скорость ОР, тем больше величина изменение токов нагрузки.

3. Увеличение нагрузки наблюдается преимущественно при включении нижних устройств подачи воды. Подача воды только из верхних устройств не приводит к значительному изменению нагрузки.

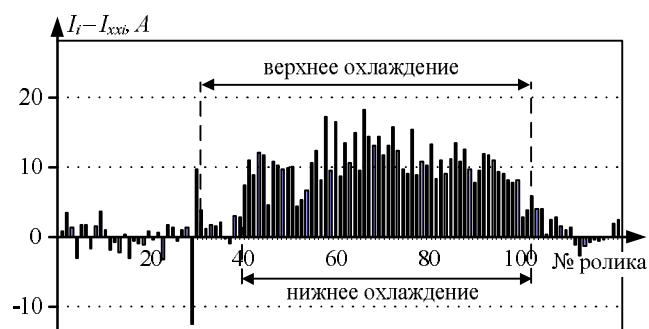


Рис. 5. Распределение токов нагрузки электродвигателей

На основании вышеизложенного можно предположить, что изменение нагрузки при включении ламинарного охлаждения обуславливается потерями на «разгон» воды, попадающей на бочку ролика. Такая модель объясняет, в частности, почему не наблюдается значительного изменения нагрузки при включении только верхних устройств охлаждения. При подаче воды с верхних устройств значительная часть воды остается на полосе и испаряется, не достигая бочек роликов, в то время как вода из нижних устройств падает на ролики практически в полном объеме [13].

Выделение составляющей нагрузки от действия охлаждающей воды из общего тока нагрузки усложняется тем, что установки ламинарного охлаждения включаются одновременно с перемещением полосы по рольгангу. Поэтому было принято решение провести эксперимент по включению ламинарного охлаждения в режиме прокрутки роликов ОР на холостом ходу. В ходе эксперимента выполнялся последовательный разгон роликов 1, 2 секций ОР до установившихся значений скорости образующих бочек роликов $V_{31} = V_{32} = 10$ м/с, 12 м/с, 14 м/с, 18 м/с, 20 м/с с последующим включением нижних устройств системы охлаждения (T_1, T_2, T_3, T_4, T_5) (рис. 6).

На основании полученных экспериментальных данных рассчитаны составляющие тока нагрузки, обусловленные действием воды из системы охлаждения:

$$I_{ли} = I_i - I_{ххi}, \quad (7)$$

где I_i – ток электродвигателя, измеренный после включения охлаждения (см. рис. 6 – периоды T_1-T_5), А; $I_{ххi}$ – ток электродвигателя, измеренный перед включением охлаждения, А.

С помощью критерия Пирсона доказано соответствие полученных распределений (7) нормальному закону, что позволяет применить к ним регрессионный анализ [14]. В таблице приведены средние значения и выборочные среднеквадратические отклонения для моментов $M_{ли}$, рассчитанных по полученным экспериментальным данным $I_{ли}$ (7) для каждого уровня скорости V_3 .

На основании полученных данных (см. рис. 6), а также учитывая, что согласно принятой теоретической модели, момент $M_{л}$ обусловлен «разгоном» воды, т.е. приданием ей дополнительной кинетической энергии, в качестве регрессионной кривой было решено использовать полиномиальную квадратичную зависимости вида

$$\overline{M}_{л}(V_p) = A_2 V_p^2 + A_1 V_p, \quad (8)$$

где A_1, A_2 – коэффициенты регрессии.

Определение коэффициентов уравнения регрессии выполнено методом наименьших квадратов по данным таблице. В результате уравнение регрессии приняло вид, показанный на рис. 7.

С помощью критерия Фишера доказана адекватность полученной регрессионной зависимости экспериментальным данным [14]. Предложенная методика расчёта составляющей момента $M_{л}$ может быть использована на других станах горячей прокатки.

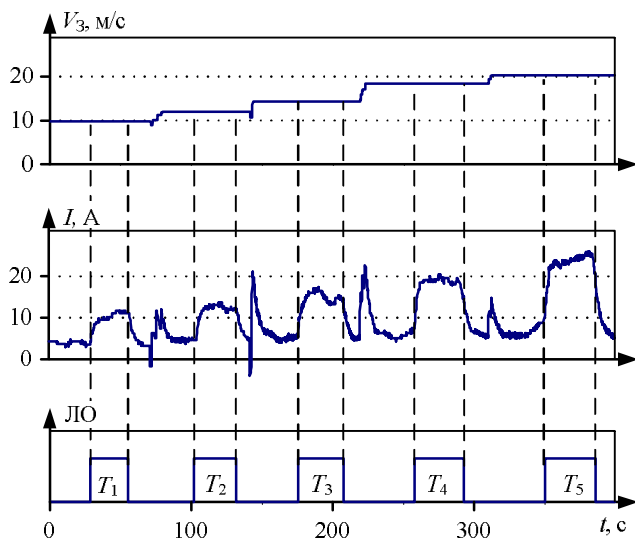


Рис. 6. Временная диаграмма изменения тока нагрузки электропривода ролика ОР при включении нижней установки ламинарного охлаждения в зоне данного ролика

Обработка экспериментальных данных

$V_3, \text{ м/с}$	$\bar{M}_L, \text{ Н}\cdot\text{м}$	$S\{M_L\}, \text{ Н}\cdot\text{м}$
10	7,89	3,42
12	10,67	3,80
14	13,89	4,81
20	23,91	8,32

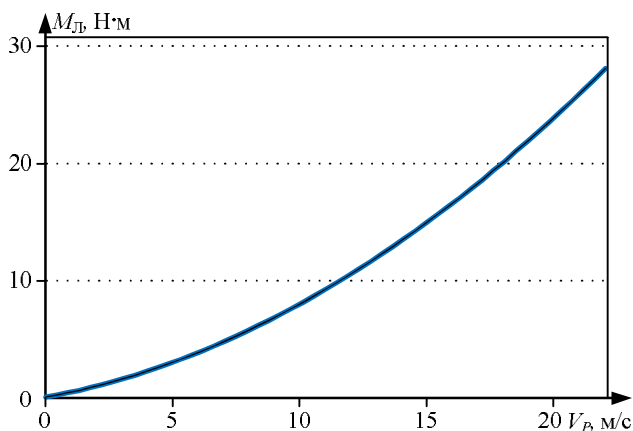


Рис. 7. Экспериментальная зависимость момента сопротивления M_L от окружной скорости ролика V_p

МЕТОДИКА

С учётом полученной зависимости выражение для расчета момента нагрузки электропривода ролика ОР примет вид

$$M = M_{XX} + M_C + M_{TR} + M_L + M_{ДИН}. \quad (9)$$

По данному выражению выполнен расчёт моментов нагрузки электродвигателей роликов ОР стана 2000 ПАО «ММК». Расчёт проведён для роликов первых двух секций ОР при транспортировании полос различного сортамента для режимов транспортирования головной и средней частей полосы. Доказана адекватность расчётных результатов экспериментальным данным.

На основании проведённых исследований предложена следующая методика расчёта требуемого момента нагрузки электропривода ролика ОР:

1. Предварительно создается массив токов холостого хода I_{XXi} электродвигателей роликов отводящего рольганга в рабочем диапазоне скоростей транспортирования (от 2 до 20 м/с). Выполняется расчет момента холостого хода M_{XXi} электропривода ролика отводящего рольганга по выражению (2).

2. Выполняется расчет момента M_{Ci} электропривода ролика отводящего рольганга по выражению (4).

3. Выполняется расчет динамического момента $M_{ДИНi}$ электропривода ролика отводящего рольганга на разработанной динамической модели по изменению задания на скорость транспортирования V_3 .

4. Для электроприводов роликов, находящихся в зоне действия системы охлаждения, по выражению (8) выполняется расчет момента M_{Li} .

5. Выполняется расчет требуемого момента транспортирования M_{TRi} электропривода ролика отводящего рольганга с позиции снижения износа бочек роликов и повышения качества поверхности полосы:

$$M_{TR} = G_M \mu_{СЦ} R_P, \quad (10)$$

где $\mu_{СЦ} = 0,3$ – в режиме транспортирования головной части полосы; $\mu_{СЦ} = 0$ – в режиме транспортирования средней части полосы; $\mu_{СЦ} = -0,3$ – в режиме транспортирования хвостовой части полосы.

6. По выражению (9) выполняется расчет общего момента электродвигателя ролика отводящего рольганга M_i .

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ

Проведенные исследования позволили уточнить известные технологические требования к электроприводу роликов ОР с позиции снижения износа роликов.

Электропривод роликов ОР в рабочих режимах транспортирования полосы должен обеспечить реализацию известных технологических требований в пределах диапазона изменения сил сцепления на контакте ролик-полоса (рис. 8), а именно:

1. В режиме транспортирования головной части полосы задание на скорость ролика ОР должно обеспечивать требуемый момент нагрузки электропривода:

$$M = M_{XX} + M_C + M_{TR} + M_L + M_{ДИН}, \quad (11)$$

где M_{TR} – момент, рассчитанный по выражению (10) для случая транспортирования головной части полосы.

2. В режиме транспортирования центральной части полосы задание на скорость ролика ОР должно обеспечивать требуемый момент нагрузки электропривода:

$$M = M_{XX} + M_C + M_L + M_{ДИН}. \quad (12)$$

3. В режиме транспортирования хвостовой части полосы задание на скорость ролика ОР должно обеспечивать требуемый момент нагрузки электропривода:

$$M = M_{XX} + M_C + M_{TR} + M_L + M_{ДИН}, \quad (13)$$

где M_{TR} – момент, рассчитанный по выражению (10) для случая транспортирования хвостовой части полосы.

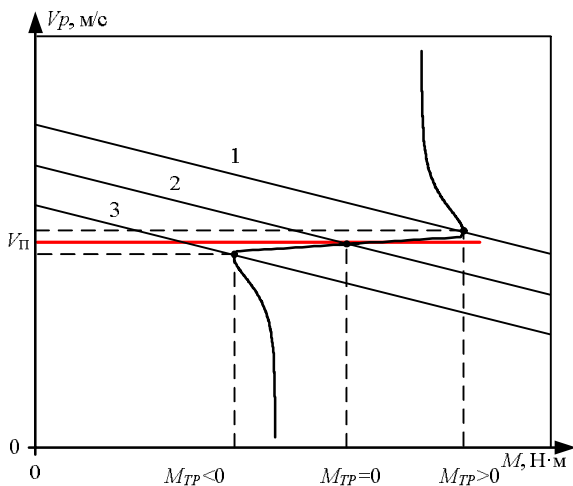


Рис. 8. К расчету технологических требований к электроприводу ролика ОР: 1 – в режиме транспортирования головной части полосы; 2 – в режиме сопровождения полосы; 3 – в режиме транспортирования хвостовой части полосы

СПОСОБ УПРАВЛЕНИЯ

Учитывая наметившуюся тенденцию перехода от групповой схемы питания электродвигателей роликов ОР к индивидуальной схеме, предложена функциональная схема системы управления электроприводом ролика ОР (рис. 9).

Отличительной особенностью схемы является наличие в ее структуре вычислительного блока (ВБ), выполняющего расчет требуемого по технологии момента электродвигателя M ролика ОР и соответствующего задания на скорость вращения якоря электродвигателя V_3 .

Управляющее воздействие V_3 (см. рис. 9) формируется из двух составляющих. Составляющая $V_{3П}$ задается пропорциональной скорости полосы в соответствии с выражением

$$V_{3П} = \frac{V_{П} k_{ОЭ}}{R_p} (c\Phi), \tag{14}$$

где $k_{ОЭ}$ – коэффициент обратной связи по ЭДС, В·с/рад.

Корректирующее воздействие ΔV_3 рассчитывается по требуемому по технологии значению момента электродвигателя ролика M (9):

$$\Delta V_3 = \frac{M_i \cdot k_{ОТ}}{(c\Phi) \cdot k_{РС}}, \tag{15}$$

где $k_{ОТ}$ – коэффициент обратной связи по току, В/А; $k_{РС}$ – коэффициент передачи регулятора скорости.

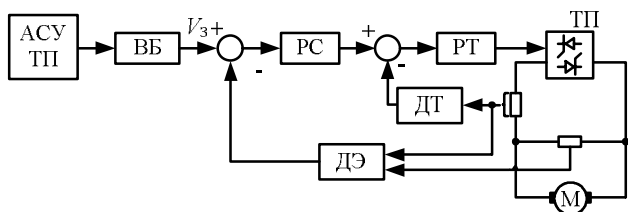


Рис. 9. Система управления скоростью ролика ОР

- Из АСУ ТП в ВБ поступают следующие сигналы:
- 1) h, S – толщина и ширина полосы соответственно, м;
 - 2) дискретные сигналы управления клапанами задвижек системы охлаждения полосы;
 - 3) сигнал скорости движения полосы $V_{П}$, м/с;
 - 4) дискретные сигналы наличия металла для определения режима транспортирования полосы: ПК и ПМ.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Экспериментальную апробацию результатов исследований было решено провести на второй секции ОР стана 2000 ПАО «ММК», поскольку наибольшее количество замен роликов по причине износа приходится именно на эту секцию. Апробация проводилась в режиме транспортирования головной части полос среднего сортамента от 2,8 до 6,5 мм. Согласно разработанной методике (9) с учётом технологических условий транспортирования полос для электроприводов второй секции ОР был выполнен расчёт требуемых моментов нагрузки. Учитывая, что в условиях группового питания электродвигателей секции индивидуальное регулирование скорости роликов невозможно, при расчёте требуемого задания на опережение учитывались электродвигатели с наибольшей нагрузкой. По выражению (15) для параметров электропривода секций был выполнен расчёт требуемого опережения скорости секции относительно полосы. В режиме транспортирования головной части полос указанного сортамента штатное задание на опережение заменялось расчётным. По требованию технологического персонала разгон и прием головной части полос осуществлялись в штатном режиме. Коррекция скорости выполнялась только после заполнения полосой второй секции ОР.

