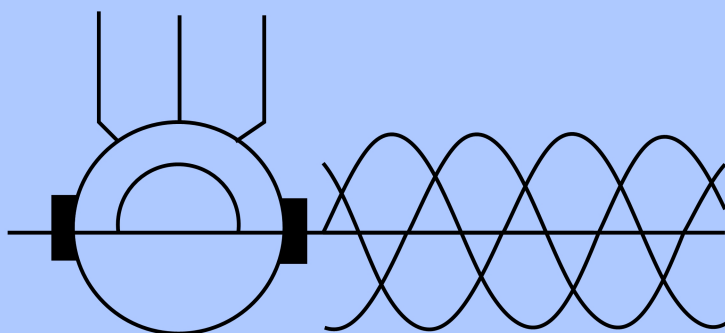
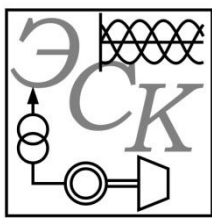


ISSN 2311-8318
ISSN (online) 2658-3151

Электротехнические Системы и Комплексы



№1(46), 2020



ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

ИЗДАЕТСЯ С ЯНВАРЯ 1996 Г.

№ 1(46), МАРТ 2020

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

Редакционная коллегия

Председатель редакционной коллегии:

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

Главный редактор:

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

Ответственный редактор:

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

Секция теории и практики автоматизированного электропривода:

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

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

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

Секция электро- и теплоэнергетики:

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

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

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

Секция энерго- и ресурсосбережения:

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

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

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

Секция электроснабжения:

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

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

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

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

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

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

Секция электротехнологий в промышленности:

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

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

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

Секция мониторинга, контроля и диагностики электрооборудования:

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

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

Технические редакторы:

Н.П. Боярова – 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», 2020

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

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

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

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

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

Адрес редакции:

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

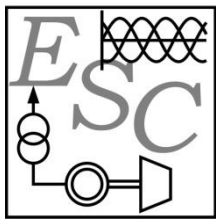
Адрес издателя:

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

Адрес типографии:

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

Выход в свет 27.03.2020. Заказ 118. Тираж 500 экз.
Цена свободная.



ELECTROTECHNICAL SYSTEMS AND COMPLEXES

PUBLISHED SINCE JAN., 1996

NO. 1(46) MAR, 2020

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

Editorial Board

Head of the Editorial Board:

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

Editor in Chief:

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

Executive Editor:

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

Secton of Theory and Practice of Automated Electric Drive:

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

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

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

Secton of Power Engineerign:

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

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

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

Secton of Energy- and Resources-Economy:

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

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

V.N. Meshcheryakov – Professor, D.Sc.
(Engineering), LSTU, Lipetsk, Russia.

Secton of Electric Power Supply:

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

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

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

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

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

E.N. Ishmet'ev – D.Sc. (Engineering),
Director of R&D at 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),
NMSTU, Magnitogorsk, Russia;

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

Technical Editors:

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

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

© FSBEI HE NMSTU, 2020

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 editorial office:

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

The publisher:

45/2 Karla Marksa prospekt, Magnitogorsk,
Chelyabinsk region, 455000, Russia
Nosov Magnitogorsk State Technical University
e-mail: ecis.red@gmail.com

The printing-office:

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

Publication date: 27.03.2020. Order 118. Circulation: 500.
Open price.

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРО- И ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА	4
<i>Воронин С.Г., Чернышев А.Д.</i> Модель вентильного индукторного генератора с конденсаторным возбуждением	4
<i>Аминов Д.С.</i> Применение программного комплекса ANSYS ELECTRONICS DESKTOP для анализа водопогружного гидрогенератора комбинированного возбуждения.....	13
<i>Исмагилов Ф.Р., Герасин А.А., Вавилов В.Е., Зиннатуллина Г.С.</i> Высокооборотный синхронный стартер-генератор для безредукторных вспомогательных силовых установок ..	19
<i>Панова Е.А., Варганова А.В., Панарина М.С.</i> Автоматизированная проверка однополосных шин прямоугольного сечения по условиям термической и электродинамической стойкости	28
ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ	34
<i>Климаш В.С., Соколовский М.А.</i> Повышение энергетической эффективности комплекса подъемных кранов.....	34
<i>Корнилов Г.П., Кожевников И.О., Косматов В.И., Храмин Т.Р., Храмин Р.Р.</i> Резервы энергосбережения мощных синхронных двигателей металлургических приводов.....	41
ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА, АВТОМАТИКА И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ	46
<i>Лукьянов С.И., Красильников С.С., Швидченко Д.В., Швидченко Н.В., Пишнограев Р.С.</i> Система диагностирования шлака при выпуске металла из кислородного конвертера по интенсивности инфракрасного излучения расплава.....	46
ИНФОРМАЦИОННОЕ, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ	54
<i>Логанова О.С., Андреев С.М., Гарбар Е.А., Маркевич А.В., Николаев А.А.</i> Автоматизация научных исследований нарушения сплошности плоской поверхности: конструкционное решение программно-аппаратного комплекса.....	54
<i>Юдинцев А.Г., Ткаченко А.А., Ляпунов Д.Ю.</i> Методика разработки имитатора нагрузок для наземных испытаний систем электропитания автономных объектов.....	60
СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	67

CONTENT

ELECTRIC POWER SUPPLY	4
<i>Voronin S.G., Chernyshev A.D.</i> Modeling of Switch Reluctance Generator with Capacitor Excitation.....	4
<i>Aminov D.S.</i> Application of Ansys Electronics Desktop Software for Analysis of Combined Excitation Water Submersible Hydrogenerator.....	13
<i>Ismagilov F.R., Gerasin A.A., Vavilov V.E. Zinnatullina G.S.</i> High-Speed Synchronous Starter-Generator for Non-Gear Auxiliary Power Plants	19
<i>Panova E.A., Varganova A.V., Panarina M.S.</i> Automated Check of Single-bar rectangular Busbars on The Conditions of Thermal and Electrodynamic Withstand.....	28
ENERGY- AND RESOURCES-ECONOMY.....	34
<i>Klimash V.S., Sokolovskii M.A.</i> Improving the Energy Efficiency of a Lifting Crane Complex.....	34
<i>Kornilov G.P., Kozhevnikov I.O., Kosmatov V.I., Khramshin T.R., Khramshin R.R.</i> Reserves for Power Saving of Synchronous Motors as a Part of Metallurgical Drives.....	41
POWER ELECTRONICS, AUTOMATION AND CONTROL SYSTEMS	46
<i>Lukyanov S.I., Krasilnikov S.S., Shvidchenko D.V., Shvidchenko N.V., Pishnograev R.S.</i> Slag Diagnostic System For Metal Release From the Oxygen Converter by the Intensity of Infrared Melt Radiation.....	46
TECHNICAL SYSTEMS DATAWARE AND SOFTWARE	54
<i>Logunova O.S., Andreev S.M., Garbar E.A., Markevich A.V., Nikolaev A.A.</i> Automation of Scientific Research of Flat Surface Discontinuities: Structural Solution of a Hardware-Software Complex	54
<i>Yudintsev A.G., Tkachenko A.A., Lyapunov D.Yu.</i> Methodology of Load Simulator Design for Ground Testing of Power Supply Systems of Autonomous Objects.....	60
INFORMATION ABOUT THE AUTHORS	67

МОДЕЛЬ ВЕНТИЛЬНОГО ИНДУКТОРНОГО ГЕНЕРАТОРА С КОНДЕНСАТОРНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

Одним из возможных типов электрических машин в составе автономных энергетических установок является вентильный индукторный генератор с самовозбуждением. Исследование электромагнитных процессов, протекающих в вентильных индукторных машинах с самовозбуждением, позволило создать вентильный индукторный генератор с новым способом возбуждения и коммутации фазных обмоток в естественном режиме. В основу данного способа легла такая особенность подобных электрических машин, как возможность обеспечения трапецеидальной формы фазных ЭДС, что позволяет осуществлять коммутацию и возбуждение фазных обмоток в естественном режиме без необходимости отслеживания и коммутации фазных токов в зависимости от положения ротора, за счет коммутации конденсаторов неработающей фазы. Такое решение позволило значительно упростить и снизить стоимость электронной аппаратуры управления вентильного индукторного генератора. В силу новизны конструкции рассматриваемое техническое решение не было исследовано ни зарубежными, ни отечественными учеными. В данной статье представлена математическая модель вентильного-индукторного генератора с конденсаторным возбуждением и тиристорным управлением током возбуждения путем изменения соотношения между полупериодами тока, пропускаемого тиристорами и полупериодами напряжения, прикладываемого к ним, выполненная в динамической связке *ANSYS Maxwell* и *ANSYS Simplorer*. Проведен междисциплинарный расчет построенной модели, результаты которого в виде зависимостей токов и ЭДС обмоток и конденсаторов возбуждения от времени приведены в статье. По результатам исследований, проведенных на представленной модели спроектирован и изготовлен на предприятии ООО НПП «Резонанс» экспериментальный образец вентильного индукторного генератора с конденсаторным возбуждением и микропроцессорным управлением. Осциллограммы, зафиксированные на испытательном стенде, в большой степени совпадают с расчетными зависимостями токов и напряжений, что подтвердило адекватность модели.

Ключевые слова: автономная энергетическая установка, вентильный индукторный генератор, компьютерная модель, конечно-элементная модель, электрическая машина, электрический ток, ЭДС.

ВВЕДЕНИЕ

Основой автономных энергетических установок могут служить различные типы электрических машин: коллекторные и вентильные машины постоянного тока, синхронные генераторы с контактными кольцами, с клювообразным ротором, с вращающимся выпрямителем, с постоянными магнитами, асинхронные генераторы с конденсаторным возбуждением и вентильным возбуждением, индукторные генераторы, синхронные реактивные машины независимого возбуждения, вентильные индукторные машины с независимым возбуждением и с самовозбуждением [1, 2].

Тем не менее при проектировании новых самоходных машин на электрической тяге в основном применяют синхронные генераторы с постоянными магнитами, контактными кольцами или вращающимся выпрямителем. Такой выбор обоснован достоинствами данных машин: высокие массогабаритные показатели, высокий КПД и коэффициент мощности, а касемо последних двух – хорошими регулировочными характеристиками [3, 4]. Но не стоит забывать и об основных недостатках указанных машин.

У синхронных генераторов с постоянными магнитами отсутствует возможность регулировать магнитный поток, ЭДС в значительной степени зависит от скорости вращения ротора, что сказывается на повышенной пожароопасности и требованиях к силовой

электронике. Синхронные генераторы с контактными кольцами имеют механический щеточный узел, который усложняет производство и повышает уровень электромагнитных помех. Синхронные генераторы с вращающимся выпрямителем сложны в производстве, а полупроводниковые компоненты в роторе накладывают значительные ограничения по рабочей температуре.

Ужесточение требований, предъявляемых к тяговым генераторам, актуализирует применение вентильных индукторных генераторов с самовозбуждением (ВИГ) [5, 6]. Это обусловлено характерными для индукторных машин достоинствами: регулируемое электромагнитное возбуждение, пассивный ротор, концентрические катушки, охватывающие по одному зубцу статора, простая конструкция и высокая технологичность изготовления. К недостаткам ВИГ следует отнести необходимость установки специализированного преобразователя, который имеет большую стоимость и габариты в сравнении с инверторами классических электрических машин, необходимость контроля фазных токов в зависимости от положения ротора, а соответственно, датчик положения ротора, большое количество датчиков тока, нелинейные регулировочные характеристики и необходимость обеспечения минимального воздушного зазора [7, 8].

Аналогичными достоинствами обладают и другие типы индукторных машин: разноименнополусные и одноименнополусные индукторные генераторы, в том числе и их вариации в виде синхронно-реактивных

машин и вентильных индукторных машин с независимым возбуждением. Основным недостатком разноименнополюсных индукторных генераторов и синхронно-реактивных машин является сложность достижения высоких удельных показателей, так как значительную часть статора занимает обмотка возбуждения [9, 10]. Для одноименнополюсных индукторных генераторов и вентильных индукторных машин с независимым возбуждением основными недостатками являются необходимость применения специальных мер по предотвращению замыкания магнитного потока через подшипниковые узлы, сложность монтажа обмотки возбуждения и балансировки ротора, а также протекание магнитного потока обмотки возбуждения поперек направления шихтовки стали статора [11,12].

Каждый из перечисленных типов машин обладает своими достоинствами и недостатками, а требования, предъявляемые к энергетическим установкам, носят достаточно противоречивый характер и вынуждают инженеров находить компромиссное решение. Поэтому говорить о явных преимуществах тех или иных электрических машин над другими нельзя.

Большой вклад в изучение вентильных индукторных машин с самовозбуждением внесли отечественные и зарубежные ученые: Ильинский Н.Ф., Кузнецов В.А., Фисенко В.Г., Голландцев Ю.А., Miller T., Lawrenson P. [13–17]. Однако большинство исследований посвящены двигательному режиму работы и лишь малая часть генераторному режиму работы.

Изучение работы вентильного индукторного генератора привело к идее использования физических особенностей электромагнитных процессов машины, а именно трапецеидальной формы фазных ЭДС с крутыми фронтами, для возбуждения и коммутации обмоток в естественном режиме без необходимости отслеживания и коммутации фазных токов в зависимости от положения ротора, что позволяет значительно упростить электронную аппаратуру управления. В результате была разработана новая конструкция и электрическая схема вентильного индукторного генератора с конденсаторным возбуждением (ВИГ КВ) [18, 19]. Важной особенностью конструкции ВИГ КВ является малое количество витков дополнительной обмотки (в рассматриваемом варианте в 10 раз меньшее, чем у якорной обмотки), что позволяет для управления током возбуждения использовать низковольтные электронные компоненты, а сама дополнительная обмотка занимает малое количество полезного объема электрической машины [18]. К недостаткам ВИГ КВ следует отнести повышенные токовые нагрузки вследствие протекания постоянной составляющей тока по якорным обмоткам, отсутствие возможности работы в двигательном режиме и необходимость устройства первоначального возбуждения. В качестве возбудителя авторами выбрана конденсаторная батарея достаточно большой емкости, подключенная параллельно одной из цепей возбуждения. Батарея конденсаторов формирует импульс тока с амплитудой, равной номинальному току якоря, и длительность в несколько миллисекунд, который независимо от положения ротора протекает по всем якорным за счет полупроводниковых компо-

нентов в электрической цепи, после чего начинается генерация электрической энергии.

Рассмотренная в данной статье автономная энергетическая установка на базе ВИГ КВ была внедрена в производство и использована в качестве тягового генератора электромеханической трансмиссии универсального колесного трактора компанией ООО НПП «Резонанс», что позволило значительно снизить себестоимость и получить экономическую выгоду.

Новизна конструкции ВИГ КВ исключает возможность использования существующих моделей вентильных индукторных двигателей для исследования электромагнитных процессов, протекающих в нем, в различных режимах работы при разнообразных внешних воздействиях. Это актуализирует создание компьютерной модели на базе конечно-элементного метода, которая позволит производить междисциплинарные расчеты для исследования электромагнитных процессов генератора и алгоритмов его управления.

КОНСТРУКЦИЯ ВЕНТИЛЬНОГО ИНДУКТОРНОГО ГЕНЕРАТОРА С КОНДЕНСАТОРНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

На **рис. 1** приведен простой вариант ВИГ КВ на основе трехфазной электрической машины с одной парой полюсов.

На **рис. 1**: A, B, C и a, b, c – совмещенные якорные и дополнительные обмотки фаз генератора; L_A, L_B, L_C и l_a, l_b, l_c – собственные индуктивности якорных и дополнительных обмоток $VD1 - VD3$ – шунтирующие диоды; $VS1 - VS3$ – тиристоры в цепи возбуждения; $C1 - C3$ – конденсаторы возбуждения; $VD4 - VD9$ – диоды силового выпрямителя; $C4$ – конденсатор силового выпрямителя, $U_{\text{вых}}$ – напряжение на выходе выпрямителя генератора.

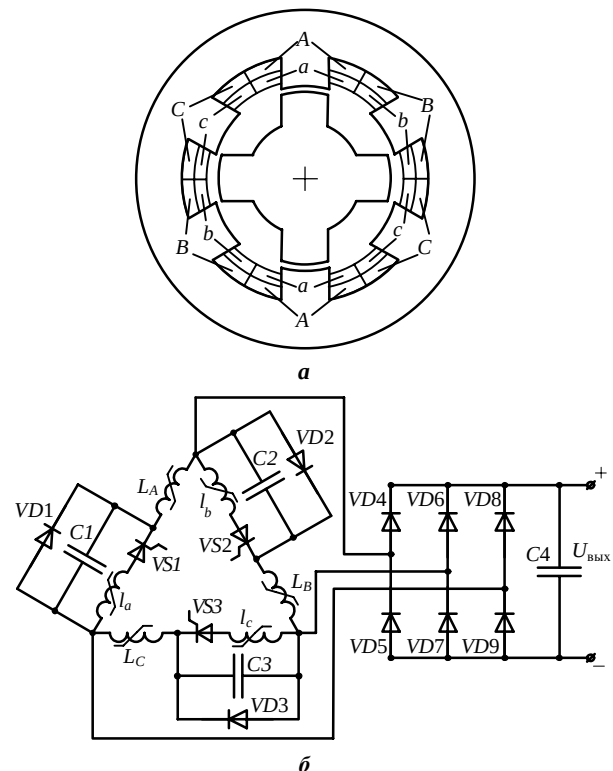


Рис. 1. Магнитная система (а) и электрическая схема нового ВИГ (б)

Представленное решение (рис. 1) заключается в отделении от якорных обмоток A, B, C дополнительных синфазных обмоток возбуждения a, b, c , которые совместно с конденсаторами $C1 - C3$ и полупроводниковыми компонентами в виде шунтирующих диодов $VD1 - VD3$ и тиристоров $VS1 - VS3$ образуют цепь возбуждения. В процессе работы дополнительные обмотки I_a, I_b, I_c осуществляют заряд конденсаторов $C1 - C3$, которые при выходе фазы, параллельно которой включены, из такта генерации вырабатывают значительный импульс тока за счет резкого спада напряжения на якорной и дополнительной обмотке. Формируемый импульс тока за счет соединения обмоток в многоугольник протекает по всем якорным обмоткам L_A, L_B, L_C , тем самым возбуждая фазу, находящуюся в такте генерации [12]. Тиристоры $VS1 - VS3$ позволяют с высокой точностью осуществлять регулирование выходного напряжения $U_{\text{вых}}$ за счет изменения соотношения между полупериодами тока пропускаемых ими и полупериодов напряжения, прикладываемого к ним [13].

Для понимания процесса генерации на рис. 2 представлены идеализированные зависимости индуктивности, ЭДС и тока фазы.

Здесь условно выделены 4 участка, соответствующие характеру изменения индуктивности. Первый участок характеризуется практически постоянным минимальным значением индуктивности, в это время происходит коммутация между фазами, не представленными на рисунке. Второй участок характеризуется практически линейным ростом индуктивности. Рассматриваемая фаза не вырабатывает электрической энергии. Третий участок соответствует полному перекрытию зубцов статора и ротора и практически постоянным максимальным значением индуктивности, после этого момента начинается возбуждение рассматриваемой фазы, что осуществляется с помощью цепи возбуждения (конденсатора) предшествующей фазы. Четвертый участок характеризуется уменьшением эквивалентной площади перекрытия зубцов и линейным уменьшением индуктивности, на данном участке происходит генерация электрической энергии.

Особенностью электромагнитных процессов, протекающих в ВИГ, является возможность обеспечения трапецеидальной формы фазных ЭДС с крутыми фронтами. Совместно с нестандартными для данных электрических машин схемотехническими решениями – расщепление фазных обмоток на синфазные обмотки, обмотку якоря A, B, C и дополнительную обмотку (обмотку возбуждения) a, b, c – включение в схему диодов $VD1 - VD3$, обеспечивающих коммутацию дополнительных обмоток a, b, c , тиристоров $VS1 - VS3$ для регулирования тока возбуждения и конденсаторов $C1 - C3$, формирующих ток возбуждения за счет крутого заднего фронта фазного ЭДС, позволяет в генераторном режиме осуществлять коммутацию и возбуждение фазных обмоток в естественном режиме за счет выходящей из фазы генерации обмотки.

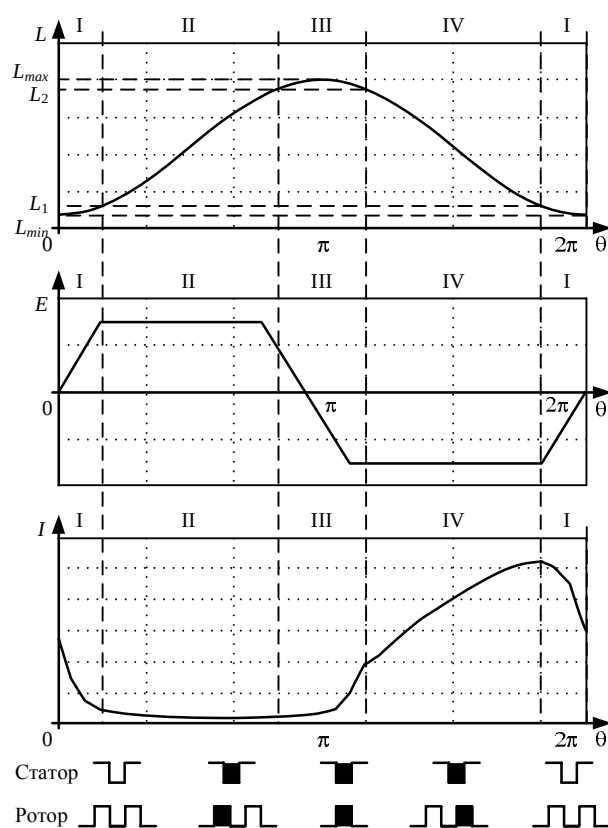


Рис. 2. Модель электрической схемы ВИГ KB в ANSYS Simplorer

Напряжение на конденсаторе возбуждения повторяет по форме отрицательный полупериод напряжения на фазе. Здесь условно выделены 4 участка, соответствующие характеру изменения индуктивности. Первый участок характеризуется практически постоянным минимальным значением индуктивности, в это время происходит коммутация между фазами, не представленными на рисунке. Второй участок характеризуется практически линейным ростом индуктивности. Рассматриваемая фаза не вырабатывает электрической энергии. Третий участок соответствует полному перекрытию зубцов статора и ротора и практически постоянным максимальным значением индуктивности, после этого момента начинается возбуждение рассматриваемой фазы, что осуществляется с помощью цепи возбуждения (конденсатора) предшествующей фазы. Четвертый участок, характеризуется уменьшением эквивалентной площади перекрытия зубцов и линейным уменьшением индуктивности, на данном участке происходит генерация электрической энергии.

Результатом, достигаемым данным техническим решением, является исключение необходимости контроля фазных токов в зависимости от положения ротора, что позволяет убрать из системы датчик положения ротора и датчики фазных токов, инвертор, а также упрощение системы управления, что дает возможность использовать простой микропроцессор или заменить его на логику на интегральных компонентах [14].

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Создание математической модели на основе взаимосвязей, полученных по аппроксимированным средним значениям эмпирических или расчетных зависимостей вместе с принимаемыми допущениями,

приводит к снижению достоверности результатов, что увеличивает объем требуемых экспериментальных исследований [15]. Доступные в настоящее время инструменты (программно-вычислительные комплексы и высокопроизводительные электронно-вычислительные машины) позволяют разработать универсальную модель ВИГ КВ и получать достоверные результаты, максимально приближенные к реальным условиям работы, включая аварийные и аномальные режимы.

Несмотря на большое количество программно-вычислительных средств, специалисты в области информационных технологий в математическом моделировании и исследователи в области электрического привода предпочтение отдают ANSYS [16–20].

Для достижения наибольшей энергетической эффективности и использования активных материалов ВИГ КВ был выбран трехфазный вариант генератора с 3 парами полюсов. В динамической связке ANSYS Simplorer и Ansys Maxwell была разработана модель ВИГ КВ, состоящая из модели электрической схемы и конечно-элементной модели электромеханического преобразователя (рис. 3).

На рис. 3: FEA1 – конечно-элементная модель электромеханического преобразователя, PhaseA_in, PhaseB_in, PhaseC_in, PhaseVA_in, PhaseVB_in, PhaseVC_in, PhaseA_out, PhaseB_out, PhaseC_out, PhaseVA_out, PhaseVB_out, PhaseVC_out – выходы обмоток, подключенные к внешней электрической цепи, в которой C1 – C3 – конденсаторы возбуждения, D1 – D3 – шунтирующие диоды, TH1 – TH3 – тиристоры цепи возбуждения, D4 – D9 – диоды силового выпрямителя, D10 – D12 – диоды измерительного выпрямителя, R5 и C5 – резистор и конденсатор фильтра измерительного выпрямителя, C4 – конденсатор фильтра

силового выпрямителя, R0 – активная нагрузка, AM1 – датчик тока, VM1 – датчик напряжения, скорость вращения двигателя задается фиксированной с учетом момента инерции ротора $J=1 \text{ кг/м}^2$, корпус электрической машины жестко зафиксирован.

В предложенной модели применен разработанный авторами алгоритм регулирования тока возбуждения, основанный на изменении соотношения между полупериодами тока, пропускаемыми ими, и полупериодами напряжения, прикладываемаемого к ним. На рис. 4 представлена модель в ANSYS Simplorer, реализующая данный алгоритм, которая отражает систему подчиненного регулирования по напряжению.

На рис. 4: 1 – ПИ-регулятор напряжения, 2 – тиристорный регулятор тока возбуждения ВИГ КВ путем изменения количества полупериодов пропускаемого тока тиристорами за некоторый интервал времени, 3 – ВИГ КВ, 4 – блок обратной связи по напряжению, $U_{\text{зад}}$ – заданное напряжение, ΔU – ошибка по напряжению, f – частота формирования управляющих импульсов для тиристоров за период времени; I_b – ток возбуждения; $U_{\text{вых}}$ – напряжение на выходе силового выпрямителя ВИГ КВ, I_n – ток нагрузки, $U_{\text{ос}}$ – напряжение обратной связи с вольтметра VM1.

В ходе проведения компьютерных исследований были получены осциллограммы токов и напряжений основных компонентов ВИГ КВ, характеристики при различных скоростях вращения и нагрузках. Данные исследования были проведены в ходе разработки экспериментального образца ВИГ КВ номинальной мощностью 132 кВт. Осциллограммы токов (обозначены красным цветом) и напряжений (обозначены черным цветом) обмоток и конденсаторов одной из фаз для номинального режима работы представлены на рис. 5.

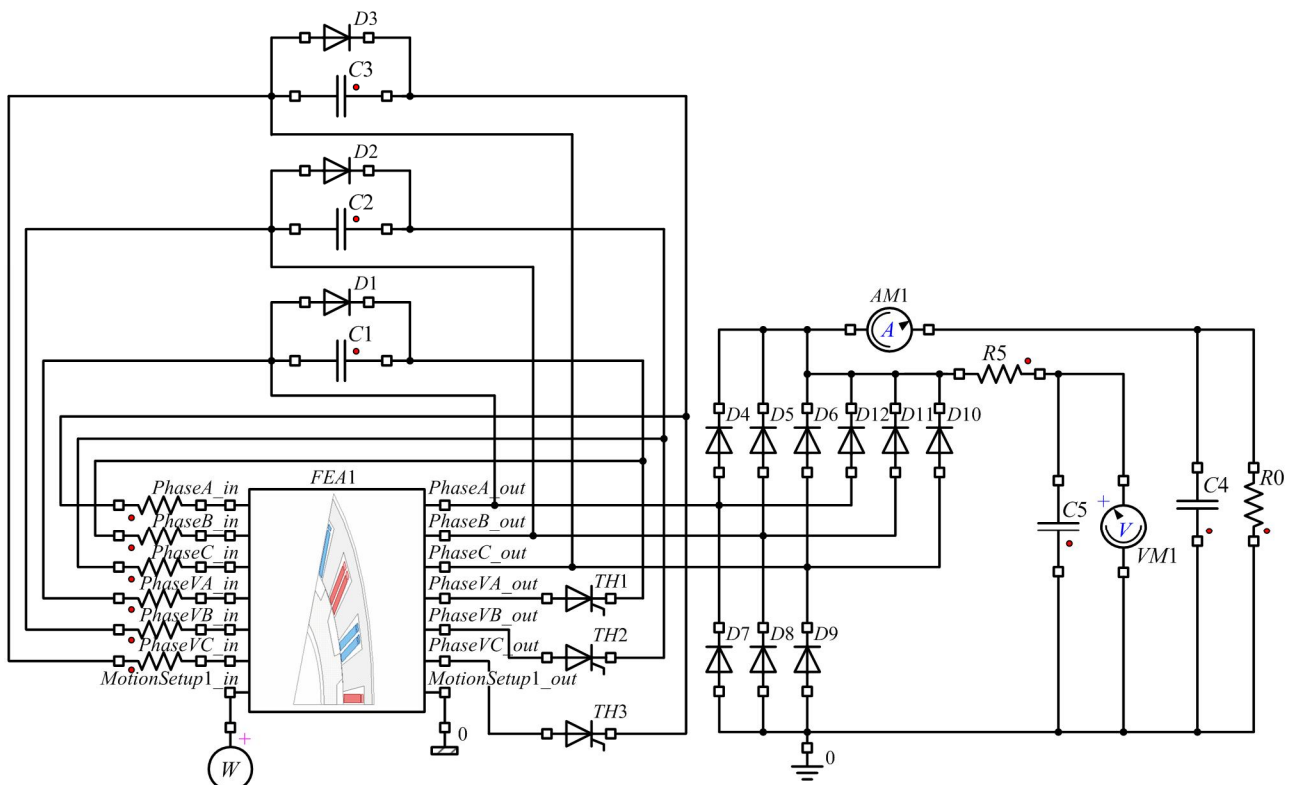


Рис. 3. Модель электрической схемы ВИГ КВ в ANSYS Simplorer

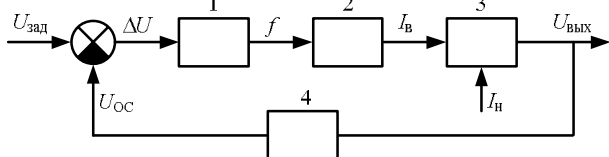


Рис. 4. Структурная схема системы управления ВИГ КВ

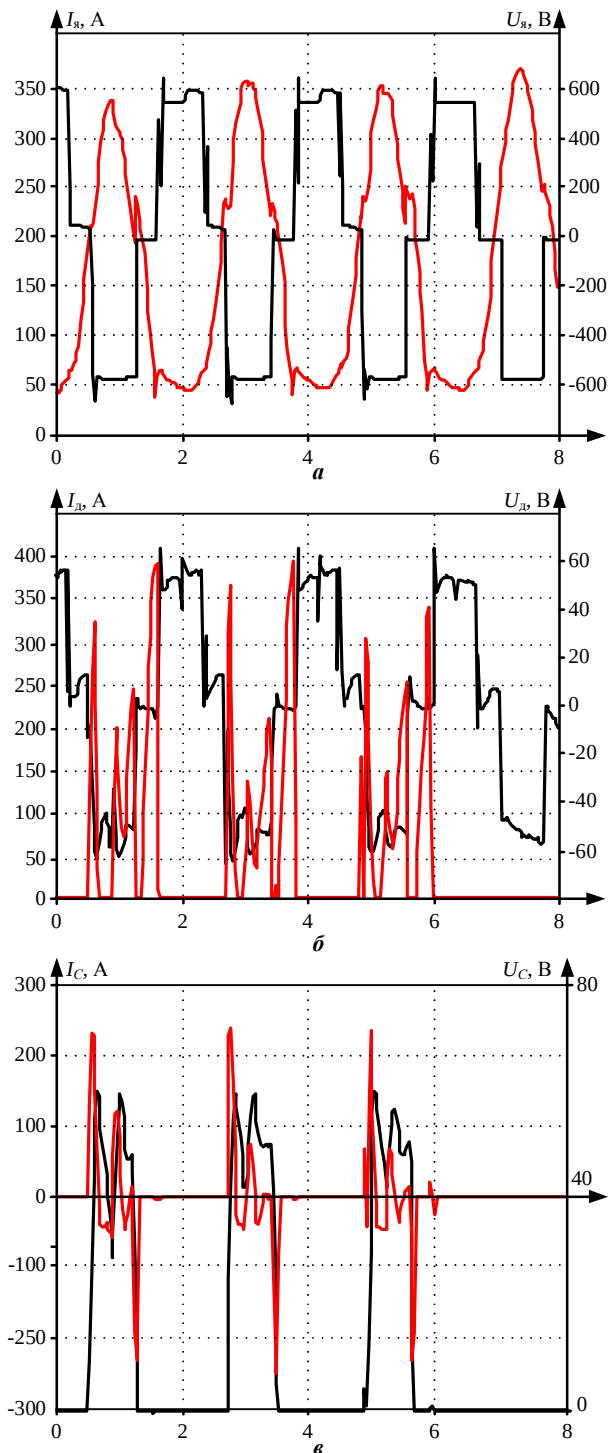


Рис. 5. Расчетные осциллограммы токов и напряжений ВИГ КВ: а – ток и ЭДС якорной обмотки; б – ток и ЭДС дополнительной обмотки; в – ток и ЭДС конденсатора возбуждения

Анализируя полученные графики, можно отметить следующие моменты. Ток якорной обмотки имеет постоянную составляющую. ЭДС обмотки возбуждения имеет значительные броски, обусловленные коммутацией, что

усложняет выбор полупроводниковых компонентов. По конденсаторам возбуждения протекают значительные импульсные токи, что вызывает необходимость выбора более качественных компонентов с меньшим внутренним сопротивлением и индуктивностью. ЭДС якорной и дополнительной обмотки отличается в N раз, что обусловлено отношением количества витков.

Используя предложенную математическую модель, были проведены расчеты для различных режимов работы при фиксированном задании напряжения 550 В: скорости вращения от 900 об/мин до 2300 об/мин, нагрузки от 40 до 2 Ом. В том числе были сняты нагрузочные характеристики, характеристики холостого хода и регулировочные характеристики генератора. В результате были получены зависимости крутящего момента, входной и выходной мощности, потерь в магнитопроводе и обмотках, токов и ЭДС фазных обмоток якоря и возбуждения, а также конденсаторов возбуждения и всех компонентов электрической схемы. По результатам были вычислены средние значения КПД для каждого режима работы.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ ОБРАЗЕЦ ВИГ КВ

Адекватность модели была проверена на экспериментальном образце (рис. 6), изготовленном предприятием ООО НПП «Резонанс» в рамках создания «Перспективных электромеханических трансмиссий специальных транспортных средств повышенной экономичности и безопасности» [5, 6]. В данном случае для ВИГ КВ был использован серийно выпускаемый предприятием контроллер на базе микропроцессора STM32F405VGT7, производства STMicroelectronics. Алгоритм управления для микроконтроллера был выполнен на языке программирования C++ в среде разработки Code Composer Studio, что позволяет отлаживать систему в реальном времени, осуществлять мониторинг параметров и запись «логов» [21].

В ходе экспериментальных исследований были зафиксированы выходные характеристики генератора при заданных значениях скорости: действующие значения тока и напряжения нагрузки, тока и ЭДС фазных обмоток якоря и возбуждения, крутящего момента. Данные исследования позволили получить экспериментальные нагрузочные характеристики, характеристики холостого хода и регулировочные характеристики генератора. С помощью цифрового осциллографа проводились наблюдения за токами и ЭДС фазных и дополнительных обмоток и конденсаторов возбуждения. На рис. 7 представлены данные осциллограммы для номинального режима работы.