На рис. 10 приведены временные диаграммы изменения задания на скорость второй секции ОР при включении алгоритма коррекции скоростного режима. Для сравнения на каждой из диаграмм показано по две полосы одинакового сортамента: первая полоса транспортируется без коррекции скорости со штатным опережением полосы, вторая – с расчётным опережением.

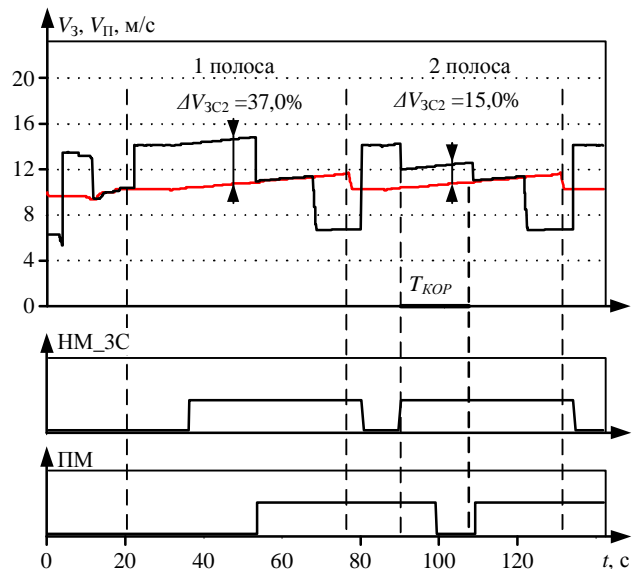


Рис. 10. Включение алгоритма коррекции скоростного режима секции ОР

За три месяца промышленной апробации были получены следующие результаты:

1. Для 13 % прокатанных полос на стане полос рассогласование скоростей между роликами второй секции и полосой в режиме транспортирования головной части полосы было снижено более чем в 2 раза.

2. Для указанных 13 % полос не было зафиксировано ни одного случая аварийного застревания полосы на рольганге или в моталке.

Анализ распределений токов нагрузки электродвигателей второй секции ОР показал, что все электродвигатели секции обеспечивают требуемое при транспортировании головной части полосы тянущее усилие на контакте ролика с полосой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применяемый в настоящее время способ управления скоростным режимом ОР стана горячей прокатки приводит к интенсивному износу бочек роликов и ухудшению качества поверхности полосы из-за чрезмерного рассогласования скоростей роликов и полосы.

Оптимизация скоростного режима ОР с позиции уменьшения рассогласования скоростей роликов и полосы в режимах транспортирования головной и хвостовой частей полосы (при обязательном выполнении требований по созданию натяжения в полосе) и минимизации усилий на контакте роликов с полосой в режиме транспортирования средней части полосы позволит снизить износ бочек роликов и повысить качество поверхности полосы без значительных капитальных затрат.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Давильбеков Н.Х., Клеменьтьев В.А., Курпанов Г.Г. Увеличение стойкости роликов отводящего рольганга листопркатных станов // *Сталь*. 2003. №10. С. 44-47
2. Поляков Б.А., Варшавский Е.А., Каретный З.П. Опыт повышения эффективности работы отводящего рольганга НШС // *Сталь*. 1987. №9. С.64-67.
3. Calculation of the stress-strain state of the deflector rollers / A. Alimbetov, Y. Kaliyev, A. Zhauyt, G. Yestemessova, S. Yussupova, M. Nurbakyt // *Vibroengineering PROCEDIA*. 2018. Vol. 18. Pp. 183-188. doi: 10.21595/vp.2018.19861.
4. Pat. JPH091219 (A). B21B37/00; B21B37/46; B21B39/12. Method for controlling speed of roller table of rolling mill / Yoshikazu M., Toshio S., Takayuki T.; No. JP19950149029,

- application date 15.06.1995, publication date 07.01.1997.
5. Pat. JPS61262416 (A). B21B39/12. Control method for roller table driving of rolling mill / Yoshiyuki K.; No. JP19850103184, application date 15.05.1985, publication date 20.11.1986.
6. А.с. № 1045763 А1 СССР, МКИ В21В 37/00. Способ регулирования скорости вращения роликов отводящего рольганга широкополосного стана горячей прокатки / Антонов В.М., Абиев А.Г., Кавыгин В.В., Белянский А.Д., Котлюба Г.Н.; заявитель Липецкий политехнический институт, Новолипецкий металлургический завод. № 2914017, заявл. 23.04.1980, опубл. 15.10.1983.
7. Yajun W. Designing of hot strip rolling mill Control // *System World Journal of Engineering and Technology*. 2016. No. 4. Pp. 413-417. doi: 10.4236/wjet.2016.43040 .
8. Пат. №2373006 С2 Российская Федерация, МПК В21В 37/46. Способ управления скоростным режимом отводящего рольганга широкополосного стана / Титов А.В., Лукьянов С.И., Швидченко Н.В., Швидченко Д.В., Муштаев А.Н., Бочковский Н.И.; заявитель ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат». № 2007133478/02, заявл. 06.09.2007, опубл. 20.11.2009.
9. Система диагностирования оборудования электропривода отводящего рольганга стана 2000 горячей прокатки / С.И. Лукьянов, Р.С. Пишнограев, Н.В. Швидченко, А.П. Мухин, А.С. Лазаренко, А.А. Юдина, Е.В. Астафьев // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2005. №4(12). С. 51-53.
10. Ключев В.И. Теория электропривода: учеб. для вузов. М.: Энергоатомиздат, 2001. 704 с.
11. Тянущая способность отводящего рольганга широкополосного стана / Б.А. Поляков, Ю.С. Зубков, Е.А. Варшавский, В.В. Володин // *Известия вузов. Черная металлургия*. 1986. №10. С. 64-67.
12. Лукьянов С.И., Швидченко Н.В., Пишнограев Р.С. Система управления электроприводом отводящего рольганга широкополосного стана горячей прокатки // *Вестник ИГЭУ*. 2012. № 6. С. 95-99.
13. Temperature measurement technology in water cooling process and high accuracy cooling control technology for high tensile hot rolled strip / T. Honda, S. Nakagawa, H. Tachibana, C. Uematsu, Y. Buei, K. Sakagami // *Nippon Steel & Sumitomo Metal Technical Report*. 2016. No. 111. Pp. 18-23 URL: <https://www.nipponsteel.com/en/tech/report/nssmc/pdf/111-04.pdf> (дата обращения: 09.01.2021).
14. Diez D.M., Barr C.D., Cetinkaya-Rundel M., Dorazio L. *Advanced High School Statistic*. OpenIntro: Inc. First Edition, 2014. 402 p.

Поступила в редакцию 12 января 2021 г.

INFORMATION IN ENGLISH

SPEED RATE OPTIMIZATION OF THE RUN-OUT TABLE OF A HOT STRIP MILL

Nikolay V. Shvidchenko

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

Sergey I. Lukyanov

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

Roman S. Pishnograev

Ph.D. (Engineering), Leading Engineer, OSC «Technoap Engineering», Magnitogorsk, Russia. E-mail: rspishnograev@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8854-5723>.

Dmitry V. Shvidchenko

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Vice Director, «Technoap Engineering», Magnitogorsk, Russia. E-mail: schvidmit@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1932-9239>.

Sergey S. Krasilnikov

Ph.D. (Engineering), Engineer, OSC «MMK-Informservice», Magnitogorsk, Russia. E-mail: krasilnikov.ss@yandex.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3131-7193>

The existing method of run-out table drive control at the hot strip mill ensures the required strip tension by setting a difference between the speeds of the delivered strip and roller bodies. Such difference results in a higher wear rate of roller bodies and their more frequent replacement entailing high expenses. Thus, a currently important objective is to increase efficiency of run-out table drives on hot strip mills. The research group carried out experimental research of run-out table roller motor torque elements at a hot strip mill, PJSC MMK. The paper uses analytical methods to solve algebraic equations, computer modeling methods and statistical methods to process run-out table motor current variation diagram. As a result of the research performed, the authors offered the methodology to calculate the required run-out table roller drive load torque. They also adjusted the mandatory process requirements for a run-out table roller drive with regard to a decreased wear rate of roller bodies and the improved strip surface quality. The authors developed a method and a functional diagram to control the drive of run-out table rollers ensuring compliance with new process requirements. A special feature of the diagram is a computing block calculating run-out table roller motor torque according to the process requirements and relevant reference motor armature speed. The efficiency of the offered technical solutions was under an experimental evaluation. As a result, for 13 percent of rolled strips the difference between speeds of the run-out table rollers and the strip in a strip head delivery mode decreased by 50% or even more, while providing the necessary tension in the strip.

Keywords: hot strip mill, run-out table, run-out table drive, run-out table drive control system, wear of roller bodies, strip laminar cooling, optimizing speed of a run-out table.

REFERENCES

1. Davilbekov N.Kh., Klementev V.A., Kurpanov G.G. Increasing durability of run-out table rollers on sheet mills. *Stal* [Steel], 2003, no. 10, pp. 44-47. (In Russian)
2. Polyakov B.A., Varshavsky E.A., Karetny Z.P. Experience with increasing efficiency of the run-out table on the continuous hot strip mill. *Stal* [Steel], 1987, no.9, pp. 64-67. (In Russian)
3. Alimbetov A., Kaliyev Y., Zhauyt A., Yestemessova G., Yussupova S., Nurbakyt M. Calculation of the stress-strain state of the deflector rollers. *Vibroengineering PROCEDIA*. 2018. Vol. 18. Pp. 183-188. doi: 10.21595/vp.2018.19861.
4. Yoshikazu M., Toshio S., Takayuki T. Method for controlling speed of roller table of rolling mill 1995, JPH091219A.
5. Yoshiyuki K. Control method for roller table driving of rolling mill 1995, JPS61262416.
6. Antonov V.M., Abiev A.G., Kavygin V.V., Belyanskiy A.D., Kotlyuba G.N. *Sposob regulirovaniya skorosti vrashcheniya rolikov otvodyashchego rol'ganga shirokopolosnogo stana goryachey prokatki* [Method for controlling rotational speed of run-out table rolls of a wide strip hot rolling mill]. Patent RF, no. 1045763, 1983.
7. Yajun W. Designing of hot strip rolling mill control system. *World Journal of Engineering and Technology*. 2016. No. 4. Pp. 413-417.
8. Titov A.V., Lukyanov S.I., Shvidchenko N.V., Shvidchenko D.V., Mushtaev A.N., Bochkovskij N.I. *Sposob upravleniya skorostnym rezhimom otvodyashchego rolganga shirokopolosnogo stana* [Control method of velocity mode of outgoing roller table of wide-strip rolling mill]. Patent RF, no. 2373006, 2009.
9. Lukyanov S.I., Pishnograev R.S., Shvidchenko N.V., Muhin A.P., Lazarenko A.S., Yudina A.A., Astafev E.V. A diagnosis system of a run-out roller table drive on hot rolling mill 2000. *Vestnik MGTU im. G.I. Nosova* [Bulletin of Novosov Magnitogorsk State Technical University], 2005, No. 4(12), pp. 51-53. (In Russian)
10. Klyuchev V.I. *Teoriya elektropivoda* [Theory of Electric Drive]. Moscow, Energoatomizdat, 2001, 704 p. (In Russian)
11. Polyakov B.A., Zubkov Yu.S., Varshavsky E.A., Volodin V.V. Pulling force of a run-out roller table of the hot strip mill. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya* [Izvestiya. Ferrous Metallurgy], 1986, no. 10, pp. 64-67. (In Russian)
12. Lukyanov S.I., Shvidchenko N.V., Pishnograev R.S. Run-out roller table drive control system on the hot strip mill. *Vestnik IGEU* [Vestnik IGEU], 2012, iss. 6, pp. 95-99. (In Russian)
13. Honda T., Nakagawa S., Tachibana H., Uematsu C., Buei Y., Sakagami K. Temperature measurement technology in water cooling process and high accuracy cooling control technology for high tensile hot rolled strip. *Nippon Steel & Sumitomo Metal Technical Report*. 2016. No. 111. Pp. 18-23.
14. Diez D.M., Barr C.D. Cetinkaya-Rundel M., Dorazio L. *Advanced High School Statistic*. OpenIntro Inc., First Edition, 2014. 402 p.

Оптимизация скоростного режима отводящего рольганга стана горячей прокатки / Н.В. Швидченко, С.И. Лукьянов, Р.С. Пишнограев, Д.В. Швидченко, С.С. Красильников // *Электротехнические системы и комплексы*. 2021. № 1(50). С. 42-49. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-1\(50\)-42-49](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-1(50)-42-49)

Shvidchenko N.V., Lukyanov S.I., Pishnograev R.S., Shvidchenko D.V., Krasilnikov S.S. Speed Rate Optimization of the Run-Out Table of a Hot Strip Mill. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2021, no. 1(50), pp. 42-49. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-1\(50\)-42-49](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-1(50)-42-49)

ИНФОРМАЦИОННОЕ, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 621.3.019.3

[https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-1\(50\)-50-57](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-1(50)-50-57)

Литвиненко Р.С., Аухадеев А.Э., Сафиуллин Б.И., Черепенькин И.В., Ферапонтова М.В.