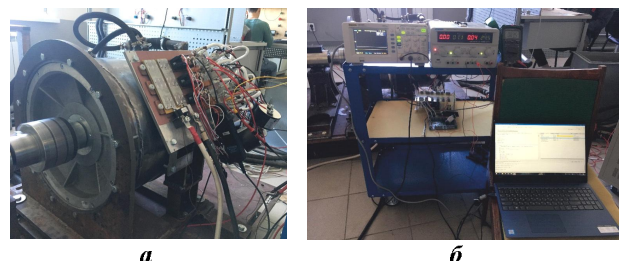


Рис. 6. Экспериментальный образец: а – электрическая машина и силовая электроника; б – средства измерения и управления: цифровой осциллограф, лабораторный источник питания, контроллер, драйверная плата, ЭВМ с программным обеспечением

Таблица 1

Экспериментальная зависимость напряжения холостого хода от скорости вращения

Параметр	Значения				
n , об/мин	902	1096	1298	1696	2295
U , В	390	469	550	549	545

Таблица 2

Экспериментальная регулировочная характеристика для номинальной скорости вращения

Параметр	Значение				
I_R , А	90	124	181	215	261
I_b , А	24	34	44	66	93

По табл. 2 видна почти линейная зависимость тока дополнительной обмотки от тока нагрузки, что обусловлено алгоритмом управления, а именно увеличением количества полупериодов тока, пропускаемых тиристорами за фиксированный период времени с увеличением тока нагрузки для поддержания напряжения на выходе силового выпрямителя на заданном уровне.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ВИГ КВ

Проведенный междисциплинарный расчет ВИГ КВ посредством моделирования электрохимического преобразователя и электрической схемы позволил получить зависимости токов и ЭДС фазных обмоток, а также токов и напряжений конденсаторов в номинальном режиме работы (рис. 5). Данные зависимости были сопоставлены с осциллограммами, полученными на испытательном стенде (рис. 7), и показали высокую сходимость между собой как в качественном, так и в количественном отношении.

На рис. 8 представлено сопоставление расчетной и экспериментальной зависимости напряжения холостого хода от скорости вращения при заданном напряжении 550 В в системе управления. Корреляция между моделью и экспериментом составляет $R=0,95$.

На рис. 9 представлено сопоставление расчетной и экспериментальной зависимости тока обмотки возбуждения от тока нагрузки при номинальной скорости вращения и фиксированном напряжении на выходе силового выпрямителя. Корреляция между моделью и экспериментом составляет $R=0,99$.

На рис. 10 представлено сопоставление расчетной и экспериментальной зависимости мощности от тока нагрузки при номинальной скорости вращения и фиксированном напряжении на выходе силового выпрямителя. Корреляция между моделью и экспериментом составляет $R=0,99$.

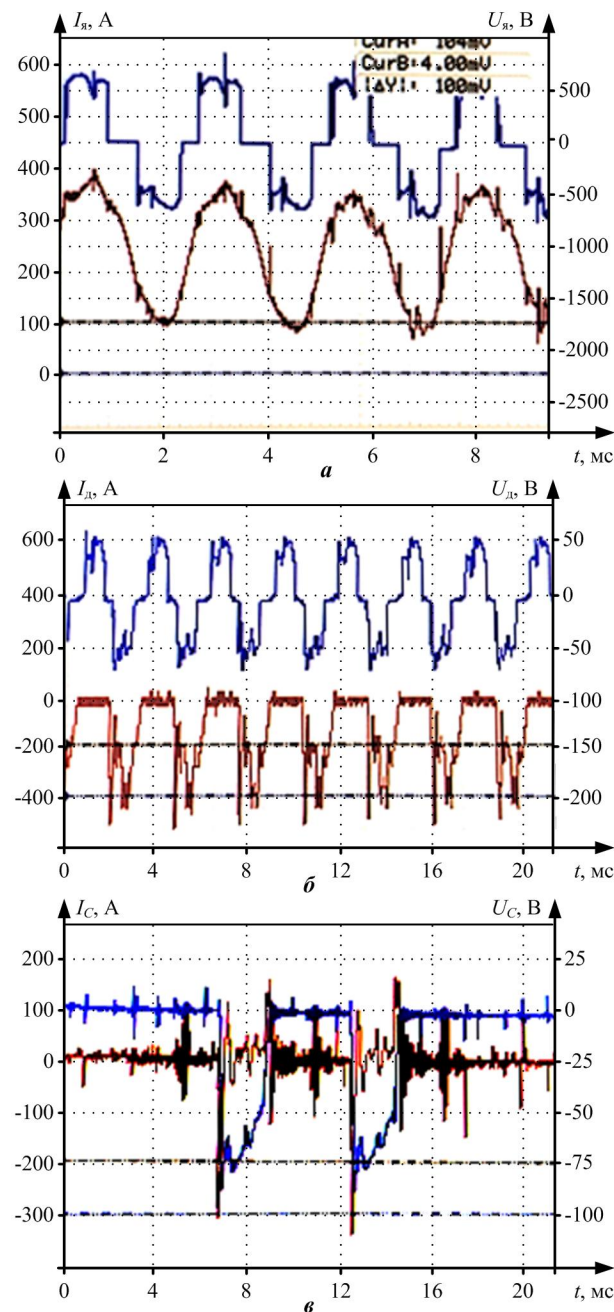


Рис. 7. Опытные осциллограммы токов и напряжений ВИГ КВ: а – ток и ЭДС якорной обмотки, б – ток и ЭДС дополнительной обмотки, в – ток и напряжение конденсатора возбуждения

В табл. 1 представлены экспериментальные зависимости напряжения холостого хода от скорости вращения при фиксированном задании напряжения.

В табл. 2 представлены экспериментальные зависимости тока обмотки возбуждения от тока нагрузки при номинальной скорости вращения и фиксированном значении выходного напряжения.

По табл. 1 можно сделать заключение, что на малой скорости напряжение значительно ниже задания. Это обусловлено зависимостью тока возбуждения, формируемого конденсаторами от ЭДС фазы, что следует из электрической схемы (рис. 1), что дополнительно увеличивает зависимость ЭДС фазы от скорости вращения.

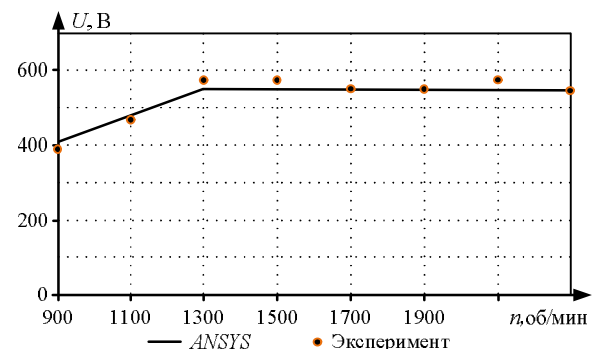


Рис. 8. Характеристики холостого хода ВИГ КВ

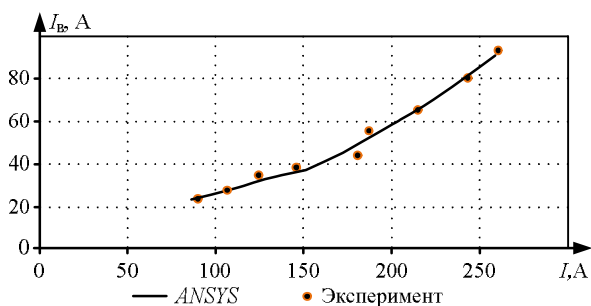


Рис. 9. Регулировочные характеристики ВИГ КВ

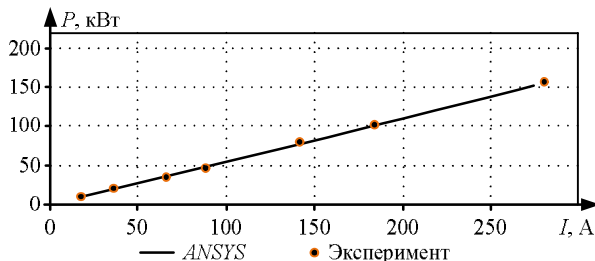


Рис. 10. Зависимость мощности от тока нагрузки

Исследования, проведенные на экспериментальном образце, позволяют отметить высокую сходимость результатов расчетов и экспериментов. В количественном отношении отличие среднего значения результатов составляет менее 5%, корреляция для динамических режимов составляет $R=0,95...0,99$, что указывает на высокую точность модели и подтверждает ее адекватность.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Построена компьютерная модель ВИГ КВ с использованием ANSYS Maxwell для электрической машины и ANSYS Simplorer для электрической схемы и алгоритма управления и выполнен междисциплинарный расчет.

2. Разработан и изготовлен экспериментальный образец ВИГ КВ мощностью 132 кВт с микропроцессорным управлением, позволяющим осуществлять мониторинг и запись параметров его работы, а также осуществлять отладку алгоритма управления в режиме реального времени.

3. Адекватность модели подтверждается тем, что расчетные токи и ЭДС достаточно близко совпадают с экспериментальными осциллограммами ВИГ КВ, полученными на испытательном стенде.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Виноградов К.М. Автономная энергетическая установка с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения: дис. ... канд. техн. наук. Челябинск, 2006. 173 с.
- Чернышев А.Д. Расчет механической характеристики тягового электродвигателя электрической трансмиссии транспортного средства // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. 2018. № 1. С. 5-16.
- Лашкевич М.М. Разработка системы управления для электротрансмиссии с тяговыми вентильно-индукторными двигателями: дис. ... канд. техн. наук. М., 2013. 175 с.
- Гребенников Н.В. Динамика и энергоэффективность перспективных единиц подвижного состава, оснащаемых вентильно-индукторными электрическими машинами: дис. ... канд. техн. наук. Ростов-на-Дону, 2012. 148 с.
- Коровин В.А., Чернышов А.Д. Инновационная электро-механическая трансмиссия повышенной безопасности и

экономичности // Вторая научно-практическая конференция «Разработка и использование электрических трансмиссий для образцов вооружения и военной техники», 26 апреля 2018 г., Санкт-Петербург.

- Чернышев А.Д. Электромеханическая трансмиссия для системы управления и контроля ISOBUS сельскохозяйственной техникой / А.Д. Чернышев // Конференция – совещание «Универсальные системы управления и мониторинга для техники сельскохозяйственного назначения (ISOBUS)», 18 октября 2018 г., Москва.
- Голландцев Ю.А. Сравнение механических характеристик асинхронных и вентильных индукторно-реактивных двигателей // Информационно-управляющие системы. 2006. №6. С. 50–53.
- Голландцев Ю.А. Вентильные индукторно-реактивные двигатели. СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2003. 148 с.
- Weh. H. On the Development of Inverter Fed Reluctance Machines for High Power Densities and High Output / H. Weh // Electrical Machines Institute of the Technical University of Braunschweig. 1984. Bd. 6. P. 135-144.
- Matsuo T., Lipo T. Rotor Design Optimization of Synchronous Reluctance Machine // IEEE Transaction on Energy Conversion. 1994. № 22. Vol. 9. P. 359-365.
- Жарков А.А. Разработка и исследование вентильного индукторного электропривода с независимым возбуждением и микроконтроллерным управлением: дис. ... канд. техн. наук. М., 2008. 150 с.
- Новое направление в электроприводе – мощный много-секционный вентильно-индукторный электропривод с векторным управлением / В.Ф. Казаченко, В.Н. Остриров, А.М. Русакаков, А.В. Дроздов // Электронные компоненты. 2006. №11. С. 30-35.
- Фисенко В.Г., Попов А.Н. Проектирование вентильных индукторных двигателей. М.: Изд-во МЭИ, 2005. 56 с.
- Голландцев Ю.А. Вентильные индукторно-реактивные двигатели прецизионных следящих систем электропривода: дис. ... док. техн. наук. Санкт-Петербург, 2004. 299 с.
- Miller T.J.E. Switched Reluctance motor and their Control. – Magna Physics Publishing and Clarendon Oxford Press, 1993. 203 p.
- Lawrenson P. Variable-Speed Switched Reluctance Motors / P. Lawrenson // IEEE Proc. July 1980. Vol. 127. № 24.
- Кузнецов В.А., Кузьмичев В.А. Вентильно-индукторные двигатели. М.: Изд-во МЭИ, 2003. 70 с.
- Пат. 2658636 Российская Федерация. Индукторный генератор с совмещенными обмотками возбуждения и статора / В.А. Коровин; заявитель и патентообладатель ООО «Научно-производственное предприятие «Резонанс». 2017130438; заявл. 28.08.2017; опубл. 22.06.2018 Бюл. № 18.
- Пат. 2702615 Российская Федерация. Индукторный генератор с совмещенными обмотками возбуждения и статора / А.Д. Чернышев, В.А. Коровин; заявитель и патентообладатель ООО «Научно-производственное предприятие «Резонанс». – 2019100979; заявл. 10.01.2019; опубл. 09.10.2019.
- Сергеев Ю.С., Сандалов В.М., Карпов Г.Е. Моделирование вентильно-индукторного электропривода // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2017. №4. С. 90–98.
- Воронин С.Г., Петрищев С.А., Сергеев Ю.С. Моделирование электромагнитных процессов в электромеханических преобразователях энергии с использованием программно-вычислительного комплекса ANSYS Workbench // Математическое моделирование и краевые задачи: труды Седьмой Всероссийской научной конференции с международным участием. Ч. 4: Информационные технологии в математическом моделировании. Самара: СамГТУ, 2010. С. 174–176.

22. Расчет электромагнитных полей с помощью программного комплекса ANSYS / С.В. Вишняков, Н.М. Гордюхина, Е.М. Федорова и др.; под ред. проф. Ю.А. Казанцева. М: Изд-во МЭИ, 2003. 62 с.
23. Борзунова Т.Л., Розниченко Г.Ю. Информационные технологии в математическом моделировании // «Математика. Компьютер. Образование»: сб. трудов XII международной конференции. Т.1. Ижевск: Научно-издательский центр «Регулярная и хаотическая динамика», 2005. С. 277–288.
24. Сергеев Ю.С. Приводы вибрационных машин на базе вентильных индукторных двигателей: дис.... канд. техн. наук : 05.09.03. Челябинск, 2011. 173 с.
25. Сергеев Ю.С., Карпов Г.Е., Кононистов А.В. Разработка микропроцессорной системы управления вентильно-индукторными электровиброприводами // Наука ЮУрГУ: материалы 68-й научной конференции. Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ, 2016. С. 950–954.

Поступила в редакцию 24 ноября 2019 г.

INFORMATION IN ENGLISH

MODELING OF SWITCH RELUCTANCE GENERATOR WITH CAPACITOR EXCITATION

Sergey G. Voronin

D.Sc. (Engineering), Professor, Department of Aeronautical Engineering, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia. E-mail: voroninsg@susu.ru

Aleksey D. Chernyshev

Engineer, Electric Drive Design Department, Rezonans plc., Chelyabinsk, Russia. E-mail: ad.chernyshev@icloud.com

The switch reluctance generator is one of the types of electric machines for autonomous power plants. The creation of a switch reluctance generator with a new method of excitation and switching phase winding in natural mode is the result of the study of electromagnetic processes of the switch reluctance generator. The new principle of exciting phase windings is based on the operating features of such electrical machines. One of them is the trapezoidal form of phase voltages. That is, this technical solution eliminates the need for tracking and switching phase currents depending on the position of the rotor. The winding is excited by switching capacitors of the idle phase. This can greatly simplify and reduce the cost of electronic control equipment of the switch reluctance generator. Due to the novelty of the design, neither foreign nor domestic scientists have ever investigated the considered technical solution. This article presents a mathematical model of a valve-inductor generator with capacitor excitation and thyristor control of the excitation current. The regulation of the excitation current is carried out by changing the ratio between the half-periods of the current transmitted by the thyristors and half-periods of the voltage applied to them. The mathematical model is created in a dynamic combination of ANSYS Maxwell and ANSYS Simplorer. The authors conducted an interdisciplinary calculation. The calculation results are given in the article in the form of time dependences of currents and EMF of windings and capacitors of excitation. As a result of the research, an experimental sample of a switch reluctance generator with capacitor excitation and microprocessor control was designed and manufactured at the enterprise NPP Resonance LLC. The oscillograms recorded on the test bench to a large extent coincide with the calculated dependences of currents and voltages, which confirms the adequacy of the model.

Keywords: autonomous power plant, switch reluctance generator, computer model, finite element model, electric machine, electric current, EMF.

REFERENCES

1. Vinogradov K.M. Avtonomnaya energeticheskaya ustanovka s sinkhronnoy reaktivnoy mashinoy nezavisimogo vzbuzhdeniya. Kand. diss. [Autonomous Power Plant with A Synchronous Reactive Independent Excitation Machine. Ph.D. diss.]. Chelyabinsk, 2006, 173 p.
2. Chernyshev A.D. Mechanical Characteristics Estimation of the Traction Motor Electric Transmission of a Vehicle. Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Mashinostroenie [Bulletin of South Ural State University. Series: Power Engineering], 2018, no. 1, pp. 5–16. (In Russian)
3. Lashkevich M.M. Razrabotka sistemy upravleniya dlya elektrottransmissii s tyagovymi ventil'no-induktornymi dvigatelyami. Kand. diss. [Development of a control system for electric transmissions with traction switch reluctance motors. Ph.D. diss.]. Moscow, 2013, 175 p.
4. Grebennikov N.V. Dinamika i energoeffektivnost perspektivnykh edinit podvizhnogo sostava, osnashchaemykh ventil'no-induktornymi elektricheskimi mashinami. Kand. diss. [Dynamics and energy efficiency of promising rolling stock units equipped with switch reluctance machines. Ph.D. diss.]. Rostov-na-Donu, 2012, 148 p.
5. Korovin V.A., Chernyshev A.D. Innovative electromechanical transmission with improved safety and efficiency. Vtoraya nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Razrabotka i ispolzovanie elektricheskikh transmissiy dlya obrazov voruzheniya i voennoy tekhniki». [The second scientific-practical conference "Development and use of electric transmissions for arms and military equipment images"]. 2018, Saint-Petersburg. (in Russian)
6. Chernyshev A.D. Electromechanical transmission ISOBUS control system of agricultural equipment. Konferentsiya – soveshchanie «Universalnye sistemy upravleniya i monitoringa dlya tekhniki selskokhozyaystvennogo naznacheniya (ISOBUS)». [Conference - meeting "Universal control and monitoring systems for agricultural machinery (ISOBUS)"]. 2018. Moscow. (in Russian)
7. Gollandtsev Yu.A. Comparison of Mechanical Characteristics of Asynchronous and Switched Reluctance Motors. Informatsionno-upravliaiushchie sistemy [Management Information Systems], 2006, no. 6, pp. 50–53. (In Russian)
8. Gollandtsev Yu.A. Ventilnye Induktorno-Reaktivnye Dvigateli [Switch Reluctance Motors]. St. Petersburg, 2003, 148 p. (In Russian)
9. Weh. H. On the Development of Inverter Fed Reluctance Machines for High Power Densities and High Output. Electrical Machines Institute of the Technical University of Braunschweig, 1984, no. 6, pp. 135–144.
10. Matsuo T. Rotor Design Optimization of Synchronous Reluctance Machine. IEEE Transaction on Energy Conversion, 1994, no. 22, pp. 359–365.
11. Zharkov A.A. Razrabotka i issledovanie ventilnogo induktornogo elektroprivoda s nezavisimym vzbuzhdeniem i mikro-kontrollernym upravleniem. Kand. Diss. [Development and research of a switch reluctance electric drive with independent excitation and micro-controller control. Ph.D. diss.]. Moscow, 2008, 150 p.

12. Kazachenko V.F., Ostirov V.N., Rusakov A.M., Drozdov A.V. A new direction in the electric drive – a powerful multi-section switch reluctance electric drive with vector control. *Elektronnye komponenty* [Electronic Components], 2006, no. 11, pp. 30–35. (In Russian)
13. Fisenko V.G., Popov A.N. *Proektirovanie Ventilnykh Induktornykh Dvigately* [Design of Switch Reluctance Motors]. Moscow, MEI Publ., 2005, 56 p. (In Russian)
14. Gollandtsev Yu.A. *Ventilnye Induktorno-Reaktivnye Dvigateli Pretsizionnykh Sledyashchikh Sistem Elektroprivoda*. D.Sc. Diss. [Switch Reluctance Motors of precision servo systems of electric drive. D.Sc. Diss.]. St. Petersburg, 2004, 299 p.
15. Miller, T.J.E. *Switched Reluctance motor and their Control*. – Magna Physics Publishing and Clarendon Oxford Press, 1993, 203 p.
16. Lawrenson P. Variable-Speed Switched Reluctance Motors. *IEEE Proc*, July 1980, vol. 127, no. 24.
17. Kuznetsov V.A., Kuzmichev V.A. *Ventilno-induktornye dvigateli* [Switch Reluctance Motors]. Moscow, MEI Publ., 2003, 70 p. (In Russian)
18. Korovin V.A. *Induktornyy Generator S Sovmeshchennymi Obmotkami Vozbuzhdeniya I Statora* [Inductor Generator with Combined Field Windings And Stator]. Patent RF, no. 2658636, 2018.
19. Korovin V.A., Chernyshev A.D. *Induktornyy Generator S Sovmeshchennymi Obmotkami Vozbuzhdeniya I Statora* [Inductor Generator with Combined Field Windings And Stator]. Patent RF, no. 2702615, 2019.
20. Sergeev Yu.S., Sandalov V.M., Karpov G.E. Modeling of Switched Reluctance Electric Vibration Drive. *Vestnik Yu-zhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika* [Bulletin of South Ural State University, Series Power Engineering], 2017, no. 4, pp. 90–98. (In Russian)
21. Voronin S.G., Petrishchev S.A., Sergeev Yu.S. Simulation of Electromagnetic Processes in Electromechanical Energy Converters Using ANSYS Workbench Programming and Computing Suite. *Sedmaya vserossiyskaya nauchnaya konferentsiya: Matematicheskoe modelirovanie i kraevye zadachi*. [Seventh All-Russia Scientific Conference: Mathematical modeling and boundary problems], Samara, 2010. (In Russian)
22. Vishnyakov S.V., Gordyukhina N.M., Fedorova E.M. *Raschet elektromagnitnykh poley s pomoshchyu programmnogo kompleksa ANSYS* [Calculation of Electromagnetic Fields Using ANSYS Software Package]. Moscow, MEI Publ., 2003, 62 p. (In Russian)
23. Borzunova T.L., Roznichenko G.Yu. Information Technology in Mathematical Simulation. *XII mezhdunarodnaya konferentsiya: Matematika. Kompyuter. Obrazovanie*. [XII International Conference: Mathematics. Computer. Education], Izhevsk, 2005. (In Russian)
24. Sergeev Yu.A. *Privody vibratsionnykh mashin na baze ventilnykh induktornykh dvigateley*. Kand. diss. [Drives of Vibrating Machines Based on Switch Reluctance Motors. Ph.D. Diss.]. Chelyabinsk, 2011, 173 p. (In Russian)
25. Sergeev Yu.S., Karpov G.E., Kononistov A.V. Development of a Microprocessor Control System for a Valve Inductor Electric Vibration Motor. *68-ya nauchnaya konferentsiya: Nauka YuUrGU*. [68th Scientific Conference: Science of SUSU], Chelyabinsk, 2016. (In Russian)

Воронин С.Г., Чернышев А.Д. Модель вентильного индукторного генератора с конденсаторным возбуждением // *Электротехнические системы и комплексы*. 2020. № 1(46). С. 4-12. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-1\(46\)-4-12](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-1(46)-4-12)

Voronin S.G., Chernyshev A.D. Modeling of Switch Reluctance Generator with Capacitor Excitation. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2020, no. 1(46), pp. 4-12. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-1\(46\)-4-12](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-1(46)-4-12)

Аминов Д.С.

Южно-Уральский государственный университет (НИУ)

ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ANSYS ELECTRONICS DESKTOP ДЛЯ АНАЛИЗА ВОДОПОГРУЖНОГО ГИДРОГЕНЕРАТОРА КОМБИНИРОВАННОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

В статье анализируется энергетический потенциал малых рек России и ближнего зарубежья. Сделан вывод о том, что энергоемкость малых рек во много раз превышает этот показатель для крупных рек. Это дает основание для развития этой отрасли энергетики. Однако развитие малой гидроэнергетики сдерживается рядом проблем. Это – требования экологии, необходимость больших финансовых затрат на создание малых ГЭС, получение качественной электроэнергии при сезонных колебаниях расхода воды. Для преодоления этих противоречий предлагается разработать гибкую систему проектирования, которая позволяла бы рассчитывать гидрогенераторы для конкретной реки в выбранном заранее месте. При этом можно получить наиболее эффективное преобразование энергии реки в электрическую энергию. Среди большого количества типов генераторов в качестве гидрогенератора малой и средней мощности предлагается применить генератор оригинальной конструкции. Рассматриваемая электрическая машина представляет собой генератор погружного типа с комбинированным возбуждением. Результирующее магнитное поле генератора образуется от двух источников – постоянных магнитов и обмотки возбуждения. При этом гидрогенератор имеет небольшие размеры благодаря использованию мощных постоянных магнитов и обмотку возбуждения для регулирования магнитного потока. В результате появляется возможность регулировки магнитного потока по слаботочной цепи возбуждения. Это упрощает электронную систему управления генератора, делает ее малогабаритной и надежной. Генератор имеет сложную магнитную систему, поэтому для электромагнитного анализа используется программа точного расчета электромагнитного поля на основе метода конечных элементов Ansys Electronics Desktop. Задача усложняется тем, что предлагаемая конструкция не входит в базу типовых конструкций. Возникла необходимость разработки трехмерной модели на базе заложенных в программу примитивов. Были смоделированы выпрямитель и регулятор напряжения в редакторе электронных схем Citrix. Характеристики генератора исследовались совместно с работой электронных компонентов. Разработанная цифровая модель генератора показала хорошую сходимость с реальным генератором по основным параметрам и характеристикам. Представлены результаты исследования.

Ключевые слова: альтернативная энергетика, гидрогенератор, генератор комбинированного возбуждения, обращенная конструкция, бесконтактный токоподвод, цифровой двойник.

ВВЕДЕНИЕ

На протяжении всей истории человечество постоянно использовало энергию природы. Еще древние греки применяли механическую энергию рек для мукомольного производства. На демидовских заводах эту энергию использовали в металлургическом производстве для приведения в действие мехов. Уже к концу 19-го века, тысячи городов по всему миру располагались рядом с гидроэлектростанциями.

Важнейшие проблемы проектирования и строительства гидроэнергетических объектов и гидроузлов народного народнохозяйственного значения были впервые поставлены в нашей стране и успешно решены в процессе разработки и реализации плана ГОЭЛРО.

В настоящее время получение энергии из водных ресурсов принимает новые пути развития. С одной стороны, это восстановление старых гидроузлов на основе новейших технологий, с другой – это построение новых гидроэлектростанций в местах, где они могут быть наиболее эффективными.

На территории России и стран СНГ огромное количество малых и средних рек, на которых по тем или иным причинам не установлены гидроэлектростанции. Возведение ГЭС – трудоемкий и сложный процесс, который вмешивается в природу.

Можно выделить следующие факторы, сдерживающие установку гидроэлектростанций на малых и средних реках:

1. Некоторые реки относятся к различным охраняемым территориям. Это значительно усложняет создание

гидроэлектростанций, что связано со сбором необходимой документации и соблюдением законодательных норм.

2. Реки имеют малые скорости течения, которые не позволяют раскрутить тяжелые лопасти крупных гидрогенераторов.

3. Не все реки имеют бассейны, которые необходимы для создания на их основе гидроэлектростанций.

4. Многие реки являются горными и доставить туда необходимое оборудование и технику крайне сложно.

5. Сами по себе реки достаточно мелководны и не позволяют поставить машины больших размеров.

Тем не менее энергетический потенциал малых и средних рек во много раз превосходит этот показатель для крупных рек.

КРАТКИЙ ОБЗОР МАЛЫХ РЕК

На основании открытых источников проведем краткий анализ энергетических возможностей малых и средних рек (**табл. 1**).

Анализ энергоемкости водных ресурсов малых и средних рек показывает, что их энергетический потенциал достаточно высок [1-4]. Его использование может быть экономически выгодным, но для этого необходима разработка специальных гидрогенераторов, которые учитывают особенности водных ресурсов. Эти генераторы должны иметь конструкцию, габаритные размеры и основные характеристики применительно к конкретному месту их использования в реке. Только в этом случае можно достичь высокой эффективности использования энергии водяного потока.

Таблица 1

Характеристики малых и средних рек

Название реки	Длина, км	Площадь бассейна, тыс. км ²	Средний годовой расход, м ³ /с
<i>Река Теберда</i> на Северном Кавказе в Карачаево-Черкесии, левый приток реки Кубань	60	1080	7,3
<i>Река Большой Зеленчук</i> в районе Северного Кавказа	158	2730	40
<i>Река Анчас</i> , образуется на северо-восточных склонах хребта Котх, севернее Большого Кавказа	120	550	19
<i>Река Битюг</i> , протекает в Тамбовской, Липецкой и Воронежской областях, левый приток Дона	379	8840	18,2
<i>Река Усмань</i> , приток реки Воронеж. Протекает по Воронежский и Липецкой областям. В нижнем течении называется Усманка	151	2840	1,99
<i>Река Воронеж</i> , левый приток Дона. Протекает по территории Тамбовской, Липецкой и Воронежской областей	520	342	70,8
<i>Река Олым</i> , протекает в Курской области, частично проходит по границе с Воронежской и Липецкой областями, частично проходит по границе с Орловской областью	151	3090	6,5
<i>Река Вопь</i> , находится в Смоленской области, правый приток Днепра. Истоки находятся в болотах Смоленской возвышенности	158	3300	22
<i>Река Чир</i> , расположена в Ростовской и Волгоградской областях. Это правый приток Дона, впадает в Цимлянское водохранилище	317	9580	12
<i>Река Снов</i> , протекает по Брянской области России и Черниговской области Украины	253	8705	24
<i>Река Шостка</i> , протекает по территории Глуховского, Ямпольского и Шосткинского районов Сумской области Украины	56	412	360
<i>Река Теберда</i> на Северном Кавказе в Карачаево-Черкесии, левый приток реки Кубань	60	1080	7,3

ВЫБОР ТИПА ГИДРОГЕНЕРАТОРА

Требования высокой надежности заставляют рассматривать только бесконтактные конструкции синхронных генераторов [5-12].

Одним из таких вариантов является синхронный генератор с постоянными магнитами. Он имеет ряд преимуществ. Среди них высокая надежность, хорошие массоэнергетические показатели, максимально возможный КПД. Но для такого типа машин стабилизацию выходного напряжения можно осуществить только по якорной цепи, так как невозможно регулировать магнитный поток постоянного магнита. Это значительно усложняет систему управления генератором и увеличивает общие габариты.

Существует класс машин с комбинированным возбуждением. В качестве источника магнитного поля он имеет постоянный магнит и обмотку возбуждения.

Этот тип электрических машин имеет следующие преимущества:

- высокую надежность;
- хорошие массоэнергетические показатели;
- максимально возможный КПД;
- мощные высококоэрцитивные магниты позволяют уменьшить габариты генератора;
- обмотка возбуждения позволяет управлять магнитным потоком по слаботочной цепи, что существенно упрощает систему управления.

Большинство известных бесконтактных электрических машин комбинированного возбуждения имеют дополнительный паразитный зазор. Этот зазор приводит к увеличению объема обмотки возбуждения и электрической машины в целом.

В статье рассматривается конструкция синхронного генератора комбинированного возбуждения, которая не имеет этого недостатка. Конструкция и принцип действия предлагаемого генератора представлены на рис. 1.

Магнитная система предлагаемого генератора имеет сложную геометрию, поэтому для ее расчета используется программный комплекс Ansys Electronics Desktop, в основе которой лежит метод конечных элементов [13-22].

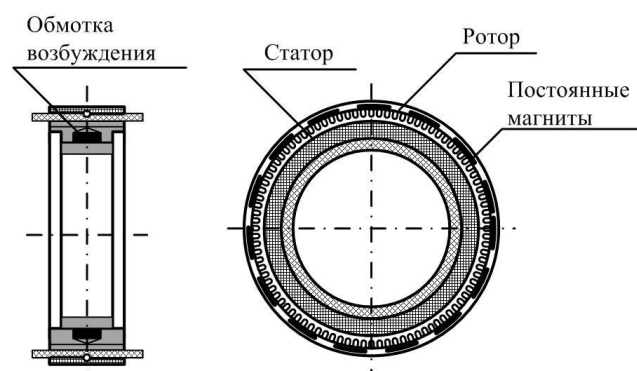


Рис. 1. Эскиз комбинированного генератора возбуждения

АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ И ХАРАКТЕРИСТИКИ С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММНОГО ПАКЕТА ANSYS ELECTRONICS DESKTOP

Для моделирования был выбран генератор комбинированного возбуждения с параметрами: номинальная мощность 3000 Вт, номинальное фазное напряжение 220 В, номинальная частота вращения 350 об/мин.

Данная конструкция не входит в перечень типовых электрических машин, предлагаемых Ansys Electronics Desktop, поэтому для анализа необходимо создать модель с помощью встроенных в программу инструментов.

В основе технологии Solid modeling, используемой в Maxwell, лежит специальный интегрированный в программу графический редактор, позволяющий создавать модели с использованием вложенных в программу примитивов.

Геометрия генератора не имеет плоской симметрии, поэтому для анализа необходимо создать трехмерную модель (рис. 2).

Для упрощения расчета была использована осевая симметрия генератора, которая позволила определить параметры одного полюсного деления (рис. 3). Полные характеристики определялись умножением результатов на количество составляющих частей.

Для решения задачи программа разбивает модель на большое количество конечных элементов. Для каждого элемента формируется система уравнений для локальной матрицы. Глобальная матрица формируется из локальных матриц для решения полевой задачи. Результаты расчета магнитного поля приведены на рис. 4.

Картина распределения индукции магнитопровода показывает, что магнитная система имеет допустимое насыщение основных участков магнитной цепи.

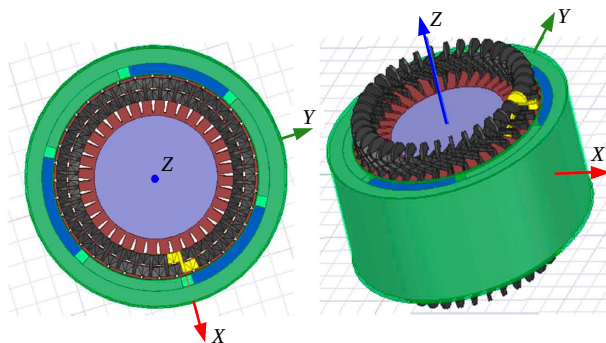


Рис. 2. Результаты создания трехмерной модели

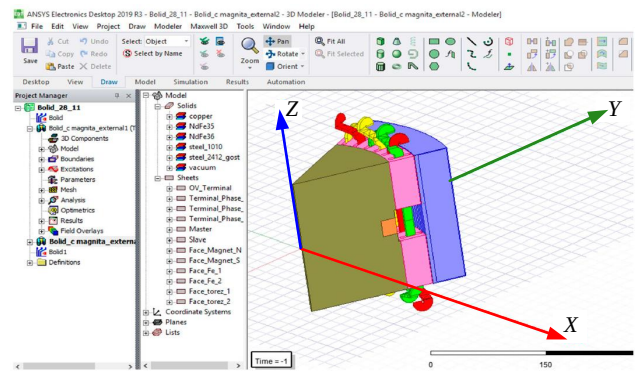


Рис. 3. Модель генератора в Ansys Electronics Desktop

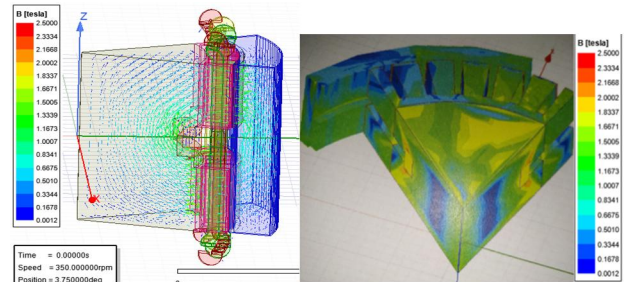


Рис. 4. Результаты расчета магнитного поля

Ansys Electronics Desktop позволяет учитывать влияние электронной системы управления на работу электрической машины. Принципиальная схема строится с использованием программы Maxwell Circuit, которая является приложением программы. На рис. 5 показан трехфазный выпрямитель и регулятор напряжения, который управляет обмоткой возбуждения для стабилизации выходного напряжения генератора. Обмотка возбуждения включена в мостовую схему. Плечами моста являются ключи, порог срабатывания которых определяется диапазоном стабилизации напряжения. При превышении требуемого выходного напряжения в регуляторе открываются ключи, которые подключают обмотку возбуждения на подавление ЭДС от постоянных магнитов. При недостаточном напряжении происходит обратный процесс: подключается пара ключей, которые включают обмотку возбуждения на добавление ЭДС к напряжению, которое генерируют постоянные магниты.

Расчетное значение выпрямленного напряжения (рис. 6) показывает, что обмотка возбуждения достаточно эффективно стабилизирует напряжение в заданном диапазоне.