Казанский государственный энергетический университет

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИНТЕГРАЛЬНОГО ПОКАЗАТЕЛЯ НАДЕЖНОСТИ РАЗРАБАТЫВАЕМОЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

На стадии разработки электротехнических систем, если они являются восстанавливаемыми и для них определены требования к долговечности и сохраняемости, общее количество задаваемых единичных и комплексных показателей надежности находится в пределах 5-7 единиц. Разрабатываемые схемно-конструктивные варианты этих систем имеют различные по величине количественные показатели надежности, не позволяющие четко дать предпочтение тому или иному техническому решению. Поэтому возникает объективная необходимость в формировании единого показателя, который характеризовал бы всю совокупность основных свойств надежности электротехнической системы при условии соответствия отдельных показателей требованиям, указанным в техническом задании. В статье предлагается подход к формированию интегральных показателей надежности альтернативных вариантов разрабатываемой электротехнической системы. Подход базируется на использовании метода анализа иерархий, разработанного Т. Саати. Применение этого метода позволяет выполнить глубокий анализ большого объема экспертной и статистической информации о надежности с учетом весовых характеристик анализируемых показателей. В качестве интегрального (комплексного) показателя надежности предлагается применить вычисленные значения глобальных (составных) приоритетов альтернативных вариантов разрабатываемой системы. Интегральный показатель надежности вариантов электротехнической системы представляет собой единый показатель, синтезирующий отдельные единичные и комплексные показатели надежности. Использование для определения уровня надежности интегрального показателя позволяет получить формализованный результат, выражаемый через соответствующее значение вектора глобальных приоритетов и дающий возможность количественной оценки превосходства в плане надежности одного альтернативного варианта электротехнической системы над другим. Проверка работоспособности и адекватности предложенного подхода проведена на примере определения интегральных показателей надежности вариантов центробежного сепаратора, применяемого в химической промышленности.

Ключевые слова: надежность, система, показатель, анализ, метод, иерархии, уровень, декомпозиция, этап.

ВВЕДЕНИЕ

При задании требований по надежности технического объекта на стадии формирования исходных технических требований и разработки технического задания определяют и согласовывают между заказчиком и разработчиком номенклатуру и значения показателей надежности (ПН). Состав задаваемых ПН выбирают из числа показателей, регламентированных ГОСТ 27.002-2015 [1] и в соответствии с положениями ГОСТ 27.003-2016 [2]. Количество задаваемых ПН должно быть минимальным в целях снижения затрат на проверку, подтверждение и оценку заданных ПН при изготовлении и в эксплуатации. В то же время эти показатели должны быть достаточными и в полной мере характеризовать надежность технического объекта на всех этапах жизненного цикла. Для электротехнических систем используются комплексные ПН или определенный набор единичных показателей безотказности и ремонтпригодности, а также их комбинации. Если технический объект в процессе эксплуатации может находиться на хранении или транспортироваться, то также необходимо задание показателей сохраняемости, а также задание показателей долговечности, если для технического объекта определены критерии достижения предельного состояния. Численные значения ПН устанавливают расчетными, экспериментальными или расчетно-

экспериментальными методами с использованием справочных статистических данных о надежности аналогов (прототипов) разрабатываемого технического объекта, а также данных эксплуатации и испытаний, полученных от поставщиков компонентов. Разрабатываемый технический объект соответствует требованиям по надежности при условии соответствия установленным требованиям всех ПН [3, 4].

На этапе разработки допускается: уточнение требований по надежности при соответствующем технико-экономическом обосновании в ходе рассмотрения возможных вариантов технического объекта и последующего расчета их надежности; выбор схемно-конструктивного варианта структуры, удовлетворяющей требованиям заказчика по совокупности ПН и затрат; уточнение значений ПН технического объекта и его элементов.

Анализ ГОСТ 27.003-2016 позволяет сделать вывод, что для сложных электротехнических систем, если они являются восстанавливаемыми и для них определены требования к долговечности и сохраняемости, общее количество задаваемых единичных и комплексных ПН находится в пределах 5-7 показателей. В ситуации, когда электротехническая система является уникальной, состоящей из перспективных, не имеющих аналогов элементов, достаточно того, чтобы все заданные ПН соответствовали установленным в техническом задании требованиям. Однако часто на практике в состав разрабатываемой или модернизируемой электротехнической

системы частично или полностью входят существующие элементы, для которых известны статистические данные о надежности. Поэтому на этапе разработки может быть несколько возможных схемно-конструктивных вариантов построения подобных систем, соответствующих заданным требованиям по надежности. Большое значение приобретает взвешенный подход к проблеме выбора того или иного проекта системы, представляющий собой решение многокритериальной задачи сравнительной оценки уровней надежности как одного из технических требований, предложенных к разработке вариантов. Также в соответствии с ГОСТ 15.016-2016 [5] аналогично требованиям по надежности в техническом задании указывают требования, характеристики, нормы, показатели и другие параметры, определяющие назначение, эксплуатационные характеристики разрабатываемых изделий. Поэтому перед разработчиком встает задача выбора такого варианта электротехнической системы, который бы удовлетворял всем техническим требованиям (требованиям к эксплуатации, стойкости, электромагнитной совместимости и т.д.), в том числе требованиям по надежности, указанным в задании. Различные схемно-конструктивные варианты электротехнической системы имеют разные по величине количественные ПН, не позволяющие однозначно отдать предпочтение тому или иному техническому решению. При этом разница между ПН может быть от незначительной до существенной, а превосходство одного варианта технического решения над другим возможно только в отдельных показателях из заданных в требованиях по надежности.

Таким образом, актуальность проведенного исследования обусловлена объективной необходимостью в формировании такого показателя надежности R , который характеризовал бы всю совокупность основных свойств надежности электротехнической системы, при условии соответствия требованиям по надежности всех заданных в техническом задании отдельных показателей [6]. В связи с тем, что в ГОСТ 27.002-2015 определения и перечень комплексных показателей строго регламентированы, предложено назвать этот показатель интегральным показателем надежности (ИПН).

Необходимо отметить, что авторы не ставят задачу разработки подхода к оценке ИПН электротехнической системы, цель предложенной методики – определение обобщенных показателей для нескольких схемно-конструктивных вариантов, синтезирующих отдельные ПН в единый. На следующем этапе оценки технического уровня альтернативных вариантов разрабатываемой системы уже с учетом всех требований, указанных в техническом задании, численное значение, характеризующее надежность, будет представлено одним единым показателем – ИПН, а не набором единичных и комплексных ПН.

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИПН НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА АНАЛИЗА ИЕРАРХИЙ

В общем случае метод аналитических иерархических процессов или метод анализа иерархий (МАИ) представляет собой математический аппарат системного

подхода к технологии принятия решений на основе расчетов и использования метода попарных сравнений, позволяющего найти такой вариант (альтернативу), который наилучшим образом соответствует сути поставленной проблемы и требованиям к ее решению. Метод был разработан американским ученым Томасом Саати в 1970 г. и активно используется при решении различных многокритериальных задач (анализ возможных вариантов развития событий, составления рейтинга, распределение ресурсов, управление рисками и др.). Также МАИ получил широкое распространение при практическом решении задач сравнительного анализа технического уровня альтернативных вариантов разрабатываемых технических объектов [7-9].

Подробное описание порядка решения многокритериальных задач с использованием МАИ широко представлено в различных источниках [9-12].

МАИ обладает следующими достоинствами:

- учитывает различные факторы и множественность целей;
- учитывает возможный эффект взаимодействия факторов;
- сравнительная простота математических вычислений;
- для попарных сравнений используется шкала относительной важности, упорядочивающая и упрощающая процедуру выставления экспертных оценок;
- обладает возможностью присвоения альтернативным вариантам рангов (цифровых показателей, отображающих значимость или важность объекта).

Последнее положение предлагается использовать для формирования количественного значения ИПН альтернативных вариантов электротехнической системы, где в качестве критериев будут выступать соответствующие им ПН [13]. В качестве ИПН предлагается применить вычисленные значения глобальных (составных) приоритетов. Обращаем внимание, что определение ИПН осуществляется для конкретных структурно-схематических вариантов построения разрабатываемой системы и соответствующих им количественных значений ПН. Изменение какого-либо из этих положений приведет к повторному определению ИПН.

В качестве недостатка МАИ можно отметить следующее:

- количество показателей не должно превышать 7 ± 2 , так как человеческое сознание не способно к одновременному восприятию и переработке более указанного числа блоков информации [14, 15];
- метод позволяет найти ранги выбранных альтернатив, но не имеет внутренних средств интерпретации этих рангов;
- несмотря на проверку согласованности суждений экспертов, экспертные оценки носят субъективный характер.

Проверку работоспособности и адекватности предложенного подхода к решению задачи определения ИПН методом анализа иерархий для последующей оценки технического уровня структурно-схематических вариантов разрабатываемой электротехнической системы проведем на конкретном примере.

АППРОБАЦИЯ ПРЕДЛОЖЕННОЙ МЕТОДИКИ
ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИПН

Проверку работоспособности предложенной методики проведем на основе номенклатуры ПН, аналогичной номенклатуре сепаратора СДС 531 К-01, представленной в методических указаниях [16]. В соответствии с предложенной номенклатурой для центробежного сепаратора СДС 531 К-01, применяемого для обработки неагрессивных тонкодисперсионных суспензий химической и других отраслей промышленности, задают следующие требования по надежности:

- средняя наработка на отказ T_0 – не менее 8000 ч;
- средний ресурс до капитального ремонта $T_{р.к.р}$ – не менее 20000 ч;
- назначенный (полный) ресурс ротора $T_{р.р}$ – не менее 40000 ч;
- назначенный (полный) срок службы $T_{сл.н}$ – не менее 5 лет;
- коэффициент технического использования $K_{т.и}$ – не менее 0,8.

Для того чтобы учесть требования к сохраняемости разрабатываемого сепаратора, введем еще один показатель – средний срок сохраняемости $T_{с.сп}$, и требования к нему – не менее 20 месяцев [17].

Допустим, что предложено три возможных варианта разрабатываемого центробежного сепаратора (ЦС) с предварительно рассчитанными значениями показателей, приведенными в **табл. 1**.

Используя МАИ, требуется рассчитать ИПН R_1 , R_2 и R_3 альтернативных вариантов ЦС, для последующего комплексного анализа соответствия всех технических требований к разрабатываемой системе.

Декомпозиция задачи в иерархию. Декомпозиция задачи вычисления ИПН представлена на **рис. 1**.

В наиболее элементарном виде иерархия состоит из вершины (условно здесь находится общая цель – формирование ИПН), от которой идут промежуточные уровни, состоящие из пяти критериев (показателей надежности), уточняющих цель, к нижнему уровню, состоящему из трех альтернативных вариантов ЦС. Такая иерархия называется доминантной.

Таблица 1
Показатели надежности вариантов ЦС

Вариант ЦС	Показатели надежности					
	T_0	$T_{р.к.р}$	$T_{р.р}$	$T_{сл.н}$	$K_{т.и}$	$T_{с.сп}$
A	8,5	23	43	7	0,9	24
B	11	20	43	6	0,87	24
C	9	21,5	41	5	0,89	36

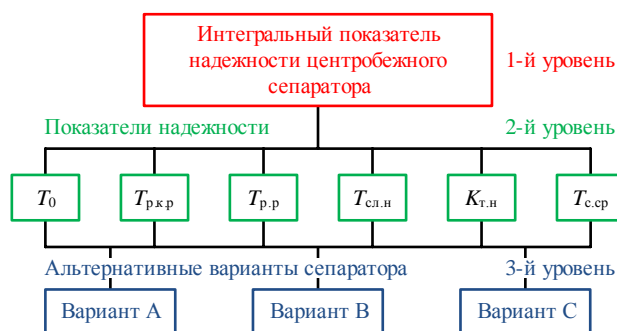


Рис. 1. Декомпозиция задачи вычисления ИПН ЦС

Построение матриц попарных суждений

При использовании МАИ решаемая задача была представлена иерархически, поэтому матрица сравнения важности ПН второго уровня составляется относительно общей цели (1-го уровня). Подобные матрицы также строятся для парных сравнений каждого альтернативного варианта ЦС по отношению к элементам 2-го уровня. Для проведения субъективных парных сравнений автором Т. Саати была разработана численная шкала относительной важности [11,15], в соответствии с которой экспертами определяется вес функций (показателей), характеризующих разрабатываемую электротехническую систему.

Для построения матрицы попарных суждений для 2-го уровня A_1 размерностью $k \times k$, где $k = 6$ – количество заданных ПН, составляется таблица в k строк и столбцов, в которой в заголовках граф и строк записываются применяемые при формировании ИПН и заданные в техническом задании показатели.

Действия начинают с показателя, расположенного в заголовке 1-й строки (средняя наработка на отказ T_0), при этом задаются вопросом, насколько этот показатель важнее показателей, указанных в заголовке графы, соответственно среднего ресурса до капитального ремонта $T_{р.к.р}$ и далее остальные показатели. При сравнении показателя с самим собой отношение равно единице. Если сравниваемый показатель важнее, чем ПН из заголовка графы, то используется целое число из шкалы относительной важности [18], в противном случае – обратная величина. Таким образом поочередно производится сравнение важности всех ПН между собой и определяются все элементы матрицы A_1 попарных сравнений для 2-го уровня (уровня ПН) (**табл. 2**).