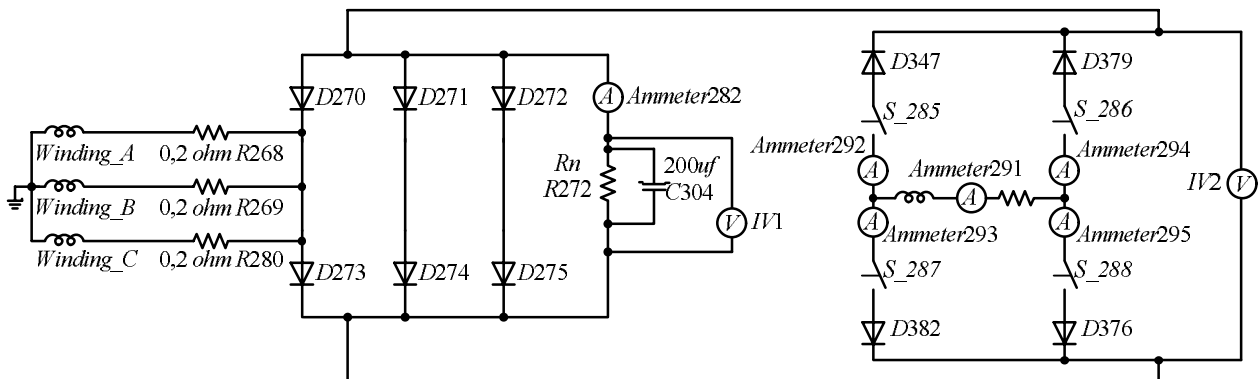


Рис. 5. Электронная схема системы управления

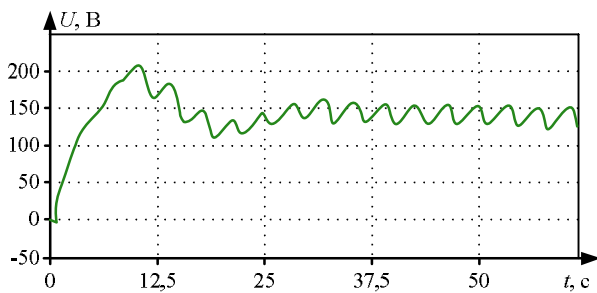


Рис. 6. Зависимости выпрямленного напряжения от времени

На рис. 7 показана кривая мгновенного значения выходной мощности. Среднее значение мощности при этом составляет 3 кВт, что подтверждает соответствие генератора одному из основных параметров – выходной мощности.

Для проверки точности цифровой модели реальному генератору был изготовлен макетный образец и проведены его стендовые испытания. Фрагменты основных сборочных единиц генератора показаны на рис. 8.

По основным параметрам получены следующие расхождения между результатами расчета и тестирования:

- действующее значение ЭДС вращения в фазной обмотке при номинальной частоте вращения 7-9 %;
- среднее значение выпрямленного напряжения при номинальной нагрузке 5-8 %;
- коэффициент полезного действия при номинальной нагрузке 12 %.

Полученные результаты говорят о том, что созданная цифровая модель достаточно точно копирует реальную электрическую машину и может быть использована для системы анализа при проектировании генераторов данного типа.

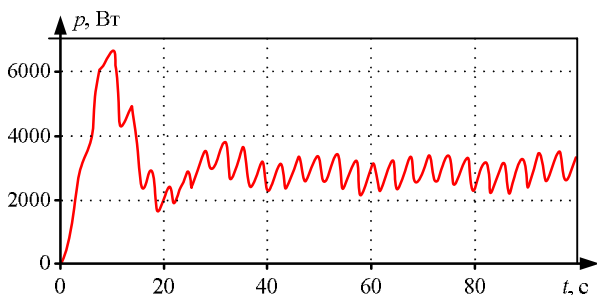


Рис. 7. Кривая мгновенной мощности под нагрузкой



Рис. 8. Основные сборочные единицы генератора комбинированного возбуждения

В статье в качестве гидрогенератора для малых и средних рек предлагается уникальная запатентованная электрическая машина – генератор комбинированного возбуждения обращенной конструкции. Концепция комбинированного возбуждения позволяет уменьшить габаритные размеры машины за счет мощных постоянных магнитов и упростить электронный стабилизатор напряжения за счет регулирования по слаботочной цепи возбуждения. Для проектирования генератора была использована CAD-система Ansys Electronics Desktop. Цифровая модель опробована при разработке макетного образца гидрогенератора 3 кВт. На данном этапе она показала положительные результаты, если в качестве критерия оценки принимать расхождения между расчетными параметрами и экспериментальными данными. Данный подход можно рекомендовать для проектирования генераторов данного типа для ряда мощностей.

Работа выполнена в ЮУрГУ при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект №14-19-00327). Автор благодарит руководство университета за возможность провести данное исследование.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Anastasiya A. and Evgeny N. Timoshenko. "Investigations on Possible Places for Installation of Small Hydro Plants at Municipal Industrial Wastewaters". 14th International Scientific-Technical Conference APEIE – 44894. 2018.
2. Аминов Д.С., Косимов Б.И., Ниматов Р.Р. Использование малых гидроэлектростанций в качестве возобновляемых источников энергии. Приоритетные направления развития энергетики в АПК; Курганская государственная сельскохозяйственная академия им. Т.С. Мальцева. Курган, 22 февраля 2018 г., 2018. С.70-75.
3. R.V. Klyuev; I.I. Bosikov "Research of water-power parameters of small hydropower plants in conditions of mountain territories". 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). 2016
4. Dariusz Borkowski. "Small Hydropower Plant as a Supplier for the Primary Energy Consumer," IEEE International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE). 2015.
5. Балагуров В.А., Галтеев Ф.Ф., Ларионов А.Н. Электрические машины с постоянными магнитами. М.: Энергия, 1964. 480 с.
6. Вольдек А.И. Исследование магнитного поля в воздушном зазоре явнополюсных синхронных машин методом гармонических проводимостей // Электричество. 1966. №7. С. 46–52.
7. Электропривод на базе вентильных индукторных машин с электромагнитным возбуждением / В.Ф. Козаченко, Д.Е. Корпусов // Электронные компоненты. 2005. №6. С. 60-64.
8. Gandzha S., Aminov D. and Kosimov B. «Development of analysis methods for claw-pole synchronous motor of the pilger mill for manufacturing of seamless pipes, 2019, IEEE Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (PEAMI)», 4-5 Oct. 2019, Magnitogorsk, Russia. DOI: 10.1109 / PEAMI.2019.8915343.
9. Голландцев Ю.А. Сравнение механических характеристик асинхронных и вентильных индукторно-реактивных электродвигателей // Информационно-управляющие системы. 2006. №6. С. 50-53.

10. Сравнительный обзор синхронного электродвигателя с постоянными магнитами и бесколлекторного электродвигателя постоянного тока при непосредственном управлении моментом / И.В. Гуляев, А.В. Волков, А.А. Попов, Е.И. Ионова и др. // Научно-технический вестник Поволжья. 2015. № 6. С. 123-128.
11. Опейко О.Ф., Пташкин А.И., Хильмон В.И. Тяговый электропривод с бездатчиковой системой векторного управления // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2010. №6. С. 37-43.
12. Гуляев И.В., Тутаев Г.М. Системы векторного управления электроприводом на основе асинхронизированного вентильного электродвигателя: монография. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2010. С. 200.
13. Gandzha S., Aminov D. and Kosimov B. "Development of Engineering Method for Calculation of Magnetic Systems for Brushless Motors Based on Finite Element Method," International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICOEAM), 25-29 March, Sochi, 2019. DOI: 10.1109/ICIEAM.2019.8742976.
14. Gandzha S., Aminov D. and Kosimov B. "Design of Brushless Electric Machine with Axial Magnetic Flux Based on the Use of Nomograms", 2018, Proceedings - 2018 International Ural Conference on Green Energy, UralCon 2018, 8544320, P. 282-287. DOI: 10.1109/URALCON.2018.8544320.
15. Gandzha S., Aminov D., Kiessh I. and Kosimov B. "Application of Digital Twins Technology for Analysis of Brushless Electric Machines with Axial Magnetic Flux", Proceedings - 2018 Global Smart Industry Conference, GloSIC 2018. DOI: 10.1109/GloSIC.2018.8570132.
16. Gandzha Sergey, Dilshod Aminov and Kiessh Irina. The development of an engineering technique for calculating magnet systems with permanent magnets, 2018, International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM) Chelyabinsk, Russia, 2018. DOI: 10.1109/ICIEAM.2018.8570132.
17. Мартыанов А.С., Неустроев Н.И. Анализ электромеханических систем с помощью ANSYS MAXWELL // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология». 2014. №19. С. 47-52.
18. Kovalev K., Ivanov N., Tulinova E. Magnetic field distribution in the active zone of synchronous generators with electromagnetic excitation, 2017, International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2017. Proceedings 8076353. (In Russ.).
19. Babu B.M., Srinivas L.R. and Bindhu B. A MLI topology with different braking mechanisms employing BLDC drive. IEEE International Conference on Power, Control, Signals and Instrumentation Engineering, ICPCSI. Chennai, India, 2017, pp. 1845-1849. DOI:10.1109/ICPCSI.2017.8392034.
20. Papini L., Raminosoa T., Gerada D. and Gerada C. "A high-speed permanent-magnet machine for fault-tolerant drivetrains", IEEE Trans. Ind. Electron, vol. 61, no. 6, pp. 3071-3080, Jun. 2014. xico. 2003, no. 4, pp. 1677-1681. DOI: 10.1109/PESC.2003.1217709.
21. Gandzha S., Aminov D. and Kosimov B. "Application of the combined Excitation Submersible Hydrogenerator as an Alternative energy source for small and medium rivers. 2019 IEEE Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (PEAMI)", 4-5 Oct. 2019, Magnitogorsk, Russia. DOI: 10.1109/PEAMI.2019.8915294.
22. Ганджа С.А., Аминов Д.С. Разработка водопогружного гидрогенератора в качестве возобновляемого источника электроэнергии малых рек // Материалы десятой научной конференции аспирантов и докторантов ЮУрГУ. Челябинск, 2018. С.82-86.

Поступила в редакцию 03 декабря 2019 г.

INFORMATION IN ENGLISH

APPLICATION OF ANSYS ELECTRONICS DESKTOP SOFTWARE FOR ANALYSIS OF COMBINED EXCITATION WATER SUBMERSIBLE HYDROGENERATOR

Dilshod S. Aminov

Post Graduate Student, the Department of Theoretical Fundamentals of Electrical Engineering, South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia. E-mail: dilshod-aminov-93@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8712-8063>.

The article analyzes the energy potential of small rivers of Russia and neighboring countries. It is concluded that the energy consumption of small rivers is many times higher than that of large rivers. This provides a basis for the development of this energy sector. However, the development of small hydropower is constrained by a number of problems. These are environmental requirements, the need for large financial costs for the creation of small hydroelectric power plants, obtaining high-quality electricity with seasonal fluctuations in water consumption. To overcome these contradictions, it is proposed to develop a flexible design system that would make it possible to calculate hydro generators for a particular river in a pre-selected location. At the same time, it is possible to obtain the most efficient conversion of river energy into electrical energy. Among a large number of types of generators as a hydrogenerator of small and medium power, it is proposed to use a generator of the original design. The electric machine in question is a submersible type generator with combined excitation. The resulting magnetic field of the generator is formed from two sources: permanent magnets and the excitation winding. At the same time, the hydrogenerator has a small size, thanks to the use of powerful permanent magnets

and a winding for regulating the magnetic flux. As a result, it is possible to adjust the magnetic flux through a low-current excitation circuit. This simplifies the electronic control system of the generator making it small and reliable. The generator has a complex magnetic system, so for electromagnetic analysis, an accurate electromagnetic field calculation program based on the finite element method Ansys Electronics Desktop is used. The task is complicated by the fact that the proposed design is not included in the database of standard designs. There was a need to develop a three-dimensional model based on the primitives embedded in the program. The rectifier and voltage regulator were modeled in the Citrix electronic circuit editor. The characteristics of the generator were studied together with the operation of electronic components. The developed digital model of the generator showed good convergence with the real generator on the main parameters and characteristics. The results of the study are presented.

Keywords: alternative energy, hydrogenerator, combined excitation generator, reversed design, contactless current supply, digital double.

REFERENCES

- Anastasiya A. and Evgeny N. Timoshenko. "Investigations on Possible Places for Installation of Small Hydro Plants at Municipal Industrial Wastewaters". 14th International Scientific-Technical Conference APEIE – 44894. 2018.
- Aminov D.S., Kosimov B.I., Nimatov R.R. The use of small hydropower plants as renewable energy sources. *Prioritetnye napravleniya razvitiya energetiki v APK Kurgan, 22 fevralya 2018 g* [Priority areas of energy development in the agro-industrial complex Kurgan, February 22, 2018]. Kurgan State Agricultural Academy named after T.S. Maltseva, 2018, pp.70-75. (In Russian)
- Klyuev R.V., Bosikov I.I. "Research of water-power parameters of small hydropower plants in conditions of mountain territories". 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 2016.
- Dariusz Borkowski. "Small Hydropower Plant as a Supplier for the Primary Energy Consumer," IEEE International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE). 2015.
- Balagurov V. A., Galteev F. F., Larionov A. N. *Elektricheskie mashiny s postoyannymi magnitami* [Electric machine with permanent magnets]. Moscow: Energia, 1964. 480 p. (In Russian)
- Voldek A. I. Investigation of magnetic field in the air gap of single-pole synchronous machines by the method of harmonic conductivities. *Elektrichestvo* [Electricity], 1966, no. 7, pp. 46-52. (In Russian)
- Kozachenko V. F., Korpusev D. E. Electric drive on the basis of valve inductor machines with electromagnetic excitation. *Elektronnye komponenty* [Electronic components], 2005, no. 6, pp. 60-64. (In Russian)
- Gandzha S., Aminov D. and Kosimov B. Development of analysis methods for claw-pole synchronous motor of the pilger mill for manufacturing of seamless pipes, 2019, IEEE Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (PEAMI), 4-5 Oct. 2019, Magnitogorsk, Russia. DOI: 10.1109 / PEAMI.2019.8915343.
- Gollandsev Yu.A. Comparison of mechanical characteristics of asynchronous and thyatron inductor-jet motors. *Informatsionno-upravlyayuschie sistemy* [Information and control systems], 2006, no. 6, pp. 50-53. (In Russian)
- Gulyaev I.V., Volkov A.V., Popov A. A., Ionova E. I. et al. Comparative review of synchronous electric motor with permanent magnets and brushless DC electric motor with direct torque control. *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik Povolzhya* [Scientific and technical Bulletin of the Volga region], 2015, no. 6, pp. 123-128. (In Russian)
- Opeyko O.F., Ptashkin A.I., Hilmon V.I. Traction electric drive with Sensorless vector control system. *Energetika. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy i energeticheskikh ob'yedineniy SNG* [Power Engineering. Proceedings of higher educational institutions and energy associations of the CIS], 2010, no. 6, pp. 37-43. (In Russian)
- Gulyaev I.V., Tutaev G.M. *Sistemy vektornogo upravleniya elektroprivodom na osnove asinkhronizirovannogo ventilnogo elektrodvigatelya: monografiya* [Systems of vector control of the electric drive on the basis of the asynchronous gate electric motor]. Saransk: Publishing house Mordovia universiti, 2010, 200 p.
- Gandzha S., Aminov D. and Kosimov B. "Development of Engineering Method for Calculation of Magnetic Systems for Brushless Motors Based on Finite Element Method," International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICOEAM), 25-29 March, Sochi, 2019. DOI: 10.1109/ICOEAM.2019.8742976.
- Gandzha S., Aminov D. and Kosimov B., "Design of Brushless Electric Machine with Axial Magnetic Flux Based on the Use of Nomograms", 2018, Proceedings - 2018 International Ural Conference on Green Energy, UralCon 2018 , 8544320, pp. 282-287 DOI: 10.1109/URALCON.2018.8544320.
- S. Gandzha, D. Aminov, I. Kiessh and B. Kosimov, "Application of Digital Twins Technology for Analysis of Brushless Electric Machines with Axial Magnetic Flux", Proceedings - 2018 Global Smart Industry Conference, GloSIC 2018, DOI: 10.1109/GloSIC.2018.8570132.
- Gandzha Sergey, Dilshod Aminov and Kiessh Irina. The development of an engineering technique for calculating magnet systems with permanent magnets 2018 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Chelyabinsk, Russia 2018. DOI: 10.1109/GloSIC.2018.8570132.
- Martyanov A.S., Neustroev N.I. Analysis of Electromechanical systems using ANSYS MAXWELL. *Mezhdunarodnyi nauchnyi zhurnal Alternativnaya energetika i ekologiya* [International scientific journal Alternative energy and ecology], 2014, no. 19, pp. 47-52. (In Russian)
- Kovalev K., Ivanov N., Tulinova E. Magnetic field distribution in the active zone of synchronous generators with electromagnetic excitation 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2017 – Proceedings 8076353. (In Russian).
- Babu B.M., Srinivas L.R. and Bindhu B. A MLI topology with different braking mechanisms employing BLDC drive. IEEE International Conference on Power, Control, Signals and Instrumentation Engineering, ICPCSI. Chennai, India, 2017, pp. 1845-1849. DOI:10.1109/ICPCSI.2017.8392034.
- Papini L., Raminosa T., Gerada D. and Gerada C. "A high-speed permanent-magnet machine for fault-tolerant drivetrains", IEEE Trans. Ind. Electron, vol. 61, no. 6, pp. 3071-3080, Jun. 2014.
- Xico, 2003, no. 4, pp. 1677-1681. DOI: 10.1109/PESC.2003.1217709.
- Gandzha S., Aminov D. and Kosimov B. "Application of the combined Excitation Submersible Hydrogenerator as an Alternative energy source for small and medium rivers. 2019 IEEE Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (PEAMI)", 4-5 Oct. 2019, Magnitogorsk, Russia. DOI: 10.1109/PEAMI.2019.8915294.
- Gandzha S.A., Aminov D.S. Development of water-submersible hydrogenerator as a renewable source of electricity of small rivers. *Materialy desyatoy nauchnoy konferentsii aspirantov i doktorantov YurGu*. [Proceedings of the tenth scientific conference of postgraduates and doctoral students of SUSU]. Chelyabinsk, 2018, pp. 82-86. (In Russian)

Аминов Д.С. Применение программного комплекса Ansys Electronics Desktop для анализа водопогружного гидрогенератора комбинированного возбуждения // Электротехнические системы и комплексы. 2020. № 1(46). С. 13-18. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-1\(46\)-13-18](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-1(46)-13-18)

Aminov D.S. Application of Ansys Electronics Desktop Software for Analysis of Combined Excitation Water Submersible Hydrogenerator. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2020, no. 1(46), pp. 13-18. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-1\(46\)-13-18](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-1(46)-13-18)

Исмагилов Ф.Р., Герасин А.А., Вавилов В.Е., Зиннатуллина Г.С.