Для составления матрицы попарных суждений для 2-го уровня A_1 привлекается группа экспертов, которая в ходе обсуждений и на основании консенсуса, устанавливает числовые значения для элементов матрицы, используя шкалу относительной важности.

Примечание: $j = \overline{1, k}$ – порядковый номер показателя надежности.

Составление матриц $A_2(j = \overline{1, k})$ для 3-го уровня (уровня альтернативных вариантов) существенно упрощается, так как значения ПН выражены количественно, а не качественно. Элементы матриц $A_2(j = \overline{1, k})$ формируются делением значений ПН соответствующих альтернативных вариантов ЦС применительно к каждому показателю j (матрицы A_{21}, \dots, A_{26}). Матрицы A_{2j} попарных сравнений для третьего уровня представлены в **табл. 3**. Таким образом, результатом действий на этом этапе является матрица попарных сравнений для уровня ПН и матрицы для уровня альтернативных вариантов ЦС.

Таблица 2
Матрица попарных сравнений для 2-го уровня

Показатели	T_0	$T_{р.к.р}$	$T_{р.р}$	$T_{сл.н}$	$K_{т.и}$	$T_{с.сп}$
T_0	1	3	2	1/4	1/5	2
$T_{р.к.р}$	1/3	1	1/3	1/2	1/4	2
$T_{р.р}$	1/2	3	1	1/2	1/2	3
$T_{сл.н}$	4	2	2	1	1/2	3
$K_{т.и}$	5	4	2	2	1	5
$T_{с.сп}$	1/2	1/2	1/3	1/3	1/5	1

Таблица 3
Матрицы попарных сравнений для уровня альтернативных вариантов ЦС

Матрица A_{21} попарных сравнений для показателя T_0			
Вариант	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>
<i>A</i>	1	11/8,5=1,294	9/8,5=1,059
<i>B</i>	8,5/11=0,773	1	9/11=0,818
<i>C</i>	8,5/9=0,944	11/9=1,222	1
Матрица A_{22} попарных сравнений для показателя $T_{p,k,p}$			
Вариант	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>
<i>A</i>	1	20/23=0,87	21,5/23=0,935
<i>B</i>	23/20=1,15	1	21,5/20=1,07
<i>C</i>	23/21,5=1,07	20/21,5=0,93	1
Матрица A_{23} попарных сравнений показателя $T_{p,p}$			
Вариант	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>
<i>A</i>	1	43/43=1	41/43=0,953
<i>B</i>	43/43=1	1	41/43=0,953
<i>C</i>	43/41=1,049	43/41=1,049	1
Матрица A_{24} попарных сравнений показателя $T_{cl,n}$			
Вариант	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>
<i>A</i>	1	6/7=0,867	5/7=0,714
<i>B</i>	7/6=1,167	1	5/6=0,833
<i>C</i>	7/5=1,4	6/5=1,2	1
Матрица A_{25} попарных сравнений показателя $K_{r,n}$			
Вариант	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>
<i>A</i>	1	0,87/0,9=0,967	0,89/0,9=0,989
<i>B</i>	0,9/0,87=1,035	1	0,89/0,87=1,023
<i>C</i>	0,9/0,89=1,011	0,87/0,89=0,978	1
Матрица A_{26} попарных сравнений показателя $T_{c,cp}$			
Вариант	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>
<i>A</i>	1	24/24=1	36/24=1,5
<i>B</i>	24/24=1	1	36/24=1,5
<i>C</i>	24/36=0,667	24/36=0,667	1

Определение локальных приоритетов и согласованности мнений экспертов для второго уровня

Для матрицы попарных сравнений уровня показателей определяется набор локальных приоритетов, которые выражают относительное влияние множества верхних элементов на нижний элемент иерархии. При этом устанавливается вес каждого отдельного компонента матрицы.

С этой целью необходимо вычислить собственный вектор $\bar{A}=[x_1 \dots x_k]^T$ матрицы A_1 , составляющими которого являются оценки вектора приоритетов по строкам матрицы x_i , определяемые по формуле

$$x_i = \frac{\bar{a}_i}{\sum_{i=1}^k \bar{a}_i},$$

где \bar{a}_i – среднее геометрическое элементов i -й строки матрицы A_1 , $i = \overline{1, k}$.

$$\bar{a}_i = \sqrt[k]{\prod_{i=1}^k a_i}.$$

В условиях решения нашей задачи собственный вектор \bar{A} матрицы A_1 получил следующие значения:

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,125 \\ 0,075 \\ 0,139 \\ 0,232 \\ 0,371 \\ 0,057 \end{bmatrix},$$

где x_1 – оценка приоритета показателя T_0 ; x_2 – оценка приоритета показателя $T_{p,k,p}$; x_3 – оценка приоритета показателя $T_{p,p}$; x_4 – оценка приоритета показателя $T_{cl,n}$; x_5 – оценка приоритета показателя $K_{r,n}$; x_6 – оценка приоритета показателя $T_{c,cp}$.

Вычисление вектора локальных приоритетов (собственных векторов матрицы A_1) $\lambda_{\max i} = [\lambda_{\max 1} \dots \lambda_{\max k}]$, производится путем приведения величины x_i к нормализованному виду по следующей формуле:

$$\lambda_{\max i} = x_i \cdot \sum_{j=1}^k a_{ij},$$

где $\lambda_{\max i}$ – собственные значения вектора Перрона [15]; a_{ij} – значение элемента матрицы A_1 в i -й строке j -м столбце, $j = \overline{1, k}$.

Используя описанную процедуру, определим локальные приоритеты $\lambda_{\max i}$ для 2-го уровня (уровня показателей). В условиях решения задачи формирования ИПН альтернативных вариантов ЦС вектор локальных приоритетов представлен следующими значениями:

$$\lambda_{\max} = \begin{bmatrix} 1,421 \\ 1,015 \\ 1,068 \\ 1,063 \\ 0,982 \\ 0,92 \end{bmatrix}.$$

Сумма всех элементов полученного вектора локальных приоритетов λ_{\max} равна 6,469. Обозначим ее буквой Λ [15]. При абсолютной согласованности матрицы соблюдается условие $\Lambda = k$.

После определения локальных приоритетов $\lambda_{\max i}$ и величины Λ следует процедура оценки согласованности мнений экспертов при формировании матрицы попарных сравнений A_1 для 2-го уровня, поскольку обобщенное мнение группы экспертов не лишено субъективности, так как использовалась качественная шкала оценок. Для этого МАИ предусматривает применение индекса согласованности μ , который дает информацию о степени нарушения численной и порядковой согласованности. Если согласованность существенно нарушена, то рекомендуется поиск дополнительной информации и пересмотр суждений экспертов на втором туре экспертизы.

Вычисляем индекс согласованности по формуле

$$\mu = \frac{\Lambda - k}{k - 1} = \frac{6,469 - 6}{5} = 0,094.$$

Сравним величину μ с величиной случайной согласованности μ_{rand} , которая получилась бы при случайном наборе количественных суждений из шкалы 1/9,

1/8, 1/7, ..., 1, 2, ..., 9, но при условии создания обратносимметричной матрицы. В источнике [9] приводится таблица, позволяющая определить среднюю согласованность μ_{rand} для случайных матриц различного порядка. В условиях решения нашей задачи для $k=6$ величина $\mu_{rand} = 1,24$. Для сравнения величин μ и μ_{rand} найдем отношение согласованности (англ. *consistency ratio* – CR) по формуле

$$CR = \frac{\mu}{\mu_{rand}} \cdot 100\% = 7,6\%.$$

Величина CR должна составить 10% или менее, чтобы быть приемлемой. В некоторых случаях можно допустить 20%, но не более. Если величина ОС превышает 20%, необходимо провести второй тур экспертизы и уточнить элементы матрицы попарных сравнений A_1 для 2-го уровня [15, 19]. Так как $CR = 7,6\%$, можно сделать вывод о хорошей согласованности матрицы попарных сравнений A_1 .

Определение локальных приоритетов для третьего уровня

Далее аналогичным образом определяются локальные приоритеты для 3-го уровня (уровня вариантов ЦС). Так как значения показателей надежности выражены в числах, то элементы матриц определяются делением значений показателей из табл. 1 соответствующих вариантов ЦС. Результаты вычислений представлены в табл. 4.

Таблица 4

Матрицы попарных сравнений для 3-го уровня вариантов ЦС

Вариант ЦС	A	B	C	Оценка вектора приоритетов x_i	Вектор приоритетов $\lambda_{\max i}$
Для средней наработки на отказ T_0					
A	1	1,294	1,059	0,368	1
B	0,773	1	0,818	0,284	1
C	0,944	1,222	1	0,347	1
Определение Λ_1					3
Для среднего ресурса до капитального ремонта $T_{p.k.p}$					
A	1	0,87	0,935	0,311	1
B	1,15	1	1,07	0,357	1
C	1,07	0,93	1	0,332	1
Определение Λ_2					3
Для назначенного (полного) ресурса ротора $T_{p.p}$					
A	1	1	0,953	0,328	1
B	1	1	0,953	0,328	1
C	1,049	1,049	1	0,344	1
Определение Λ_3					3
Для назначенного (полного) срока службы $T_{cл.н}$					
A	1	0,867	0,714	0,28	1
B	1,167	1	0,833	0,327	1
C	1,4	1,2	1	0,393	1
Определение Λ_4					3
Для коэффициента технического использования $K_{т.н}$					
A	1	0,967	0,989	0,328	1
B	1,035	1	1,023	0,34	1
C	1,011	0,978	1	0,332	1
Определение Λ_5					3
Для среднего срока сохраняемости $T_{c.ср}$					
A	1	1	1,5	0,375	1
B	1	1	1,5	0,375	1
C	0,667	0,667	1	0,25	1
Определение Λ_6					3

Определение глобальных приоритетов

Для формирования ИПН альтернатив приоритеты синтезируются, начиная с уровня показателей. Локальные приоритеты перемножаются на приоритет соответствующего ПН на вышестоящем уровне и суммируются по каждому элементу в соответствии с критерием, на который воздействует этот элемент (каждый элемент второго уровня умножается на единицу, то есть на вес единственной цели самого верхнего уровня). Это дает составной, или глобальный, приоритет того элемента, который затем используется как критерий для взвешивания локальных приоритетов элементов, расположенных уровнем ниже.

Полученные в табл. 4 результаты представим в виде матрицы A_3 размером 6×3 , где столбцы будут соответствовать оценкам вектора приоритетов ПН 2-го уровня, а строки – альтернативным вариантам ЦС. Таким образом, матрица A_3 приоритетов по каждому показателю примет следующий вид:

$$A_3 = \begin{bmatrix} x_1^{(T_0)} & x_1^{(T_{p.k.p})} & x_1^{(T_{p.p})} & x_1^{(T_{cл.н})} & x_1^{(K_{т.н})} & x_1^{(T_{c.ср})} \\ x_2^{(T_0)} & x_2^{(T_{p.k.p})} & x_2^{(T_{p.p})} & x_2^{(T_{cл.н})} & x_2^{(K_{т.н})} & x_2^{(T_{c.ср})} \\ x_3^{(T_0)} & x_3^{(T_{p.k.p})} & x_3^{(T_{p.p})} & x_3^{(T_{cл.н})} & x_3^{(K_{т.н})} & x_3^{(T_{c.ср})} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,368 & 0,311 & 0,328 & 0,28 & 0,328 & 0,375 \\ 0,284 & 0,357 & 0,328 & 0,327 & 0,34 & 0,375 \\ 0,347 & 0,332 & 0,344 & 0,393 & 0,332 & 0,25 \end{bmatrix}.$$

Для определения вектора глобальных приоритетов воспользуемся формулой

$$\bar{W} = A_3 \cdot \bar{A} = \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \\ W_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,323 \\ 0,331 \\ 0,345 \end{bmatrix},$$

где W_1, W_2, W_3 – глобальные приоритеты соответствующих альтернативных вариантов ЦС. Подставив полученные числовые значения, получим следующие оценки глобальных (собственных) приоритетов:

1. Сумма глобальных приоритетов должна быть равна 1.

2. Приравнявая вычисленные значения глобальных приоритетов W_1, W_2, W_3 показателям R_1, R_2 и R_3 , получим численные значения ИПН соответствующих вариантов ЦС, характеризующие набор единичных и комплексного ПН. В результате решения нашей задачи наибольший ИПН соответствует третьему варианту сепаратора, так как $R_3 = 0,345 > 0,331 > 0,323$. В дальнейшем эти показатели, представляющие собой обобщенный (единый) ПН, могут быть использованы наряду с другими технико-экономическими требованиями к ЦС для последующего выбора наиболее предпочтительного схемно-конструктивного варианта разрабатываемой электротехнической системы.

Анализ результатов проведенных расчетов показал адекватность и корректность предложенного подхода и его пригодность к использованию для дальнейшего анализа ИПН альтернативных вариантов разрабатываемых электротехнических систем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, подход к определению ИПН электротехнических систем на этапе разработки, синтезирующих до 5-7 отдельных показателей, характеризующих различные свойства надежности, позволяет дать комплексную оценку и на ее основе ранжировать варианты схемно-конструктивных решений. Предложенный механизм определения ИПН вариантов разрабатываемой электротехнической системы является удобным инструментом научных исследований на стадии формирования исходных технических требований и разработки технического задания. Применение в этих целях МАИ позволяет выполнить глубокий анализ большого объема экспертной и статистической информации о надежности с учетом весовых характеристик анализируемых показателей. Использование для определения уровня надежности интегрального показателя позволяет получить формализованный результат, выражаемый через соответствующее значение вектора глобальных приоритетов и дающий возможность количественной оценки превосходства одного альтернативного варианта над другим.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- ГОСТ 27.002–2015. Надежность в технике. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2016. 24 с.
- ГОСТ 27.003–2016. Надежность в технике. Состав и общие правила задания требований по надежности. М.: Стандартинформ, 2018. 19 с.
- Методика выбора рационального варианта многофункциональной авиационной системы / П.П. Павлов, Р.С. Литвиненко, М.Н. Мубаракшин, И.О. Юшин, В.М. Нигматуллин // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2008. №2. С. 62-66.
- Георгиевская Е.В. Методические принципы оценки надежности оборудования на ранних стадиях проектирования // Новое в Российской электроэнергетике. 2018. №11. С. 25-36.
- ГОСТ 15.016–2016. Система разработки и постановки продукции на производство. Техническое задание. Требования к содержанию и оформлению. М.: Стандартинформ, 2020. 28 с.
- Литвиненко Р.С., Аухадеев А.Э., Залялов Р.Р. Подход к исследованию надежности электротранспортной системы города как сложной технической системы // Мир транспорта и технологических машин. 2017. №3(58). С. 108-114.
- Оценка технического уровня сложных систем на этапе разработки / Р.С. Литвиненко, П.П. Павлов, В.М. Гуреев, Р.Ш. Мисбахов // Вестник машиностроения. 2015. №6. С. 35-39.
- Cultural ranking of countries using the analytic hierarchy process methodology / J. Li, Y. Yang, T.L. Saaty, H. Guo // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. Vol. 1074. Pp. 949-963. doi: 10.1007/978-3-030-32456-8_102.
- Saaty T.L. The analytic hierarchy and analytic network processes for the measurement of intangible criteria and for decision-making // International Series in Operations Research and Management Science. 2016. Vol. 233. Pp. 363-419. doi: 10.1007/0-387-23081-5_9.
- Saaty T.L. Relative measurement and its generalization in decision making: why pairwise comparisons are central in mathematics for the measurement of intangible factors - the analytic hierarchy // Review of the Royal Spanish Academy of Sciences, Series A, Mathematics (RACSAM). 2008. Vol. 102. No. 2. Pp. 251-318. doi: 10.1007/BF03191825.
- Быкова Т.В. Метод анализа иерархий как инструмент решения практических задач многокритериальной оптимизации // Математическое моделирование, компьютерный и натурный эксперимент в естественных науках. 2019. №1. С. 48-62.
- Выбор альтернативного варианта разрабатываемого транспортного средства с использованием метода анализа иерархий / Р.С. Литвиненко, П.П. Павлов, В.М. Гуреев, Р.Ш. Мисбахов // Транспорт: наука, техника, управление. 2015. Т.11. №4. С. 21-25.
- Воронков И.Е. Вектор глобальных приоритетов метода анализа иерархий как относительный показатель уровня надежности потенциальных участников инвестиционно-строительных проектов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2018. №11. С. 137-145. doi: 10.12737/article_5bf7e35fd74483.00537194.
- Saaty T.L. Seven is the magic number in nature // Proceedings of the American philosophical society. 2016. Vol. 160. No. 4. Pp. 335-360.
- Саати Т.Л. Об измерении неосязаемого. Подход к относительным измерениям на основе главного собственного вектора матрицы парных сравнений // Cloud of science. 2015. Т. 2. № 1. С. 5-39.
- РД 26.260.005–1991. Методические указания. Оборудование химическое. Номенклатура показателей и методы оценки надежности. М.: НИИХиммаш, 1992. 14 с.
- ГОСТ 24.885–1991. Сепараторы центробежные жидкостные. Общие технические условия. М.: Изд-во стандартов, 1992. 22 с.
- Славнов К.В. Особенности модификации метода анализа иерархий Т. Саати для оценки систем контроля конфиденциальной информации // Охрана, безопасность, связь. 2017. № 1-2. С. 119-125.
- Финогенко И.А., Дьякович М.П. Метод анализа иерархий и построение интегральных показателей сложных систем // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. 2017. Т. 22. № 6-1. С. 1335-1340. doi: 10.20310/1810-0198-2017-22-6-1335-1340.

Поступила в редакцию 25 декабря 2020 г.

INFORMATION IN ENGLISH

METHOD FOR DETERMINING THE INTEGRAL RELIABILITY INDEX OF THE DEVELOPED ELECTROTECHNICAL SYSTEM

Ruslan S. Litvinenko

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, the Department of Electrical complexes and systems, Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. E-mail: litrus277@yandex.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8017-5868>

Aver E. Auhadeev

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, the Department of Electrical complexes and systems, Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. E-mail: auhadeevkgma@rambler.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7191-4550>

Bulat I. Safiullin

Master's Degree student, Department of Electrical complexes and systems, Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. E-mail: gougole2010@yandex.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5447-0724>

Ivan V. Cherepenkin

Master's Degree student, Department of Electrical complexes and systems, Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. E-mail: iwan.tcherepenkin@yandex.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0781-9938>

Mariya V. Ferapontova

Master's Degree student, Department of Electrical complexes and systems, Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. E-mail: litrus@km.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7754-743X>

When setting reliability requirements at the stage of designing electrotechnical systems, if they are recoverable given that requirements for durability and preservation are defined for them, the total number of single and complex measures of reliability as defined in reference documents is within 5-7. The developed schematic and design versions of these systems have reliability that differs in quantitative figures, which make it impossible to give clear preference to a certain technical solution. Therefore, there is an objective need to have such a measure of reliability, which would completely describe basic properties of the reliability of a electrotechnical system, if individual measures meet the specification requirements. The paper proposes an approach for generating integrated reliability measures for alternatives of the electrotechnical system being designed. The approach is based on the use of the Analytic Hierarchy Process (AHP) developed by Thomas L. Saaty and widely used in addressing various multicriteria problems. Application of this method makes it possible to carry out the analysis of expert and statistical information on reliability, taking into account the weight characteristics of indicators. Calculated values of global (composite) priorities of alternative variants of the developed system, as an integral (complex) indicator of reliability is proposed to apply. The integrated reliability measure for options of the electrotechnical system is a consolidated characterization that synthesizes individual single and complex reliability measures defined in the specification. The use of the integrated measure to determine the level of reliability makes it possible to obtain a formalized result that is expressed through the corresponding value of the vector of global priorities and facilitates the quantification of the superiority in terms of reliability of one alternative of the electrotechnical system over another. The operability and adequacy of the approach taking as an example determining the integral indicators of the reliability of centrifugal separator options for the chemical industry was carried out

Keywords: dependability, system, measure, analysis, method, hierarchy, level, decomposition, stage.

REFERENCES

1. State Standard 27.002–2015. Dependability in technics. Terms and definitions. Moscow, Standartinform Publ., 2016. 24 p. (In Russian)
2. State Standard 27.003–2016. Industrial product dependability. Contents and general rules for specifying dependability requirements. Moscow, Standartinform Publ., 2018. 19 p. (In Russian)
3. Pavlov P.P., Litvinenko R.S., Mubarakshin M.N., Yushin I.O., Nigmatullin V.M. Selection procedure of an efficient variant of a multi-purpose aircraft system. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Aviacionnaya tekhnika* [Izv. VUZ. Aviatcionnaya Tekhnika], 2008, no.2. pp. 62-66. (In Russian)
4. Georgievskaya E.V. Valuation principle of equipment reliability at early stages of development. *Novoe v Rossiiskoi elektroenergetike*. [New developments in electrical engineering], 2018; no. 11: pp. 25-36. (In Russian)
5. State Standard 15.016–2016. System of products development and launching into manufacture. Technical assignment. Requirements to contents and form of presentation. Moscow, Standartinform Publ., 2020. 28 p. (In Russian)
6. Litvinenko R.S., Aukhadееv A.E., Zalyalov R.R. New approach to reliability study in city electric transport taken as a complex engineering system. *Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin* [Transport and Technological Cars], 2017, no. 3(58), pp. 108-114. (In Russian)
7. Litvinenko R.S., Pavlov P.P., Gureev V.M., Misbahov R.Sh. Assessment of technical level of complex systems at the stage of development. *Vestnik mashinostroeniya* [Russian Engineering Research], 2015, no.6, pp. 35-39. (In Russian)
8. Li J., Yang Y., Saaty T.L., Guo H. Cultural ranking of countries using the analytic hierarchy process methodology. *Advances in intelligent systems and computing*. 2020. Vol. 1074. Pp. 949-963.
9. Saaty T.L. The analytic hierarchy and analytic network processes for the measurement of intangible criteria and for decision-making. *International series in operations research and management science*. 2016. Vol.233. Pp. 363-419.
10. Saaty T.L. Relative Measurement and its Generalization in Decision Making: Why Pairwise Comparisons are Central in Mathematics for the Measurement of Intangible Factors - The Analytic Hierarchy. *RACSAM (Review of the Royal Spanish Academy of Sciences, Series A, Mathematics)*. 2008. Vol. 102. No. 2. Pp. 251-318.
11. Bykova T.V. Method of hierarchy analysis as a tool for solution of practical tasks of multicriteria optimization. *Matematicheskoe modelirovanie, kompyuternyi i naturnyi eksperiment v estestvennykh naukakh* [Mathematical modeling, computer and full-scale experiment in natural sciences], 2019, no.1, pp. 48-62. (In Russian)
12. Litvinenko R.S., Pavlov P.P., Gureev V.M., Misbahov R.Sh. Selection of an alternative variant of the vehicle under development using hierarchy analysis method. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie*, [Transport: science, equipment, management], 2015, no. 11(4), pp.21-25. (In Russian)
13. Voronkov I.E. Vector of global priorities of hierarchy analysis method as a relative index of reliability level of potential participants of investment and construction projects. *Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova* [Bulletin of Belgorod State Technological University named after V.G.Shoukhov], 2018, no. 11, pp. 137-145. (In Russian)
14. Saaty T.L. Seven is the magic number in nature. *Proceedings of the American philosophical society*. 2016. Vol. 160. No. 4. Pp. 335-360.
15. Saati T.L. Measuring of unperceivable. An approach to relative measurements based on the main eigenvector of matrix of pairwise comparison. *Cloud of science*, 2015, vol. 2, no. 1, pp. 5-39. (In Russian)
16. Guidelines 26.260.005–1991. Guidelines. Chemical processing equipment. List of parameters and methods of reliability assessment. Moscow, NIIhimmash Publ., 1992. 14 p. (In Russian)

17. State Standard 24.885–1991. Centrifugal separators for liquids. General specifications. Moscow, Standartinform Publ., 1992. 22 p. (In Russian)
 18. Slavnov K.V. Characteristics of the variant of T. Saati hierarchy analysis method for proprietary information control systems. *Okhrana, bezopasnost, svyaz* [Protection, safety, communication], 2017, no. 1-2, pp. 119-125. (In Russian)
 19. Finogenko I.A., Dyakovich M.P. Method of hierarchy analysis and development of integral indicators complex systems. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya: estestvennye i tekhnicheskie nauki* [Bulletin of Tambov university. Series: natural and technical sciences], 2017, vol. 22, no. 6-1, pp. 1335-1340. (In Russian)
-

Методика определения интегрального показателя надежности разрабатываемой электротехнической системы / Р.С. Литвиненко, А.Э. Аухадеев, Б.И. Сафиуллин, И.В. Черепенькин, М.В. Ферапонтова // *Электротехнические системы и комплексы*. 2021. № 1(50). С. 50-57. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-1\(50\)-50-57](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-1(50)-50-57)

Litvinenko R.S., Auhadeev A.E., Safiullin B.I., Cherepenkin I.V., Ferapontova M.V. Method for Determining the Integral Reliability Index of the Developed Electrotechnical System. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2021, no. 1(50), pp. 50-57. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-1\(50\)-50-57](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-1(50)-50-57)

Дьяконов Н.А.^{1,2}, Логунова О.С.²¹ ИТЦ «Аусферр», г. Магнитогорск² Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ НА ОСНОВЕ ПРЕДИКТИВНОЙ АНАЛИТИКИ: ПРОЕКТИРОВАНИЕ

Целью исследования является повышение качества управления технологическими процессами и производствами в металлургической промышленности за счет синтеза модулей предиктивной аналитики для систем управления технологическими процессами с использованием консолидированных данных по технологическим цепочкам. В ходе исследования выполнен анализ теоретических и практических разработок в области проектирования, которые показали необходимость в проектировании и разработке модулей предиктивной аналитики в системах управления технологическими процессами для промышленных предприятий, включая металлургическое производство, а также приведены результаты синтеза проектных решений по структуре интеграции модулей предиктивной аналитики в действующие подсистемы АСУ ТП и АСУ П на примере ПАО «ММК». В ходе проектирования построена схема функциональной структуры системы, описаны ее подсистемы и блоки, их назначение, а также выполнено описание управляющих взаимосвязей между объектами системы. Реализация функционала позволяет повысить качество готовой продукции, уменьшив временные и трудовые затраты, а также снижение доли продукции пониженного качества и брака по описанным технологическим маршрутам.

Ключевые слова: автоматизация, технологический процесс, интеллектуальная система, система управления, предиктивная аналитика, система управления технологическим процессом.

ВВЕДЕНИЕ

Стремительное развитие промышленных предприятий в информационной среде определяет вызов к проектированию и разработке методов эффективной организации информационного, математического и программного обеспечения системы автоматизированного управления технологическими процессами и производствами [1-3].