Уфимский государственный авиационный технический университет

ВЫСОКООБОРОТНЫЙ СИНХРОННЫЙ СТАРТЕР-ГЕНЕРАТОР ДЛЯ БЕЗРЕДУКТОРНЫХ ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ СИЛОВЫХ УСТАНОВОК

Фундаментальные исследования основополагающих процессов в высоконадежных электромеханических преобразователях энергии для авиакосмической отрасли с целью поиска новых физических принципов для обеспечения максимальной отказоустойчивости и энергоэффективности в настоящее время являются актуальной задачей. Вследствие чего требуется решение научной проблемы в области повышения надежности, энергоэффективности и отказоустойчивости электромеханических преобразователей энергии путем исследования основополагающих процессов в высоконадежных электромеханических преобразователях энергии с целью поиска новых физических принципов для обеспечения максимальной отказоустойчивости и энергоэффективности. Необходимо создание теоретической базы знаний для перехода к технологическому освоению высоконадежных электромеханических преобразователей энергии для авиакосмической отрасли. В данной работе представлены расчеты основных параметров высокооборотного синхронного стартер-генератора мощностью 90 кВт и частотой вращения 65000 об/мин для безредукторных вспомогательных силовых установок. Приведена двухмерная модель высокооборотного синхронного стартер-генератора в генераторном и стартерном режимах. Приведены формулы для расчета мощности высокооборотного стартер-генератора в стартерном режиме. Проанализированы характеристики высокооборотного синхронного стартер-генератора в генераторном и стартерном режимах.

Ключевые слова: установка, синхронный стартер-генератор, моделирование, компьютерное моделирование, Ansys Maxwell, программный комплекс, двухмерная компьютерная модель, исследование высокооборотного синхронного стартер-генератора.

ВВЕДЕНИЕ

Разработки в области создания безредукторных вспомогательных силовых установок (ВСУ) на сегодняшний день являются весьма актуальной задачей. Однако согласно [1] УАП «Гидравлика» впервые продемонстрирована модель новой вспомогательной силовой установки (ВСУ-120) с безредукторной схемой для перспективного ряда летательных аппаратов. Новая установка обеспечила рациональное использование энергетических возможностей самолета, повышение его мощности, эксплуатационных характеристик и снижения массы оборудования на 20%. Создание новой ВСУ-120 с безредукторной схемой решило проблему импортозамещения и обеспечило появление на рынке изделия нового поколения.

Для обеспечения эффективной работы электромеханических преобразователей энергии (ЭМПЭ), применяемых в авиакосмической отрасли, необходимы разработки новых подходов и способов к обеспечению отказоустойчивости, энергоэффективности и минимальным массогабаритным показателям. Согласно [2] показана возможность создания высоковольтного высокооборотного генератора мощностью 230 кВт и массой 30 кг. Определен проектный облик высокооборотного (частота вращения 50000-70000 об/мин) высоковольтного генератора (выходное линейное напряжение 4 кВ) мощностью 230 кВт с максимальным КПД и минимальными массогабаритными показателями, а также проведены его электромагнитные расчеты и экспериментальные исследования.

В работе [3] представлено аналитическое решение для прогнозирования распределения магнитного поля и характеристик синхронного генератора с высоко-

скоростным постоянным магнитом мощностью 2 кВт. Для анализа распределения магнитного поля применяется теорема о соотношении электромагнитных передаточных. А характеристики получены путем решения уравнения эквивалентной схемы машины с постоянными магнитами для переменной активной нагрузки и рабочей скорости. Аналитические результаты подтверждаются сравнением с нелинейным анализом конечных элементов (FEM) и экспериментальными результатами.

С учетом рассмотренных расчетных параметров различных ЭМПЭ для авиакосмической отрасли, для обеспечения повышенной надежности и меньших массогабаритных показателей требуется разработка и проектирование высокооборотного стартер-генератора для безредукторной ВСУ. Высокооборотный стартер-генератор необходим для обеспечения запуска маршевого двигателя летательного аппарата в режиме стартера, а в режиме генератора – для выработки электроэнергии для питания электрических систем летательного аппарата.

Поэтому целью данной работы является разработка, производство расчетов основных параметров и анализ характеристик высокооборотного синхронного стартер-генератора мощностью 90 кВт и частотой вращения 65000 об/мин методом компьютерного моделирования.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ВЫСОКООБОРОТНОГО СИНХРОННОГО СТАРТЕР-ГЕНЕРАТОРА В РАЗДЕЛЕ RMXPRТ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ANSYS MAXWELL

Для получения расчетных параметров высокооборотного синхронного стартер-генератора, опираясь на работы [4-9], производится его расчет в разделе RMXprt программного комплекса Ansys Maxwell. Основные данные для расчета представлены в **табл. 1**.

Таблица 1
Геометрические размеры и параметры высокооборотного синхронного стартер-генератора

Наименование параметра/геометрического размера	Единицы измерения	Величина
1. Частота вращения	об/мин	65000
2. Мощность на валу	кВт	90
3. Количество фаз	-	3
4. Напряжение	В	(200±10)
5. Частота	Гц	(400±20)
6. Количество пазов статора	-	24
7. Число полюсов	-	4
8. Внешний диаметр статора	мм	118
9. Внутренний диаметр статора	мм	71
10. Внешний диаметр ротора	мм	59
11. Внутренний диаметр ротора	мм	30
12. Длина статора	мм	150
13. Длина ротора	мм	150
14. Толщина постоянных магнитов	мм	8,8
15. Воздушный зазор	мм	6

Результаты расчетов представлены в **табл. 2**.

Таблица 2
Результаты расчетов высокооборотного синхронного стартер-генератора в разделе RMXprt программного комплекса Ansys Maxwell

Наименование параметра/геометрического размера	Единицы измерения	Величина
Общие сведения		
1. Номинальная выходная мощность	кВт	90
2. Номинальный коэффициент мощности	-	0,85
3. Тип коэффициента мощности	-	индуктивный
4. Номинальное напряжение	В	200
5. Число полюсов	-	4
6. Частота	-	2166,67
7. Положение ротора	-	внутреннее
8. Рабочая температура	°C	140
Данные по статору		
9. Количество пазов статора	-	24
10. Внешний диаметр статора	мм	118
11. Внутренний диаметр статора	мм	71
12. Ширина паза B_{S2}	мм	9,22
13. Высота паза H_{S2}	мм	13
14. Высота шлица H_{S0}	мм	1
15. Ширина шлица B_{S0}	мм	4

16. Верхняя ширина зубца	мм	4
17. Нижняя ширина зубца	мм	4
18. Коэффициент укладки сердечника статора	-	0,92
19. Длина статора	мм	150
20. Тип стали	-	2421
21. Расчетная толщина клина	мм	0,72
22. Количество параллельных ветвей	-	1
23. Количество проводников в пазу	-	2
24. Средний шаг катушки	-	5
25. Количество жил в проводнике	-	841
26. Диаметр провода	мм	0,2
27. Площадь паза	мм ²	130,288
28. Конечная площадь паза	мм ²	122,434
29. Ограниченный коэффициент заполнения паза	%	55
30. Коэффициент заполнения паза статора	%	54,952
31. Длина полуоборота катушки	мм	235,668

Данные по ротору

32. Минимальный воздушный зазор	мм	6
33. Длина ротора	мм	150
34. Внешний диаметр ротора	мм	59
35. Внутренний диаметр ротора	мм	30
36. Тип стали	-	30HGSА
37. Длина ротора	мм	150
38. Максимальная толщина постоянных магнитов	мм	8,8
39. Ширина магнитов	мм	40,04
40. Тип магнита	-	vacomax

Данные по магниту

41. Остаточная индукция	Тл	1,03
42. Коэрцитивная сила	кА/м	650
43. Максимальная плотность энергии	кДж/м ³	167,375
44. Относительная проницаемость отдачи	-	1,26
45. Индукция размагничивания	Тл	0,4

Расход материалов

46. Плотность меди	кг/м ³	8900
47. Плотность постоянного магнита	кг/м ³	7800
48. Плотность стали сердечника статора	кг/м ³	7872
49. Плотность стали сердечника ротора	кг/м ³	7872
50. Вес меди	кг	2,65
51. Вес постоянного магнита	кг	1,18

52. Вес стали сердечника статора	кг	4,18
53. Вес стали сердечника ротора	кг	1,18
54. Общий вес	кг	9,21
Устойчивое состояние параметров		
55. Коэффициент обмотки статора	-	0,933
56. D-осевое реактивное сопротивление X_{ad}	Ом·м	0,122
57. Q-осевое реактивное сопротивление X_{aq}	Ом·м	0,122
58. D-осевое реактивное сопротивление $X_1 + X_{ad}$	Ом·м	0,261
59. Q-осевое реактивное сопротивление $X_1 + X_{aq}$	Ом·м	0,305
60. Реактивное сопротивление рассеяния якоря X_1	Ом·м	0,139
61. Реактивное сопротивление нулевой последовательности X_0	Ом·м	0,091
62. Фазовое сопротивление якоря R_1	Ом·м	0,0037
63. Фазовое сопротивление якоря при 20°C	Ом·м	0,0025
Магнитные данные без нагрузки		
64. Магнитная индукция в зубцах статора	Тл	1,139
65. Магнитная индукция в ярме статора	Тл	1,527
66. Магнитная индукция в ярме ротора	Тл	1,627
67. Магнитная индукция в воздушном зазоре	Тл	0,417
68. Магнитная индукция в магнитах	Тл	0,596
69. Коэффициент потока утечки	-	1
70. Длина цепи ярма статора	мм	0,304
71. Длина цепи ярма ротора	мм	0,404
72. Фундаментальное среднеквадратическое линейное напряжение	В	334,076
73. Момент затяжки	Н·м	0,232
Магнитные данные под нагрузкой		
74. Сопротивление	Ом	0,321
75. Индуктивность	Гн	1,46e-005
76. Линейное напряжение	В	219,402
77. Среднеквадратическое значение линейного тока	А	334,007
78. Среднеквадратическое значение фазного напряжения	В	127,26
79. Тепловая нагрузка	А ² /мм ³	908,655
80. Удельная электрическая нагрузка	А/мм	71,87

81. Плотность тока	А/мм ²	12,64
82. Потери в стали	Вт	1084,59
83. Потери в меди	Вт	1253,83
84. Полные потери	Вт	2238,41
85. Входная мощность	кВт	107,721
86. Выходная мощность	кВт	110,060
87. КПД	%	97,87
88. Частота вращения	об./мин	65000
89. Номинальный крутящий момент	Н·м	16,16
90. Ток короткого замыкания	А	748,772

Анализ результатов расчета в разделе RMXprt программного комплекса Ansys Maxwell показал, что выходные параметры высокооборотного синхронного starter-генератора соответствуют заданным параметрам. Выходная мощность составляет 110 кВт, линейный ток 334 А, фазное напряжение 127 В, КПД 97,87%.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ВЫСОКООБОРОТНОГО СИНХРОННОГО СТАРТЕР-ГЕНЕРАТОРА ПРИ 2D-МОДЕЛИРОВАНИИ

Разработанная двухмерная модель высокооборотного синхронного starter-генератора представлена на рис. 1.

В ходе исследования двухмерной модели были рассмотрены характеристики высокооборотного синхронного starter-генератора, которые представлены на рис. 2-5.

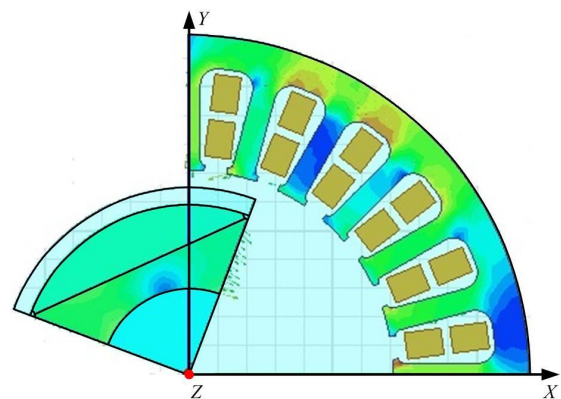


Рис. 1. Двухмерная модель высокооборотного синхронного starter-генератора

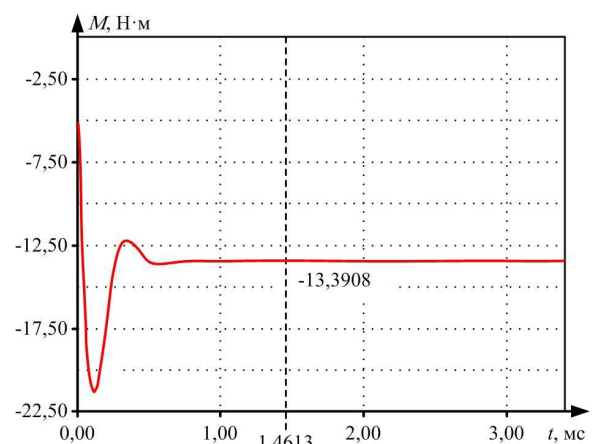


Рис. 2. Зависимость крутящего момента ротора от времени

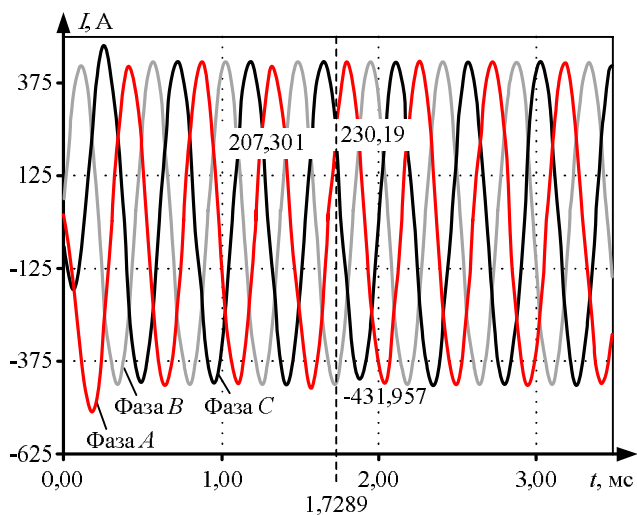


Рис. 3. Зависимость токов в фазах A, B, C от времени

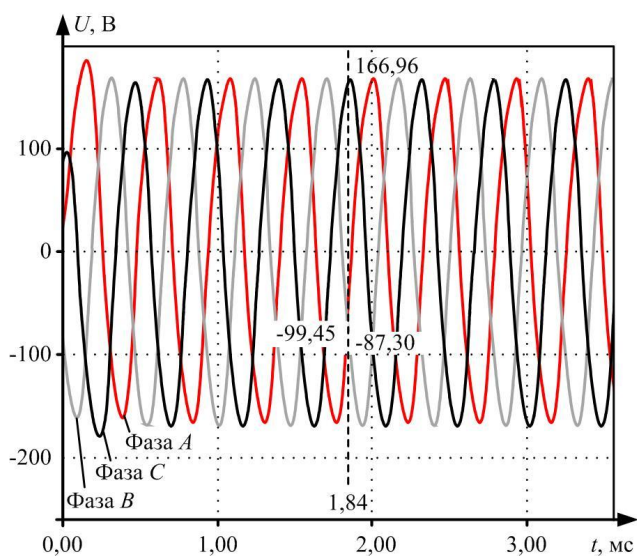


Рис. 4. Зависимость индуцированного напряжения от времени

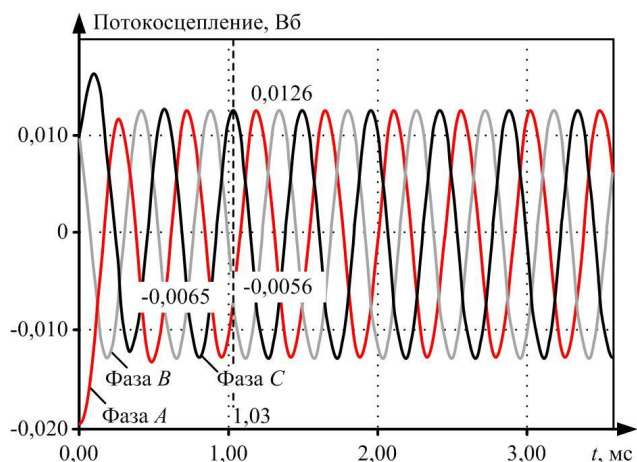


Рис. 5. Зависимость потокосцепления от времени

Значение крутящего момента при значении времени $t=1,46$ мс равно $-13,39$ Н.

Значение токов в фазах A, B, C при значении времени $t=1,72$ мс равно соответственно 207, -431, 230 А.

Значение индуцированного напряжения в фазах A, B, C при значении времени $t=1,84$ мс равно соответственно -87,30 В, -99,45 В, 166,96 В.

Значение потокосцепления в фазах A, B, C при значении времени $t=1,03$ мс равно соответственно -6,5, -5,6, 12,6 мВ.

МОЩНОСТЬ ВЫСОКООБОРОТНОГО СИНХРОННОГО СТАРТЕР-ГЕНЕРАТОРА В СТАРТЕРНОМ РЕЖИМЕ

Предлагается рассмотреть мощность высокооборотного синхронного стартер-генератора в стартерном режиме, основываясь на моменте, развиваемом на валу турбины безредукторной ВСУ. Уравнение для момента на валу турбины во время запуска:

$$M_{\Sigma t} = M_t + M_o + M_j, \quad (1)$$

где M_t – момент турбины; M_o – момент сопротивления; M_j – избыточный момент для преодоления инерционного момента.

Момент сопротивления возникает из-за сил трения, а также сопротивления газа, которые проявляются при раскрутке турбины безредукторной ВСУ. Избыточный момент для преодоления инерционного момента возникает в связи с тем, что вал турбины обладает собственным моментом инерции, который также необходимо преодолеть при его раскрутке. Стоит отметить, что для расчета момента инерции вала турбины безредукторной ВСУ существует конечная формула. В целом избыточный момент можно определить по обобщенной формуле:

$$M_j = J_p \frac{d\omega}{dt}, \quad (2)$$

где J_p – полярный момент инерции вала турбины.