В настоящее время система управления технологическим процессом (АСУ ТП) – это комплекс технических и программных средств, предназначенных для автоматизации управления технологическим оборудованием на предприятиях. Целостное решение АСУ ТП обеспечивает автоматизацию основных операций технологического процесса на производстве для выпуска продукции [4-7]. Современные промышленные технологии позволяют управлять технологическими процессами на производстве, но, как правило, не включают функции прогнозирования качества готовой продукции и возможность вносить коррекцию для параметров, которые влияют на формирование качества. Для эффективного управления технологическими процессами в настоящее время разработаны и успешно функционируют подсистемы для сбора и консолидации массивов технологических данных по маршрутам, предоставляющие инструменты для последующего анализа собранных данных и передачи результатов в АСУ ТП и АСУ П в целях повышения качества готовой продукции [8-10].

Результаты анализа теоретических и практических разработок в области проектирования показал, что:

1) построенные системы АСУ ТП, как правило, носят локальный характер и охватывают отдельные подсистемы промышленных агрегатов [10-19];

2) большое количество исследований направлено

на проектирование интеллектуальных систем во многих сферах, но малая часть посвящена интеграции интеллектуальных систем с системами управления технологическим процессом [20-24];

3) отсутствие систем управления технологическими процессами на основе предиктивной аналитики [25-28].

Анализ результатов разработок показал необходимость в проектировании и разработке модулей предиктивной аналитики в системах управления технологическими процессами для промышленных предприятий, включая металлургическое производство.

Цель исследования – повышение качества управления технологическими процессами и производствами в металлургической промышленности за счет синтеза модулей предиктивной аналитики для систем управления технологическими процессами с использованием консолидированных данных по технологическим цепочкам.

Система управления технологическим процессом на основе предиктивной аналитики предназначена для сбора и консолидации массива технологических данных по технологическим маршрутам, предоставления инструментов для последующей предиктивной аналитики собранных данных в целях повышения качества готовой продукции.

Задачи, решаемые для достижения цели:

1) теоретико-информационный анализ систем управления технологическими процессами с возможностями интеллектуальной поддержки принятия решений и предиктивной аналитикой;

2) синтез критериев эффективности функционирования систем управления технологическими процессами при наличии модулей предиктивной аналитики;

3) построение специального математического обеспечения для модулей предиктивной аналитики в системе управления технологическими процессами;

4) синтез проектных решений для программного обеспечения для модулей предиктивной аналитики в системе управления технологическими процессами;

5) анализ результатов опытной эксплуатации системы для системы управления технологическими процессами на основе предиктивной аналитики.

Объектом исследования являются системы управления технологическими процессами на технологическом маршруте производства металлургической продукции. В качестве предмета исследования выбраны: информационное, математическое и программное обеспечение для сопровождения технологических процессов по технологическим маршрутам ККЦ-ЛПЦ-9 (стан 5000) и ККЦ-ЛПЦ-10-ЛПЦ-11 ПАО «ММК», где ККЦ – кислородно-конвертерный цех; ЛПЦ – листопрокатный цех. Основная доля доводки металла в условиях кислородно-конвертерного цеха производится именно на агрегатах внепечной обработки стали: АДС – агрегат доводки стали; УПК – установка пещковш; УУПС – установка усреднительной подготовки стали; УВС – установка вакуумирования стали.

Разливка стали в ККЦ происходит на машине непрерывного литья заготовок (МНЛЗ), в результате ко-

торой получают слябы. Далее слябы переходят либо в ЛПЦ-9, в котором происходит прокатка сляба и резка толстых листов с возможной термообработкой, либо в ЛПЦ-10 на стан горячей прокатки, после которого продукцию отгружают в ЛПЦ-11 на стан холодной прокатки и на конечные агрегаты: АНГЦ (агрегат непрерывного горячего цинкования) или АНО-ГЦ (агрегат непрерывного отжига/горячего цинкования).

В рамках проведенного исследования приведены результаты синтеза проектных решений по структуре интеграции модулей предиктивной аналитики в действующие подсистемы АСУ ТП и АСУ П на примере ПАО «ММК».

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В составе технологических маршрутов при производстве толстого листа, отожженных и оцинкованных рулонов в условиях ПАО «ММК» функционируют цепочки агрегатов, структура которых отображена на рис. 1 и 2.

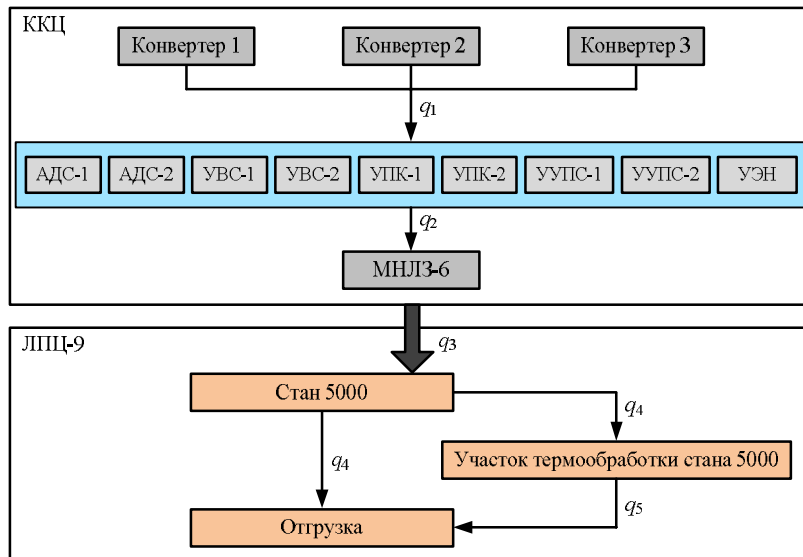


Рис. 1. Структура технологического маршрута ККЦ-ЛПЦ-9 (стан 5000) для производства толстого листа

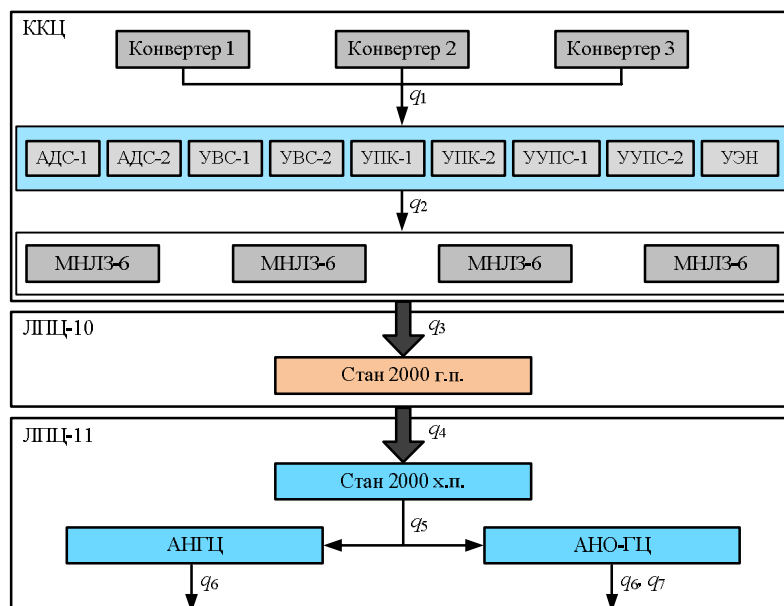


Рис. 2. Технологический маршрут ККЦ-ЛПЦ-10-ЛПЦ-11 для производства отожженного/оцинкованного рулонов

Маршрут ККЦ-ЛПЦ-9 (стан 5000) содержит материальные потоки: q_1 – жидкая сталь; q_2 – жидкая сталь после дополнительной обработки; q_3 – межцеховая отгрузка сляба на стан горячей прокатки; q_4 – толстый лист; q_5 – толстый лист после термообработки.

Маршрут ККЦ-ЛПЦ-10-ЛПЦ-11 содержит материальные потоки: q_1 – жидкая сталь; q_2 – жидкая сталь, после дополнительной обработки; q_3 – межцеховая отгрузка сляба на стан горячей прокатки; q_4 – межцеховая отгрузка горячекатаного рулона; q_5 – холоднокатаный рулон; q_6 – оцинкованный рулон; q_7 – отожжённый рулон.

РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

В соответствии с целями и требованиями создания система функционирует как платформа для:

- 1) сбора и консолидации имеющихся данных с учетом генеалогии продукции, связей с параметрами заказов (требованиями), режимами работы оборудования, наработки сменного инструмента на всем протяжении технологических маршрутов;
- 2) применения универсальных настраиваемых инструментов, позволяющих осуществлять обработку и адаптацию разрозненных массивов данных, просмотр и анализ полученных результатов;
- 3) формирования (в рамках выбранных пилотных маршрутов) моделей для прогнозирования искомых характеристик;
- 4) контроля версий рабочих моделей;
- 5) просмотра и анализа результатов прогнозирования, а также использования результатов прогнозирования в смежных информационных системах.

Построение системы основано на создании единого информационно-технологического и управляющего пространства, предоставляющего субъектам управления эффективное информационное окружение для принятия своевременных и качественных решений по сбору данных, их обработке, просмотру и анализу данных, визуализации и анализу результатов программирования.

В рамках проекта разрабатываются интеграционные решения для извлечения данных из смежных систем автоматизации. При этом поддерживается наследование информации с учетом трансформации единиц продукции при ее движении по технологической цепочке (укрупнение, разукрупнение, разделение единиц учета), связь с параметрами производственных и коммерческих заказов, партионный или поштучный характер отдельных стадий контроля и другие особенности наследования данных.

Источник данных, изображенный на рис. 3, включает действующие производственные исполнительные системы, все данные из которых собираются в хранилище технологических данных [29].

Из хранилища выбираются данные с описанных ранее технологических маршрутов. Спроектирована схема функциональной структуры системы, показанная на рис. 4.

Система предиктивной аналитики содержит следующие подсистемы:

1. Подсистема консолидации данных в рамках объединенного корпоративного хранилища: обеспечение полной, актуальной, достаточной информацией о параметрах, характеристиках и событиях, сопровождающих процесс производства металлопродукции в технологических потоках, и свойствах производимой металлопродукции.
2. Подсистема обработки и извлечения необходимых массивов данных: обработка разнородной информации, извлеченной подсистемой консолидации данных, а также для настройки и оценки влияния собранных данных на конечный результат анализа.
3. Подсистема формирования и настройки прогнозных моделей (рис. 5): оптимизация процессов разработки технологии за счет моделирования, анализа технологических параметров и построения моделей прогнозирования; формирование и настройка моделей для прогнозирования на этапах ее жизненного цикла; многофакторный анализ данных (без создания моделей) статистическими методами: корреляционный анализ, анализ нелинейных взаимосвязей.

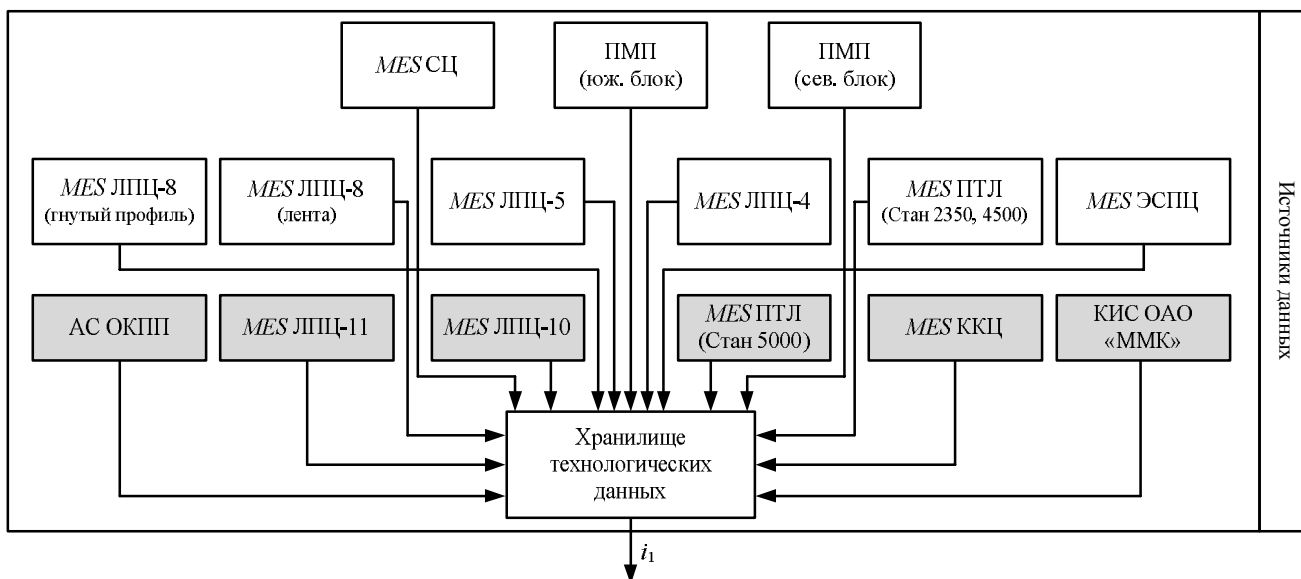


Рис. 3. Источник данных

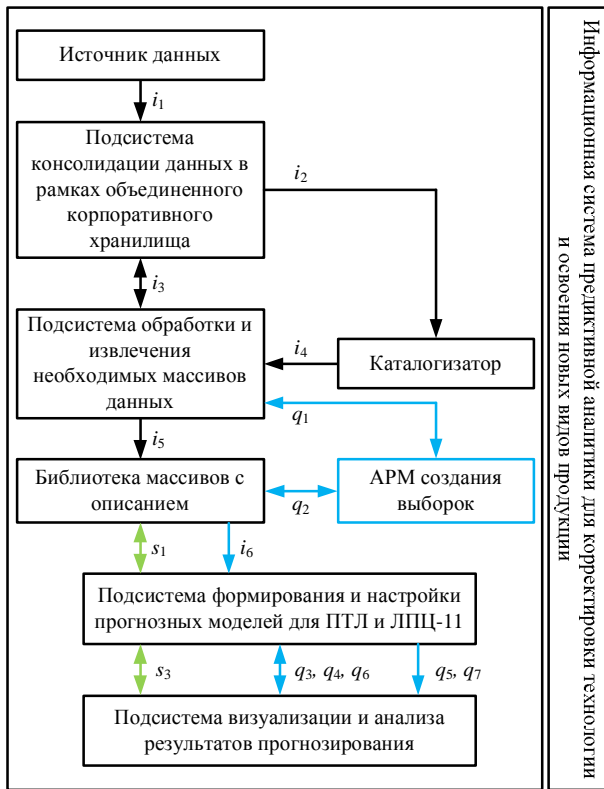


Рис. 4. Схема функциональной структуры системы

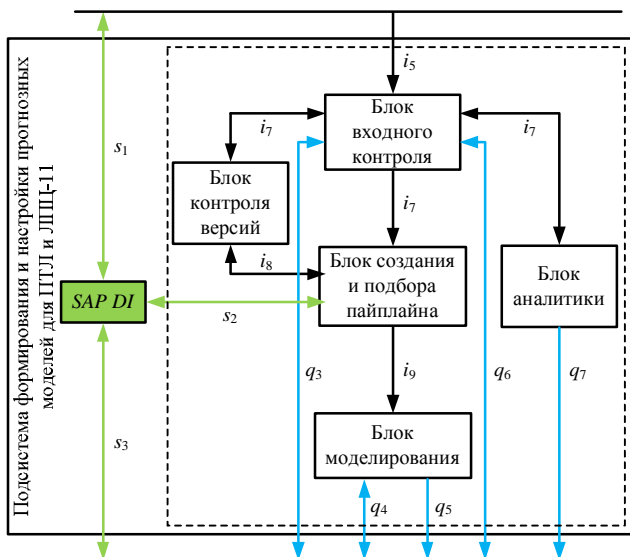


Рис. 5. Подсистема формирования и настройки прогнозных моделей для ПТЛ и ЛПЦ-11

3.1. Блок входного контроля данных: входная проверка и мониторинг данных, а также задание дальнейшего сценария работы подсистемы.

3.2. Блок аналитики: выполнение расчетов по поиску устойчивых тенденций и статистическому анализу без использования процесса обучения с учителем.

3.3. Блок создания и подбора пайплайна (цепочка процессов преобразования сценария): обеспечивает управление и поддержку работоспособности моделей машинного обучения.

3.4. Блок моделирования: применение пайплайнов к данным для расчета заданных сценарием показателей.

3.5. Блок контроля версий: учет изменений, производимых в подсистеме.

4. Подсистема визуализации и анализа результатов

прогнозирования (рис. 6): обеспечивает работу графического пользовательского интерфейса (ГПИ), направленного на взаимодействие между конечным пользователем и подсистемой формирования и настройки прогнозных моделей.

5. SAP Data Intelligence – платформа для работы с данными, которая предоставляет инструменты для создания и работы с моделями данных, их наполнения, обучения, переобучения, прогнозирования и дальнейшей промышленной эксплуатации. Решение может интегрироваться с SAP-системами и с любым другим ПО предприятия.

Система состоит из потоков (таблица), в которых:

- пользователь принимает непосредственное участие (q_1 - q_9);
- проходящие без участия пользователя потоков (i_1 - i_9);
- потоки SAP DI управления данными и моделями (s_1 - s_3).

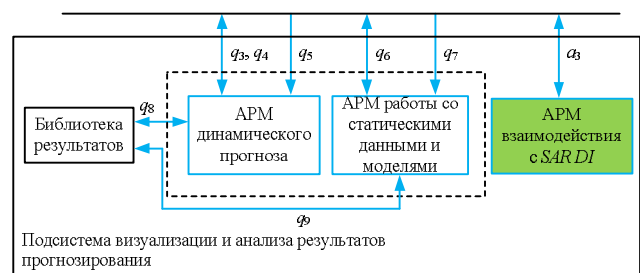


Рис. 6. Подсистема формирования и настройки прогнозных моделей для ПТЛ и ЛПЦ-11

Описание управляющих взаимосвязей между объектами системы

Обозначение	Описание
q_1	Запрос и получение данных из библиотеки массивов
q_2	Запрос и получение данных из подсистемы обработки и извлечения необходимых массивов данных
q_3	Управление блоком входного контроля для получения результатов с помощью машинного обучения
q_4	Управление блоком моделирования
q_5	Прогнозные и статистические данные
q_6	Управление блоком входного контроля для получения данных статистическими методами
q_7	Статистические данные
q_8	Сохранение или запрос статистических данных
q_9	Сохранение или запрос прогнозных и статистических данных
i_1	Технологические данные из хранилища
i_2	Объединенные данные
i_3	Взаимодействие подсистемы обработки и извлечения необходимых массивов данных и консолидации данных
i_4	Данные из каталога
i_5	Обработанные данные
i_6	Массив данных из библиотеки
i_7	Обработанные и проверенные данные
i_8	Получение или сохранение пайплайна
i_9	Подобранный сценарий работы
s_1	Управление входными данными
s_2	Управление моделями обучения
s_3	Взаимодействие с SAP DI

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате работы:

1. Определена цель исследования и решаемые задачи, технологические маршруты, материальные потоки для выходной продукции после агрегата или цепочки агрегатов, по которым функционирует модуль предикативной аналитики.

2. Определены источники данных, дающие представление об источниках поступления технологических данных в хранилище и их консолидацию.

3. В ходе проектирования построена схема функциональной структуры системы, описаны ее подсистемы и блоки, их назначение, а также выполнено описание управляющих взаимосвязей между объектами системы.

4. Реализация функционала позволяет повысить качество готовой продукции, уменьшив временные и трудовые затраты, а также снижение доли продукции пониженного качества и брака по описанным технологическим маршрутам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соловьев В.А., Черный С.П. Искусственный интеллект в задачах управления. Интеллектуальные системы управления технологическими процессами: учеб. пособие. Комсомольск-на-Амуре: КНАГТУ, 2006. 74 с.
2. Янусов А.С., Курганов В.В. Применение WEB-технологий в сфере автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП) // Молодежь и современные информационные технологии: сб. тр. XVI междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных. Томск: ТПУ, 2019. С. 325-326.
3. Логунова О.С., Мацко И.И., Посохов И.А. Система интеллектуальной поддержки процессов управления производством непрерывнолитой заготовки. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2013. 175 с.
4. Кузнецов Л.А., Ведищев В.В. Математическое моделирование сложных технологических процессов (на примере системы управления качеством проката) // Датчики и системы. 2001. №9. С. 10-13.
5. Пулин И.С. Применение автоматизированных систем управления в производстве: возможности для роста производительности труда // Управление производительностью: опыт и проблемы нижегородских предприятий: сб. науч. тр. Нижний Новгород: Нижегородский гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева, 2020. С. 207-212.
6. Качала Н.М., Прохоренков А.М. Обеспечение заданных характеристик систем управления технологическими процессами с использованием методов прогнозирования // Наука – производству: материалы Междунар. науч.-практ. конф. Мурманск: Мурманский гос. техн. ун-т, 2016. С. 68-73.
7. Дементьев А.В. Анализ существующих автоматизированных систем управления технологическим процессом // Студенческий. 2020. №21-1(107). С. 30-60.
8. Бабешко В.Н. Информационные системы управления технологическими процессами // Новая наука: теоретический и практический взгляд. 2016. №2-2(63). С. 123-125.
9. Антипин А.Ф. К вопросу о разработке систем управления технологическими процессами // Качество в производственных и социально-экономических системах: сб. науч. тр. 4-й Междунар. науч.-техн. конф. Курск: ЗАО «Университетская книга», 2016. С. 31-34.
10. Парсункин Б.Н., Бондарева А.Р., Полухина Е.И. Система визуализации при создании адаптивного комплекса локального уровня управления в АСУ ТП промышленного производства // Электротехнические системы и комплексы. 2015. № 2(27). С. 44-47.
11. Андреев С.М. Парсункин Б.Н., Логунова О.С. Практика применения нейросетевых алгоритмов регулирования в локальных контурах управления технологическими параметрами // Фундаментальные и прикладные исследования, разработка и применение высоких технологий в промышленности и экономике: сб. ст. 30-й Междунар. науч.-практ. конф. СПб.: Санкт-Петербургский политех. ун-т Петра Великого, 2012. С. 263-265.
12. Парсункин Б.Н., Артамонов Ю.С., Андреев С.М. Оптимизация параметров настройки локальных контуров управления астатическими объектами по методу симметричного оптимума. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-т им. Г.И. Носова, 2005. 99 с.
13. Парсункин Б.Н., Андреев С.М., Логунова О.С. Локальные стабилизирующие контуры автоматического управления в АСУ ТП. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-т им. Г.И. Носова, 2012. 406 с.
14. Димов Ю.В., Подашев Д.Б. Система управления качеством кромки при финишной обработке эластичными полимерно-абразивными инструментами и ее анализ. Часть 1 // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2020. Т. 24. №5(154). С. 977-992. doi: 10.21285/1814-3520-2020-5-977-992.
15. Marsuverskiy B.A. The Comprehensive Computer-Aided Control System for the Blast Furnace Process. // Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information. 2017. №7. С. 41-46.
16. Денисов М.С. Автоматизированная система программного управления процессом наложения давления на жидкий и кристаллизующийся металл // Автоматизация. Современные технологии. 2020. Т.74. №5. С. 234-240.
17. Силаева Е.Ю., Чебинёв А.В. Разработка автоматизированной системы управления технологическим процессом термообработки труб в роликовой печи // Наукосфера. 2020. №5. С. 108-113.
18. Свеженцев М.Ю. Разработка автоматизированной системы управления технологическим процессом подогрева и выравнивания температуры труб в печи с шагающими балками // Дневник науки. 2020. №5(41). С. 33.
19. Самохвал Ф.Н. Автоматизация в системах управления технологическими процессами в производстве титана губчатого // Молодежная наука в развитии регионов. 2019. Т.1. С. 154-156.
20. Akhavei F., Bleicher F. Predictive modeling to increase the reliability of production planning in single-item production // Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science. 2016. Vol. 2. Pp. 806-811.
21. Machine learning algorithms for the prediction of the strength of steel rods: an example of data-driven manufacturing in steelmaking / E. Ruiz, D. Ferreño, M. Cuartas, A. Lopez, V. Arroyo, F. Gutiérrez-Solana // International Journal of Computer Integrated Manufacturing. 2020. Vol. 33(9). Pp. 1-12. doi: 10.1080/0951192X.2020.1803505.
22. Шилкина С.В., Гусарова А.А. Интеллектуальные информационные технологии в автоматизированных системах управления технологическими процессами // Современная наука и инновации. 2018. №1(21). С. 34-39.
23. Горбач К.В. «Умный» цветной металл // Control Engineering Россия. 2019. №3(81). С. 70-73.
24. Разработка и моделирование системы управления на основе предикативной математической модели для промышленного процесса изомеризации пентан-гексановой фракции / Ю.В. Шариков, Н.В. Снегирев, И.В. Ткачев, П.А. Петров // Cloud of science. 2020. Т.7. №2. С. 273-284.
25. Shmueli G., Koppius O.R. Predictive analytics in information systems research // MIS Quarterly: Management Information Systems. 2011. Vol. 35(3), Pp. 553-572. doi: 10.2307/23042796.
26. Integrated Predictive Diagnostics: An Expanded View /

- R.J. Hansen, D.L. Hall, G.W. Nickerson, S. Phoba // Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air. 1996. 10 p. doi: 10.1115/96-GT-034.
27. Сидоренко Н.С., Мяловский В.А. Совершенствование управления металлургическим производством на основе полного весового контроля материальных потоков // Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах. 2019. Т.7. №2. С. 35-37. doi: 10.18503/2306-2053-2019-7-2-35-37.
28. Сидоренко Н.С., Логунова О.С. Предпосылки модернизации корпоративной системы управления технологией и качеством на металлургическом предприятии // Компьютерная интеграция производства и ИПИИ-технологии: материалы VIII Всерос. науч.-практ. конф. 2017. С. 661-664.
29. Информационные хранилища предприятий металлургической промышленности: трансформация структуры / Н.С. Сидоренко, О.С. Логунова, Л.Ю. Тяжелникова, Н.В. Аркулис // Электротехнические системы и комплексы. 2019. №4 (45). С. 52-57. doi: 10.18503/2311-8318-2019-4(45)-52-57.

Поступила в редакцию 11 января 2021 г.