Для получения числового значения полярного момента инерции вала турбины можно использовать следующее выражение:

$$J_{pt} = \frac{\pi d^4}{32}, \quad (3)$$

где d – диаметр вала турбины.

То есть для получения числового значения избыточного момента необходимо знать диаметр вала турбины, а также числовое значение углового ускорения вала. Для оценки мощности стартер-генератора в стартерном режиме при пуске предлагается брать максимально развиваемое значение углового ускорения вала при пуске. Отдельно рассмотрим момент турбины. Момент турбины определяется мощностью турбины, то есть

$$M_t = \frac{W_t}{\omega_t}, \quad (4)$$

где W_t – мощность турбины; ω_t – частота вращения турбины, при которой ВСУ выходит на режим малого газа.

Частота вращения турбины, при которой безредукторная ВСУ выходит на режим малого газа, является определенной величиной для конкретной ВСУ. Мощность турбины можно определить по следующей формуле:

$$W = mc_p T_{02} \left(\Pi_k^{\frac{k-1}{k\eta_p}} - 1 \right), \quad (5)$$

где m – расход воздуха через безредукторную ВСУ; c_p – теплоемкость воздуха; T_{02} – температура на входе в безредукторную ВСУ; Π_k – степень повышения давления в турбине; k – показатель адиабаты; η_p – политропический КПД процесса сжатия.

Для проведения расчета мощности высокооборотного синхронного стартер-генератора в стартерном режиме величину расхода воздуха m следует принимать для режима малого газа безредукторной ВСУ. Теплоемкость воздуха и политропический КПД процесса сжатия являются табличными данными. Для безредукторной ВСУ температура на входе в двигатель принимается равной $T_{02}=288,15$ К. Для проведения расчетов обычно принимают показатель адиабаты $k=1,4$. В свою очередь, степень повышения давления в турбине Π_k варьируется от 1,5 до 20.

Момент сопротивления M_0 целесообразно рассчитывать отдельно, так как этот момент достаточно мал и учесть его можно более простым способом. Поэтому предлагается учитывать момент сопротивления при расчете момента турбины M_t . Для этого необходимо поделить полученный момент турбины на КПД узлов, за счет которых образуется сопротивление вращению (например, подшипники качения, привода агрегатов и др.). Для расчетов можно принять $\eta_0 = 0,97...0,98$. Тогда получим следующее:

$$M_t + M_o = \frac{W_t}{\omega_t \eta_0}. \quad (6)$$

По предложенной методике можно получить численное значение мощности высокооборотного синхронного стартер-генератора при расположении его на валу турбины. Также это имеет важное практическое значение в случае разбиения высокооборотного синхронного стартер-генератора на две машины. Например, одна из машин работает только в режиме генератора, а вторая представляет собой стартер-генератор. Таким образом, можно получить минимальную мощность, которую должна обеспечивать машина, выполняющая роль стартер-генератора, при условии, что задана совокупная мощность высокооборотного синхронного стартер-генератора в генераторном режиме.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ВЫСОКООБОРОТНОГО СИНХРОННОГО СТАРТЕР-ГЕНЕРАТОРА В СТАРТЕРНОМ РЕЖИМЕ В РАЗДЕЛЕ RMXprt ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ANSYS MAXWELL

Основные данные для расчета представлены в табл. 3.

Результаты расчетов представлены в табл. 4.

Анализ результатов расчета в разделе RMXprt программного комплекса Ansys Maxwell показал, что выходные параметры высокооборотного синхронного стартер-генератора в стартерном режиме соответствуют заданным параметрам. Выходная мощность составляет 91 кВт, линейный ток 338 А, КПД – 97,7%.

Таблица 3
Геометрические размеры и параметры высокооборотного синхронного стартер-генератора для расчета в стартерном режиме

Наименование параметра/геометрического размера	Единицы измерения	Величина
1. Частота вращения	об/мин	30000
2. Мощность на валу	кВт	90
3. Количество фаз	-	3
4. Напряжение	В	270
5. Частота	Гц	(400±20)
6. Количество пазов статора	-	24
7. Число полюсов	-	4
8. Внешний диаметр статора	мм	118
9. Внутренний диаметр статора	мм	71
10. Внешний диаметр ротора	мм	59
11. Внутренний диаметр ротора	мм	30
12. Длина статора	мм	150
13. Длина ротора	мм	150
14. Толщина постоянных магнитов	мм	8,8
15. Воздушный зазор	мм	6

Таблица 4
Результаты расчетов высокооборотного синхронного стартер-генератора в стартерном режиме в разделе RMXprt программного комплекса Ansys Maxwell

Наименование параметра/геометрического размера	Единицы измерения	Величина
Общие сведения		
1. Номинальная выходная мощность	кВт	90
2. Тип нагрузки	-	постоянная частота вращения
3. Номинальное напряжение	В	270
4. Число полюсов	-	4
5. Положение ротора	-	внутреннее
6. Рабочая температура	°С	140
Данные по статору		
9. Количество пазов статора	-	24
10. Внешний диаметр статора	мм	118
11. Внутренний диаметр статора	мм	71
12. Ширина паза B_{S2}	мм	9,22
13. Высота паза H_{S2}	мм	13
14. Высота шлица H_{S0}	мм	1
15. Ширина шлица B_{S0}	мм	4

16. Верхняя ширина зубца	мм	4
17. Нижняя ширина зубца	мм	4
18. Коэффициент укладки сердечника статора	-	0,92
19. Длина статора	мм	150
20. Тип стали	-	2421
21. Расчетная толщина клина	мм	0,72
22. Количество параллельных ветвей	-	1
23. Количество проводников в пазу	-	2
24. Средний шаг катушки	-	5
25. Количество жил в проводнике	-	1147
26. Диаметр провода	мм	0,2
27. Площадь паза	мм ²	130,288
28. Конечная площадь паза	мм ²	122,434
29. Ограниченный коэффициент заполнения паза	%	75
30. Коэффициент заполнения паза статора	%	74,94
31. Длина полуоборота катушки	мм	235,668
Данные по ротору		
32. Минимальный воздушный зазор	мм	6
33. Длина ротора	мм	150
34. Внешний диаметр ротора	мм	59
35. Внутренний диаметр ротора	мм	30
36. Тип стали	-	30HGSА
37. Длина ротора	мм	150
38. Максимальная толщина постоянных магнитов	мм	8,8
39. Ширина магнитов	мм	40,04
40. Тип магнита	-	Vacomax
Данные по магниту		
41. Остаточная индукция	Тл	1,03
42. Коэрцитивная сила	кА/м	650
43. Максимальная плотность энергии	кДж/м ³	167,375
44. Относительная проницаемость отдачи	-	1,26
45. Индукция размагничивания	Тл	0,4
Расход материалов		
46. Плотность меди	кг/м ³	8900
47. Плотность постоянного магнита	кг/м ³	7800
48. Плотность стали сердечника статора	кг/м ³	7872
49. Плотность стали сердечника ротора	кг/м ³	7872
50. Вес меди	кг	3,62

51. Вес постоянного магнита	кг	1,18
52. Вес стали сердечника статора	кг	4,18
53. Вес стали сердечника ротора	кг	1,18
54. Общий вес	кг	10,18
Устойчивое состояние параметров		
55. Коэффициент обмотки статора	-	0,933
56. Фазовое сопротивление якоря R1	Ом·м	0,0027
57. Фазовое сопротивление якоря при 20°С	Ом·м	0,0018
Магнитные данные без нагрузки		
58. Магнитная индукция в зубцах статора	Тл	1,21
59. Магнитная индукция в ярме статора	Тл	1,526
60. Магнитная индукция в ярме ротора	Тл	1,627
61. Магнитная индукция в воздушном зазоре	Тл	0,417
62. Магнитная индукция в магнитах	Тл	0,596
63. Коэффициент потока утечки	-	1
64. Длина цепи ярма статора	мм	0,304
65. Длина цепи ярма ротора	мм	0,404
66. Фундаментальное среднеквадратическое линейное напряжение	В	334,076
67. Момент затяжки	Н·м	0,232
Магнитные данные под нагрузкой		
68. Средний входной ток	А	338,748
69. Среднеквадратичный ток якоря	А	361,01
70. Тепловая нагрузка	А ² /мм ³	778,332
71. Удельная электрическая нагрузка	А/мм	77,68
72. Плотность тока	А/мм ²	10,01
73. Потери в стали	Вт	1024,38
74. Потери в меди	Вт	1073,98
75. Полные потери	Вт	2098,36
76. Входная мощность	кВт	89,363
77. Выходная мощность	кВт	91,462
78. КПД	%	97,70
79. Частота вращения	об/мин	30000
80. Номинальный крутящий момент	Н·м	28,44

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ВЫСОКООБОРОТНОГО
СИНХРОННОГО СТАРТЕР-ГЕНЕРАТОРА В СТАРТЕРНОМ
РЕЖИМЕ ПРИ 2D-МОДЕЛИРОВАНИИ

В ходе исследования двухмерной модели были рассмотрены характеристики высокооборотного синхронного стартер-генератора в стартерном режиме, которые представлены на **рис. 6-9**.

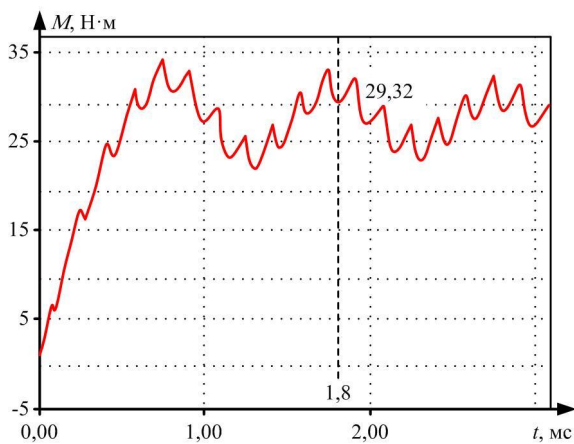


Рис. 6. Зависимость крутящего момента ротора от времени

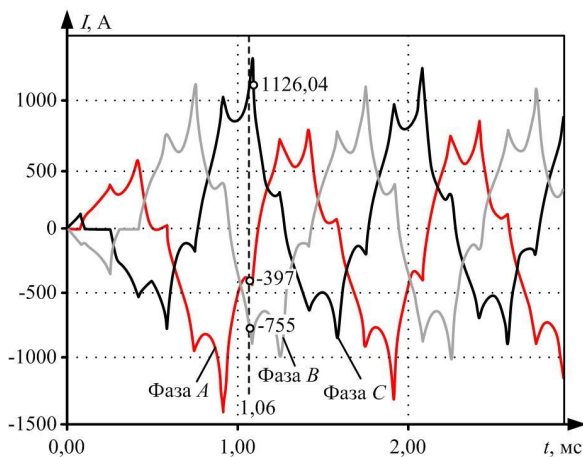


Рис. 7. Зависимость токов в фазах А, В, С от времени

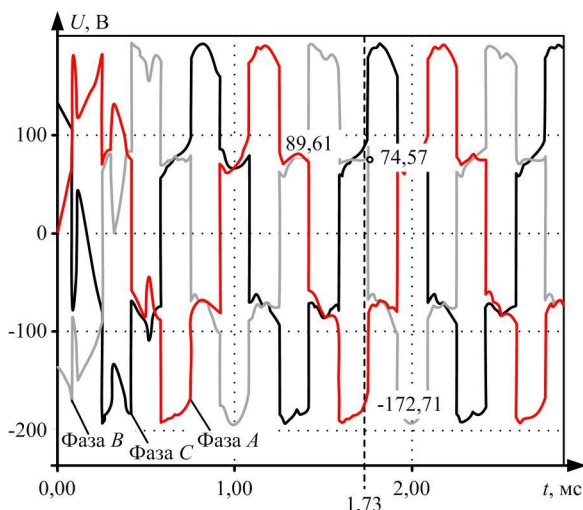


Рис. 8. Зависимость индуцированного напряжения от времени

Значение крутящего момента при значении времени $t=1,8$ мс равно 29,32 Н·м.

Значение токов в фазах А, В, С при значении времени $t=1,06$ мс равно соответственно -397, -755, 1126 А.

Значение индуцированного напряжения в фазах А, В, С при значении времени $t=1,73$ мс равно, соответственно -172,01, 74,57, 89,61.

Значение потокосцепления в фазах А, В, С при значении времени $t=1,42$ мс равно соответственно 25,8, -13,1, -14,5 мВб.

Полученная в результате моделирования трехмерная модель высокооборотного синхронного стартер-генератора представлена на рис. 10.

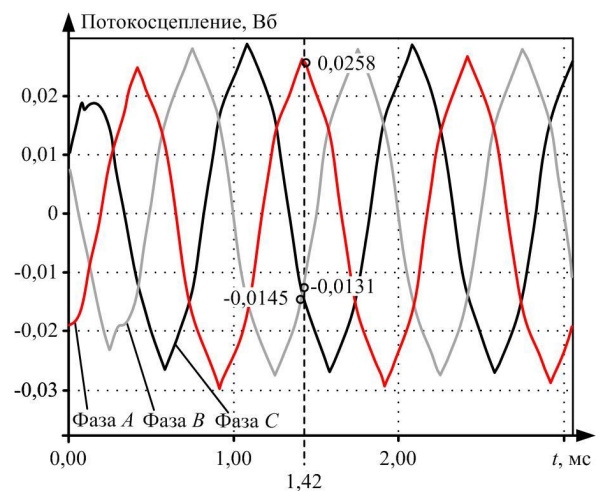


Рис. 9. Зависимость потокосцепления от времени

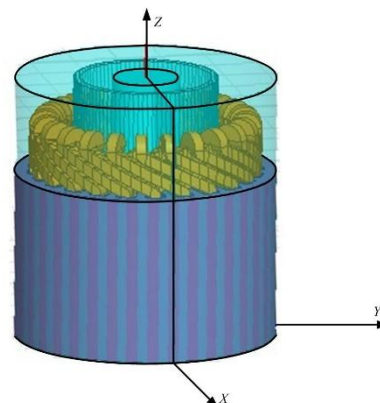


Рис. 10. Трехмерная модель высокооборотного синхронного стартер-генератора

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате данной работы был разработан высокооборотный синхронный стартер-генератор, работающий в генераторном и стартерном режимах для безредукторных ВСУ. Произведен расчет основных параметров высокооборотного синхронного стартер-генератора. Выполнено двухмерное моделирование высокооборотного синхронного стартер-генератора в генераторном и стартерном режимах. Приведены формулы для расчета мощности высокооборотного стартер-генератора в стартерном режиме. Исследованы характеристики высокооборотного синхронного стартер-генератора в генераторном и стартерном режимах при двухмерном моделировании.

Выполненные расчеты и проектирование показали возможность создания высокооборотного синхронного стартер-генератора с уменьшенными массогабаритными показателями, мощностью 90 кВт, частотой вращения 65000 об/мин, работающего в стартерном и генераторном режимах с КПД 97,7 и 97,87% для безредукторных ВСУ. С учетом параметров, полученных при расчете, можно заключить, что высокооборотный синхронный стартер-генератор является высоконадежным, максимально отказоустойчивым и энергоэффективным для применения в безредукторных ВСУ. Проведенные в работе расчеты и исследования обеспечивают подход к проектированию высокооборотных синхронных стартер-генераторов в генераторном и стартерном режимах для авиакосмической отрасли, что определяет перспективы создания более электрических самолетов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Складов И.Е., Пантелеев О.К. Авиационное оборудование [Электронный ресурс] // Рубрика «Двигателестроение»: [сайт]. [2019]. URL: <http://www.aviaport.ru> (дата обращения: 09.09.19).
2. Высоковольтный высокооборотный генератор для автономных систем / Ф.Р. Исмагилов, В.Е. Вавилов, В.И. Бекузин, В.В. Айгузина // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2016. Т. 18. №4(7). С. 1387-1392.
3. Seok-Myeong Jang, Kyoung-Jin Ko, Han-Wook Cho, Jang-Young Choi, Won-Kyu Oh. Characteristic Analysis of a 2 kW High Speed Permanent Magnet Synchronous Generator Using the Equivalent Circuit Method - Proceeding of International Conference on Electrical Machines and Systems, Seoul, Korea, 8-11th June 2007, pp. 868-873.
4. Сугробов А. М., Русаков А.М. Проектирование электрических машин автономных объектов. М.: Изд-во МЭИ, 2012. 302 с.
5. Овчинников И.Е. Вентильные электрические двигатели и привод на их основе (малая и средняя мощность). М.: Изд-во МЭИ, 2006. 336 с.
6. Исмагилов Ф.Р., Хайруллин И.Х., Вавилов В.Е. Коэффициент полезного действия высокоскоростных электро-механических преобразователей энергии с высокоэффективными постоянными магнитами // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2015. № 2 (538). С. 12-19.
7. Kolondzovski Z., Arkkio A., Larjola I. Power limits of High Speed Multimegawatt Permanent Magnet Electrical Machines for Compressor Applications // IEEE Transactions on Energy Conversion, 2011, vol. 26, no. 1, pp. 73-82.
8. Uzhegov N., Nerg N., Pyrhonen J. Design of 6-slot 2-pole High-Speed Permanent Magnet Synchronous Machines with Tooth-Coil Windings // International Conference on Electrical Machines ICEM, Berlin, Germany, September 2014, pp. 2525-2530.
9. Saban M., Gonzalez-Lopez D., Bailey C. Test procedures for High-Speed Multimegawatt Permanent Magnet Synchronous Machines // IEEE Transactions on Industry Applications, 2010, vol. 46, no. 5, pp. 1769-1777

Поступила в редакцию 08 октября 2019 г.

INFORMATION IN ENGLISH

HIGH-SPEED SYNCHRONOUS STARTER-GENERATOR FOR NON-GEAR AUXILIARY POWER PLANTS

Flur R. Ismagilov

D. Sc. (Engineering), Professor, Head of the Department of Electromechanics, Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2525-9815>.

Alexander A. Gerasin

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Deputy General Director, State Research Institute of Aviation Systems, Ufa, Russia

Viacheslav E. Vavilov

Ph.D. (Engineering), Leading Research Scientist, Associate Professor of the Department of Electromechanics, Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5695-6974>.

Guzel S. Zinnatullina

Engineer, a Post-graduate student of the Department of Electromechanics, Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russia. E-mail: zinnatullina95@list.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9254-8369>.