INFORMATION IN ENGLISH

PROCESS CONTROL SYSTEMS BASED ON PREDICTIVE ANALYTICS: DESIGN

Nikita A. Dyakonov

Postgraduate Student, the Department of Computer Engineering and Software Engineering, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University; Software Engineer, Department of Technical Support and Development of MES-system, RTC Ausferr, Magnitogorsk, Russia. E-mail: diedrakon@yandex.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0667-3789>

Oksana S. Logunova

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

The aim of the study is to improve the quality of control of technological processes and production in the metallurgical industry through the synthesis of predictive analytics modules for control systems of technological processes using consolidated data on technological chains. In the course of the research, the analysis of theoretical and practical developments in the field of design was carried out, which showed the need for the design and development of predictive analytics modules in process control systems for industrial enterprises, including metallurgical production, and also the results of the synthesis of design solutions on the structure of integration of predictive analytics modules into operating subsystems of process control system and automatic control system on the example of the PJSC "MMK". During the design, a diagram of the functional structure of the system was built, its subsystems and blocks, their purposes were described, and the description of the control relationships between the objects of the system was made. The implementation of the functionality allows you to improve the quality of finished products, reducing time and labor costs, as well as reducing the share of products of low quality and scrap along the described technological routes.

Keywords: automation, technological process, intelligent system, control system, predictive analytics, process control system.

REFERENCES

- Solov'ev V.A., Chernyy S.P. *Iskustvennyi intellekt v zadachakh upravleniya. Intellektualnye sistemy upravleniya tekhnologicheskimi protsessami: ucheb.posobie* [Artificial intelligence in control problems. Intellectual systems of control of technological processes]. Komsomolsk-on-Amur, KnASTU Publ., 2006, 74 p. (In Russian)
- Yanusov A.S., Kurganov V.V. Application of web technologies in the field of automated control systems for technological processes (APCS). *Sbornik trudov XVI mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh "Molodezh' i sovremennye informatsionnye tekhnologii"* [Proceedings of the XVI International Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists "Youth and Modern Information Technologies"]. Tomsk, TPU Publ., 2019, pp. 325-326. (In Russian)
- Logunova O.S., Matsko I.I., Posokhov I.A. *Sistema intellektualnoy podderzhki protsessov upravleniya proizvodstvom nepreryvnolitoi zagotovki* [System of intellectual support of processes of production management of continuous cast billets]. Magnitogorsk, NMSTU Publ., 2013, 175 p. (In Russian)
- Kuznetsov L.A., Vedishchev V.V. Mathematical modeling of complex technological processes (on the example of a quality management system for rolled products). *Datchiki i sistemy* [Sensors & Systems], 2001, no. 9, pp. 10-13. (In Russian)
- Pulin I.S. Application of automated control systems in production: opportunities for labor productivity growth. *Sbornik nauchnykh trudov "Upravlenie proizvoditel'nost'yu: opyt i problemy nizhegorodskikh predpriyatiy"* [Collection of scientific papers "Productivity Management: Experience and Problems of Nizhny Novgorod Enterprises"]. Nizhny Novgorod, NNSTU Publ., 2020, pp. 207-212. (In Russian)
- Kachala N.M., Prokhorenkov A.M. Ensuring the specified characteristics of technological process control systems using forecasting methods. *Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Nauka – proizvodstvu"* [Materials of the International Scientific and Practical Conference "Science for Production"]. Murmansk, MSTU Publ., 2016, pp. 68-73. (In Russian)
- Dementiev A.V. Analysis of existing automated process control systems. *Studencheskiy* [Student], 2020, no. 21-1(107), pp. 30-60. (In Russian)
- Babeshko V.N. Information systems for managing technological processes. *Novaya nauka: teoreticheskiy i prakticheskiy vzglyad*. [Modern science: theoretical and practical approaches], 2016, no. 2-2(63), pp. 123-125. (In Russian)
- Antipin A.F. On the issue of developing control systems for technological processes. *Sbornik nauchnykh trudov 4-y Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Kachestvo v proizvodstvennykh i sotsial'no-ekonomicheskikh sistemakh"* [Collection of scientific papers of the 4th International Scientific and Technical Conference "Quality in production and socio-economic systems"]. Kursk, CJSC «University book» Publ., 2016, pp. 31-34. (In Russian)
- Parsunkin B.N., Bondareva A.R., Polukhina E.I. Visualization system for the creation of an adaptive complex of local

- level control in the automated process control system of industrial production. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical systems and complexes], 2015, no. 2(27), pp. 44-47. (In Russian)
11. Andreev S.M., Barankin B.N., Logunova O.S. Application of neural network control algorithms in local control loops of process parameters. *Sbornik statey 30-y Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Fundamental'nye i prikladnye issledovaniya, razrabotka i primeneniye vysokikh tekhnologiy v promyshlennosti i ekonomike"* [Collection of articles of the 30th International Scientific and Practical Conference "Fundamental and Applied Research, Development and Application of High Technologies in Industry and Economics"]. St. Petersburg, SPbPU Publ., 2012, pp. 263-265. (In Russian)
 12. Parsunkin B.N., Artamonov Yu.S., Andreev S.M. *Optimizatsiya parametrov nastroyki lokalnykh konturov upravleniya astaticheskimi obyektami po metodu simmetrichnogo optimuma* [Optimization of settings for local control circuits of astatic objects by the method of symmetric optimum]. Magnitogorsk, NMSTU Publ., 2005, 99 p. (In Russian)
 13. Parsunkin B.N., Andreev S.M., Logunova O.S. *Lokalnye stabiliziruyushchie kontura avtomaticheskogo upravleniya v ASU TP* [Local stabilizing circuits of automatic control in automated process control systems]. Magnitogorsk, NMSTU Publ., 2012, 406 p. (In Russian)
 14. Dimov Yu.V., Podashev D.B. Edge quality management system for finishing with elastic polymer-abrasive tools and its analysis. Part 1. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2020, vol. 24, no. 5(154), pp. 977-992. (in Russian) doi: 10.21285/1814-3520-2020-5-977-992
 15. Marsuverskiy B.A. The Comprehensive Computer-Aided Control System for the Blast Furnace Process. *Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*. 2017. No. 7. pp. 41-46.
 16. Denisov M.S. Automated system of program control of the process of applying pressure on liquid and crystallizing metal. *Avtomatizatsiya. Sovremennye tekhnologii* [Automation. Modern technologies], 2020, vol. 74, no. 5, pp. 234-240. (In Russian)
 17. Silaeva E.Yu., Chebinev A.V. Development of an automated system for controlling the technological process of heat treatment of pipes in a roller furnace. *Naukosfera* [Sciencesphere], 2020, no. 5, pp. 108-113. (in Russian)
 18. Svezhentsev M.Yu. Development of an automated control system for the technological process of heating and equalizing the temperature of pipes in a furnace with walking beams. *Dnevnik nauki* [Diary of science], 2020, no. 5(41), pp. 33. (In Russian)
 19. Samokhval F.N. Automation in control systems of technological processes in the production of titanium sponge. *Molodezhnaya nauka v razvitiy regionov* [Youth science in the development of regions], 2019, vol. 1, pp. 154-156. (In Russian)
 20. Akhabei F. Predictive modeling to increase the reliability of production planning in single-item production / F. Akhabei, F. Bleicher. *Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science*. 2016. pp. 806-811.
 21. Ruiz E., Ferreño D., Cuartas M., Lopez A., Arroyo V., Gutiérrez-Solana F. Machine learning algorithms for the prediction of the strength of steel rods: an example of data-driven manufacturing in steelmaking. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*. 2020. Vol. 33(9). pp. 1-12. doi: 10.1080/0951192X.2020.1803505.
 22. Shilkina S.V., Gusarova A.A. Intelligent information technologies in automated process control systems. *Sovremennaya nauka i innovatsii* [Modern science and innovation], 2018, no. 1(21), pp. 34-39. (In Russian)
 23. Gorbach K.V. "Smart" non-ferrous metal. *Control Engineering Rossiya* [Control Engineering Russia], 2019, no. 3(81), pp. 70-73. (in Russian)
 24. Sharikov Yu.V., Snegirev N.In., Tkachev I.V., Petrov P.A. Development and simulation of control system based on predictive mathematical model for the industrial process of isomerization of pentane-hexane fraction / Cloud of Science, 2020, vol. 7, no. 2, pp. 273-284. (In Russian)
 25. Shmueli G., Koppius O.R. Predictive analytics in information systems research. *MIS Quarterly: Management Information Systems*. 2011. Vol. 35(3). pp. 553-572. doi: 10.2307/23042796.
 26. Hansen, RJ, Hall, DL, Nickerson, GW, & Phoha, S. "Integrated Predictive Diagnostics: An Expanded View. *Proceedings of the ASME 1996 International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exhibition*. Vol. 5: Manufacturing Materials and Metallurgy; Ceramics; Structures and Dynamics; Controls, Diagnostics and Instrumentation; Education; General. Birmingham, UK. June 10-13, 1996. V005T15A006. ASME. doi: 10.1115/96-GT-034
 27. Sidorenko N.S., Myalovsky V.A. Improvement of management of metallurgical production on the basis of full weight control of material flows. *Matematicheskoe i programnoe obespechenie v promyshlennoy i sotsialnoy sferakh* [Mathematical and software systems in industrial and social spheres], 2019, vol. 7, no. 2, pp. 35-37. doi: 10.18503/2306-2053-2019-7-2-35-37. (In Russian)
 28. Sidorenko N.S., Logunova O.S. Prerequisites for modernization of the corporate technology and quality management system at a metallurgical enterprise. *Materialy VIII Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Komp'yuternaya integratsiya proizvodstva i IPI-tekhnologii"* [Materials of the VIII All-Russian Scientific and Practical Conference "Computer Integration of Production and CALS-Technology"]. Orenburg, OSU Publ., 2017, pp. 661-664. (In Russian)
 29. Sidorenko N.S., Logunova O.S., Tyazhelnikova L.Y., Arkulis N.V. Information Storage of Metallurgical Enterprises: Transformation of the Structure. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2019, no. 4(45), pp. 52-57. (In Russian). doi: 10.18503/2311-8318-2019-4(45)-52-5.

Дьяконов Н.А., Логунова О.С. Системы управления технологическим процессом на основе предиктивной аналитики: проектирование // *Электротехнические системы и комплексы*. 2021. № 1(50). С. 58-64. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-1\(50\)-58-64](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-1(50)-58-64)

Dyakonov N.A., Logunova O.S. Process Control Systems Based on Predictive Analytics: Design. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2021, no. 1(50), pp. 58-64. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-1\(50\)-58-64](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-1(50)-58-64)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Абдулвелеев Ильдар Равильевич – канд. техн. наук, кафедра электроснабжения промышленных предприятий, институт энергетики и автоматизированных систем, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия. E-mail: leggyild@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2748-6533>.

Абузяров Тагир Хусаинович – аспирант, кафедра электрооборудования, электропривода и автоматики, институт электроэнергетики (ИНЭЛ), Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Россия. E-mail: atx888@yandex.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2527-7677>.

Арсентьев Григорий Олегович – аспирант, кафедра электроснабжения и электрооборудования, Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия. E-mail: arsentev_1986@bk.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6841-1477>.

Арсентьев Олег Васильевич – канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой, кафедра электропривода и электрического транспорта, Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия. E-mail: arsentyevoj@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2546-5969>.

Аухадеев Авер Эрикович – канд. техн. наук, доцент, кафедра электротехнических комплексов и систем, Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия. E-mail: auhadееvkgma@rambler.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7191-4550>.

Безъязычный Владимир Сергеевич – аспирант, энергетический факультет, Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, г. Новочеркасск, Россия.

Богачков Иван Михайлович – главный специалист, электротехнический отдел, Тюменский филиал ООО «Газпром проектирование», г. Тюмень, Россия. E-mail: Bogim83@mail.ru.

Бунин Александр Андреевич – аспирант, кафедра электроснабжения промышленных предприятий, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия. E-mail: buninworks1@rambler.ru.

Газизова Ольга Викторовна – канд. техн. наук, доцент, кафедра электроснабжения промышленных предприятий, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия. E-mail: logan_b_7@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9416-672X>.

Довудов Сарфароз Умедович – аспирант, кафедра электропривода и электрического транспорта, Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия. E-mail: dsu_1991@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5600-4615>.

Дунаев Михаил Павлович – д-р техн. наук, профессор, кафедра электропривода и электрического транспорта, Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия. E-mail: mdunaev10@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1523-5553>.

Дьяконов Никита Александрович – аспирант, институт энергетики и автоматизированных систем, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, инженер-программист, ИТЦ «Аусферр», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: diedrakon@yandex.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0667-3789>.

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>.

Крюков Андрей Васильевич – д-р техн. наук, профессор, кафедра электроэнергетики транспорта, Иркутский государственный университет путей сообщения, кафедра электроснабжения и электротехники, Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия. E-mail: and_kryukov@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6543-1790>.

Литвиненко Руслан Сергеевич – канд. техн. наук, доцент, кафедра электротехнических комплексов и систем, Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия. E-mail: litrus277@yandex.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8017-5868>.

Логунова Оксана Сергеевна – д-р техн. наук, профессор, директор, институт строительства, архитектуры и искусства, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7006-8639>.

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

Лыгин Максим Михайлович – аспирант, кафедра электроснабжения промышленных предприятий, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия. E-mail: eligin@ya.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8884-4846>.

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>.

Сафиуллин Булат Ирекович – магистрант, кафедра электротехнических комплексов и систем, Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия. E-mail: gougle2010@yandex.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5447-0724>.

Троицкий Анатолий Иванович – д-р техн. наук, профессор, энергетический факультет, Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М.И. Платова, г. Новочеркасск, Россия.

Ферапонтова Мария Владиславовна – магистрант, кафедра электротехнических комплексов и систем, Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия. E-mail: litrus@km.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7754-743X>.

Черепенькин Иван Вячеславович – магистрант, кафедра электротехнических комплексов и систем, Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия. E-mail: iwan.tcherepenkin@yandex.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0781-9938>.

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>.

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.