One of the most urgent tasks nowadays is to carry out fundamental research of fundamental processes in highly reliable electromechanical energy converters for the aerospace industry in order to find new physical principles to ensure maximum fault tolerance and energy efficiency. As a result, it is necessary to solve scientific problem in the field of improving the reliability, energy efficiency and fault tolerance of electromechanical energy converters by studying the fundamental processes in highly reliable electromechanical energy converters in order to find new physical principles to ensure maximum failure resistance and energy efficiency. It is necessary to develop a theoretical knowledge base for the transition to the technological development of highly reliable electromechanical energy converters for the aerospace industry.

This paper presents the calculations of the main parameters of a 90 kW high-speed synchronous starter-generator with the rotational speed of 65,000 rpm for gearless auxiliary power plants. A two-dimensional model of a high-speed synchronous starter-generator in the generator and starter modes is given. Formulas are given for calculating the power of a high-speed starter-generator in the starter mode. The characteristics of a high-speed synchronous starter-generator in the generator and starter modes are analyzed.

Keywords: high-speed synchronous starter-generator, auxiliary power unit, gearless auxiliary power unit, synchronous starter-generator, modeling, computer simulation, Ansys Maxwell, software package, two-dimensional computer model, research of high-speed synchronous starter-generator.

REFERENCES

1. Sklyarov I.E., Panteleev O.K. Aviation equipment. Engine design. Available at: <http://www.aviaport.ru> (accessed 09.09.19). (In Russian)
2. Ismagilov F.R., Vavilov V.Ye., Bekuzin V.I., Aiguzina V.V. High-voltage high-speed generator for autonomous systems. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences* [Bulletin of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2016, vol. 18, no. 4(7), pp. 1387-1392. (In Russian)
3. Seok-Myeong Jang, Kyoung-Jin Ko, Han-Wook Cho, Jang-Young Choi, Won-Kyu Oh. Characteristic Analysis of a 2 kW High Speed Permanent Magnet Synchronous Generator Using the Equivalent Circuit Method – Proceeding of International Conference on Electrical Machines and Systems, Seoul, Korea, 8-11th June 2007, pp. 868-873.
4. Sugrobov A.M., Rusakov A.M. *Proektirovanie jelektricheskikh mashin avtonomnykh ob'ektov* [Design of electric machines of

- autonomous objects]. Moscow, Publishing House MPEI, 2012, 302 pp. (In Russian).
5. Ovchinnikov I.E. *Ventil'nye jelektricheskie dvigateli i privod na ih osnove (malaja i srednjaja moshhnost')* [Valve electric motors and the drive based on them (low and medium power)]. Moscow, Publishing House MPEI, 2006, 336 pp. (In Russian).
6. Ismagilov F.R., Khayrullin I.Kh., Vavilov V.E. Efficiency coefficient of high-speed electro-mechanical energy converters with highly coercive permanent magnets. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika* [Russian Electromechanics], 2015, no. 2(538), pp. 12-19. (In Russian)
7. Kolondzovski Z., Arkkio A., Larjola I. Power limits of High Speed Multimegawatt Permanent Magnet Electrical Machines for Compressor Applications. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2011, vol. 26, no. 1, pp.73-82.
8. Uzhegov N., Nerg N., Pyrhonen J. Design of 6-slot 2-pole High-Speed Permanent Magnet Synchronous Machines with Tooth-Coil Windings. *International Conference on Electrical Machines ICEM*, Berlin, Germany, September 2014, pp. 2525-2530.
9. Saban M., Gonzalez-Lopez D., Bailey C. Test procedures for High-Speed Multimegawatt Permanent Magnet Synchronous Machines. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2010, vol. 46, no. 5, pp. 1769-1777.

Высокооборотный синхронный стартер-генератор для безредукторных вспомогательных силовых установок / Ф.Р. Исмагилов, А.А. Герасин, В.Е. Вавилов, Г.С. Зиннатуллина // *Электротехнические системы и комплексы*. 2020. № 1(46). С. 19-27. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-1\(46\)-19-27](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-1(46)-19-27)

Ismagilov F.R., Gerasin A.A., Vavilov V.E., Zinnatullina G.S. High-Speed Synchronous Starter-Generator for Non-Gear Auxiliary Power Plants. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2020, no. 1(46), pp. 19-27. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-1\(46\)-19-27](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-1(46)-19-27)

Панова Е.А., Варганова А.В., Панарина М.С.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ПРОВЕРКА ОДНОПОЛОСНЫХ ШИН ПРЯМОУГОЛЬНОГО СЕЧЕНИЯ ПО УСЛОВИЯМ ТЕРМИЧЕСКОЙ И ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ СТОЙКОСТИ

При проектировании понизительных подстанций проектировщик вынужден выполнять большой объем рутинных расчетов. Эти расчеты требуют от проектировщика умения ориентироваться в большом объеме нормативных документов, инструкций и ГОСТ, а также каталогов заводов-изготовителей электротехнического оборудования. Применение для этих целей САПР позволяет значительно сократить время, которое проектировщик затрачивает на выполнение расчетной части проекта. Однако существующие на сегодняшний день САПР либо автоматизируют один или несколько этапов проекта, либо основаны на нормах и стандартах, не действующих на территории РФ. Авторами данной статьи разработан алгоритм автоматизированного выбора и проверки жестких шин прямоугольного сечения, выполненных из одной полосы. Описанный в работе алгоритм позволяет выбрать сечение шины по условию его нагрева током утяжеленного режима, а также осуществить его проверку на термическую и электродинамическую стойкость. Алгоритм отличается наличием математического описания номограммы динамического коэффициента, что снижает возможность ошибки при его определении и значительно облегчает работу проектировщика. Алгоритм основан на действующих руководящих указаниях по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования. Разработанный алгоритм реализован в оригинальной САПР понизительных подстанций, в которую интегрирована база данных электрооборудования. Такой подход позволяет автоматизировать разработку проекта комплексно. При выборе электрооборудования в данной САПР проектировщику на любом этапе доступны в базе данных только те аппараты и проводники, которые удовлетворяют условиям их работы в продолжительных и аварийных режимах.

Ключевые слова: автоматизированное проектирование, термическая стойкость, электродинамическая стойкость, сборные шины, распределительное устройство, подстанция.

ВВЕДЕНИЕ

В силу того, что выполнение проектных расчетов представляет собой хоть трудоемкую рутинную задачу, целесообразным является использование САПР в работе проектировщиков. Так, при проектировании электроустановок наиболее широко используются чертежно-графические САПР [1, 2], позволяющие выполнять чертежи электрических схем с использованием встроенной библиотеки элементов, соответствующих требованиям ЕСКД. Это значительно сокращает время выполнения проекта, однако не избавляет проектировщика от выполнения расчетов.

Одним из наиболее трудоемких процессов является выбор и проверка проводников и электрических аппаратов распределительных устройств, так как он связан с выполнением громоздких однотипных расчетов, а также с необходимостью использования каталогов заводов-изготовителей электрооборудования, справочной и нормативной литературы. Существуют САПР, позволяющие осуществлять выбор и проверку отдельных видов аппаратов, таких как высоковольтные выключатели [3], либо гибких шин [4] и кабелей [5].

Выбор и проверка жесткой ошиновки связаны с выполнением громоздких расчетов, особенно в части оценки электродинамических усилий. Дополнительно эти расчеты усложняются необходимостью использования номограмм для определения расчетных коэффициентов, что увеличивает затрачиваемое проектировщиком время и приводит к неточностям в расчетах. Поэтому такие расчеты целесообразно выполнять средствами САПР. Так, авторы [6] предложили алгоритм оптимизации с использованием программного обеспечения BUSCAD, предназначенного для опреде-

ления минимальной массы и стоимости шин с учетом их нагрева током рабочего режима, термической и электродинамической стойкости, а также ветровой нагрузки. В работе [7] предложен алгоритм проверки термической и электродинамической стойкости изолированных жестких шин. Авторы [8] рассматривают вопрос оптимизации параметров жесткой ошиновки распределительных устройств с элегазовой изоляцией. В [9] авторами предложена методика оценки температуры контактов трехфазных сборных шин распределительных устройств с элегазовой изоляцией с использованием метода конечных элементов.

Рассмотренные САПР не позволяют проектировщику автоматизировать весь процесс проектирования подстанции. То есть проектировщик вынужден использовать различные программы для выполнения отдельных этапов проекта.

Таким образом, актуальной является задача разработки САПР, позволяющей комплексно выполнять проект подстанции в автоматизированном режиме и позволяющей вносить изменения в принятые программой решения на любом этапе проекта.

Авторами данной статьи разработан алгоритм автоматизированного выбора и проверки жестких шин прямоугольного сечения. Данный алгоритм реализован в САПР понизительных подстанций, позволяющей на основе технического задания осуществить выбор схем распределительных устройств, электрооборудования и формировать планы РУ. Данная САПР основана на действующих ГОСТ и ЕСКД и, кроме выполнения проектных расчетов, позволяет формировать пояснительную записку, чертежи в формате *.dwg и спецификации. Отличительной особенностью САПР является возможность выполнения технико-экономического сопоставления вариантов проектных решений и выдачи рекомендаций по оптимальному варианту.

АЛГОРИТМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ВЫБОРА
СБОРНЫХ ШИН И ПРОВЕРКИ ПО УСЛОВИЮ
ТЕРМИЧЕСКОЙ СТОЙКОСТИ

Предложенный алгоритм выбора сборных шин и их проверки на термическую и электродинамическую стойкость основан на действующих руководящих указаниях [10].

Исходными данными для проверки шинных конструкций на электродинамическую и термическую стойкость являются номинальные параметры проверяемого сечения шины, которые берутся из базы данных электрических аппаратов [11], а также результаты расчета составляющих тока трехфазного короткого замыкания [12], выполненного средствами разработанной авторами САПР.

Для выбора площади поперечного сечения проверяемой шинной конструкции алгоритмом САПР предусмотрен расчет тока в утяжеленном режиме. Для распределительного устройства напряжением 6-10 кВ понизительной подстанции ток сборных шин принимается равным току на стороне НН силового трансформатора в утяжеленном режиме и, с учетом его перегрузочной способности, равен:

$$I_{\text{нагр. max}} = \frac{k_3 S_{\text{т. ном}}}{n \sqrt{3} U_{\text{нн}}}, \quad (1)$$

где k_3 – коэффициент загрузки трансформатора в режиме аварийных перегрузок (если значение не задано ранее проектировщиком, то он принимается равным 1,4); $S_{\text{т. ном}}$ – номинальная мощность трансформатора, кВА; n – число параллельно работающих ветвей обмотки трансформатора; $U_{\text{нн}}$ – номинальное напряжение трансформатора, кВ.

Подробно алгоритм определения тока в утяжеленном режиме рассмотрен в [13].

Условием выбора поперечного сечения сборной шины будет превышение её номинального допустимого тока по нагреву тока утяжеленного режима, определенного в соответствии с (1). Таким образом, проектировщику доступны для выбора из базы данных только те шины, которые соответствуют выбранному им профилю и условию

$$I_{\text{ном}} \geq I_{\text{нагр. max}}, \quad (2)$$

где $I_{\text{ном}}$ – длительно допустимый ток шины, А.

Для дальнейшей проверки шинной конструкции на термическую и электродинамическую стойкость из базы данных используются следующие номинальные параметры:

E – модуль упругости материала шины, Па;

M – масса шины на единицу длины, кг/м;

b – ширина шины, м;

h – длина шины, м;

материал (марка сплава);

$\sigma_{\text{доп}}$ – допустимое напряжение в материале жестких шин, Па.

Кроме номинальных параметров проводника для проверки сборных шин на термическую и электродинамическую стойкость в качестве исходных данных учитываются параметры ячейки КРУ или КСО, на базе

которых планируется выполнение распределительного устройства. Необходимыми параметрами являются расстояние между осями проводников (a , м), взаимное расположение фаз ошиновки (в одной плоскости, по вершинам равностороннего треугольника, по вершинам равнобедренного треугольника), а также длина пролета сборных шин (l , м), которая принимается равной ширине ячейки КРУ/КСО.

Расчет величин ударного тока при трехфазном коротком замыкании ($i_y^{(3)}$, кА) и ударного коэффициента (k_y) предусмотрен алгоритмом САПР [12] на предыдущем этапе проектирования. Ударный коэффициент при этом рассчитывается на основе постоянной времени электрической цепи, которая представляет собой энергосистему, связанную с точкой короткого замыкания через силовой трансформатор.

Для проверки сборных шин на термическую стойкость сначала определяется тепловой импульс:

$$B_K = I_{\text{п0}}^2 (0,02 + t_{\text{о.в}} + T_a), \quad (3)$$

где $I_{\text{п0}}$ – начальное значение аperiodической составляющей тока трехфазного короткого замыкания (определяется на предыдущем этапе проектирования), кА; $t_{\text{о.в}}$ – полное время отключения выключателя в цепи НН понизительного трансформатора, с; T_a – постоянная времени электрической цепи, которая зависит от мощности понизительного трансформатора на проектируемом РУ [12], с.

При определении теплового импульса для проверки сборных шин в предлагаемом алгоритме САПР принято, что время действия релейной защиты равно времени срабатывания дифференциальной защиты силового трансформатора и составляет 0,02 с.

На основе рассчитанного по (3) теплового импульса и данных о материале шины рассчитывается минимально допустимое сечение по условиям термической стойкости:

$$S_{\text{терм. min}} = \frac{\sqrt{B_K \cdot 10^6}}{C_{\text{терм}}}, \quad (4)$$

где $C_{\text{терм}}$ – коэффициент, зависящий от материала проводника, в соответствии с [10] для медных шин $C_{\text{терм}} = 170 \text{ А} \cdot \text{с}^{1/2} / \text{мм}^2$, а для алюминиевых $C_{\text{терм}} = 90 \text{ А} \cdot \text{с}^{1/2} / \text{мм}^2$.

Для проверки шинной конструкции на термическую стойкость выполняется проверка неравенства:

$$S \geq S_{\text{терм. min}}, \quad (5)$$

где $S = b \cdot h$ – расчетное сечение шины, мм².

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ПРОВЕРКА СБОРНЫХ ШИН
ПО УСЛОВИЮ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ СТОЙКОСТИ

Наибольшую сложность представляет автоматизация проверки шинной конструкции на электродинамическую стойкость. На начальном этапе выполняется расчет механического напряжения в материале шины при трехфазном КЗ. Для этого рассчитывается максимальная сила, возникающая в многопролетной балке при трехфазном КЗ:

$$F_{\max}^{(3)} = \frac{\sqrt{3} \cdot 10^{-7}}{a} I \left(i_{\text{уд}}^{(3)} \right)^2 k_{\phi} k_{\text{расп}}, \quad (6)$$

где k_{ϕ} – коэффициент формы (для однополосных шин $k_{\phi}=1$); $k_{\text{расп}}$ – коэффициент, зависящий от взаимного расположения проводников (при расположении фаз по вершинам равнобедренного треугольника $k_{\text{расп}}=0,95$, в остальных случаях $k_{\text{расп}}=1$).

Момент сопротивления поперечного сечения шин определяется в зависимости от её расположения на изоляторе:

– при горизонтальном расположении

$$W = \frac{bh^2}{6}; \quad (7)$$

– при вертикальном расположении

$$W = \frac{hb^2}{6}. \quad (8)$$

Максимальное механическое напряжение в материале шин:

$$\sigma_{\max} = \frac{F_{\max}^{(3)} l}{\lambda W} \eta, \quad (9)$$

где λ – коэффициент, зависящие от условия опирания (закрепления) шин, а также числа пролетов конструкции с неразрезными шинами. Для шинных конструкций, длина которых равна длине одного пролета, $\lambda=8$; η – коэффициент динамической нагрузки.

Обычно коэффициент η определяется по номограмме, приведенной в [10]. Для алгоритмизации расчета максимального механического напряжения авторами было получено математическое описание данной номограммы как функции двух переменных: k_y и отношения f_1/f_c . Здесь f_1 – частота собственных колебаний шины, Гц; f_c – частота сети (50 Гц). Частота собственных колебаний определяется следующим образом:

$$f_1 = \frac{9,8596}{2\pi l^2} \sqrt{\frac{EJ}{m}}, \quad (10)$$

где J – момент инерции поперечного сечения шины, м^4 .

Момент инерции, так же как и момент сопротивления, зависит от расположения шины на изоляторе и определяется:

– при горизонтальном расположении

$$J = \frac{bh^3}{12}; \quad (11)$$

– при вертикальном расположении

$$J = \frac{hb^3}{12}. \quad (12)$$

Зависимость $\eta = f(f_1/f_c, k_y)$ представлена системой уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \eta = 0,1596 + 1,4255 \frac{f_1}{f_c} + 0,1173 k_y \\ \quad \text{при } 0,02 \leq \frac{f_1}{f_c} < 0,04; \\ \eta = 0,3036 + 1,1095 \frac{f_1}{f_c} + 0,1142 k_y \\ \quad \text{при } 0,04 \leq \frac{f_1}{f_c} < 0,6; \\ \eta = -0,9103 + 3,3103 \frac{f_1}{f_c} + 0,158 k_y \\ \quad \text{при } 0,6 \leq \frac{f_1}{f_c} < 0,8; \\ \eta = 1,8 + 1,7319 \cdot 10^{-14} \frac{f_1}{f_c} \\ \quad \text{при } 0,8 \leq \frac{f_1}{f_c} < 1,2; \\ \eta = -0,3025 + 1,7521 \frac{f_1}{f_c} \\ \quad \text{при } 1,2 \leq \frac{f_1}{f_c} < 1,7; \\ \eta = 2,676 \text{ при } 1,7 \leq \frac{f_1}{f_c} < 2,5; \\ \eta = 10,095 - 2,9676 \frac{f_1}{f_c} \text{ при } 2,5 \leq \frac{f_1}{f_c} < 3; \\ \eta = 1,3803 - 0,0654 \frac{f_1}{f_c} \text{ при } 3 \leq \frac{f_1}{f_c} < 6; \\ \eta = 1 \text{ при } 6 \leq \frac{f_1}{f_c} \leq 10. \end{array} \right. \quad (13)$$

Далее из базы данных отбираются только те варианты сборных шин, которые удовлетворяют условию:

$$\sigma_{\max} \geq \sigma_{\text{доп}}. \quad (14)$$

Одновременно с проверкой шины на электродинамическую стойкость проверяются изоляторы (в данном случае проходные). Для этого в качестве дополнительных исходных данных используются напряжение сети U , кВ, номинальное напряжение изолятора $U_{\text{ном}}$, кВ, и минимальная разрушающая сила на изгиб $F_{\text{доп}}$, Н.

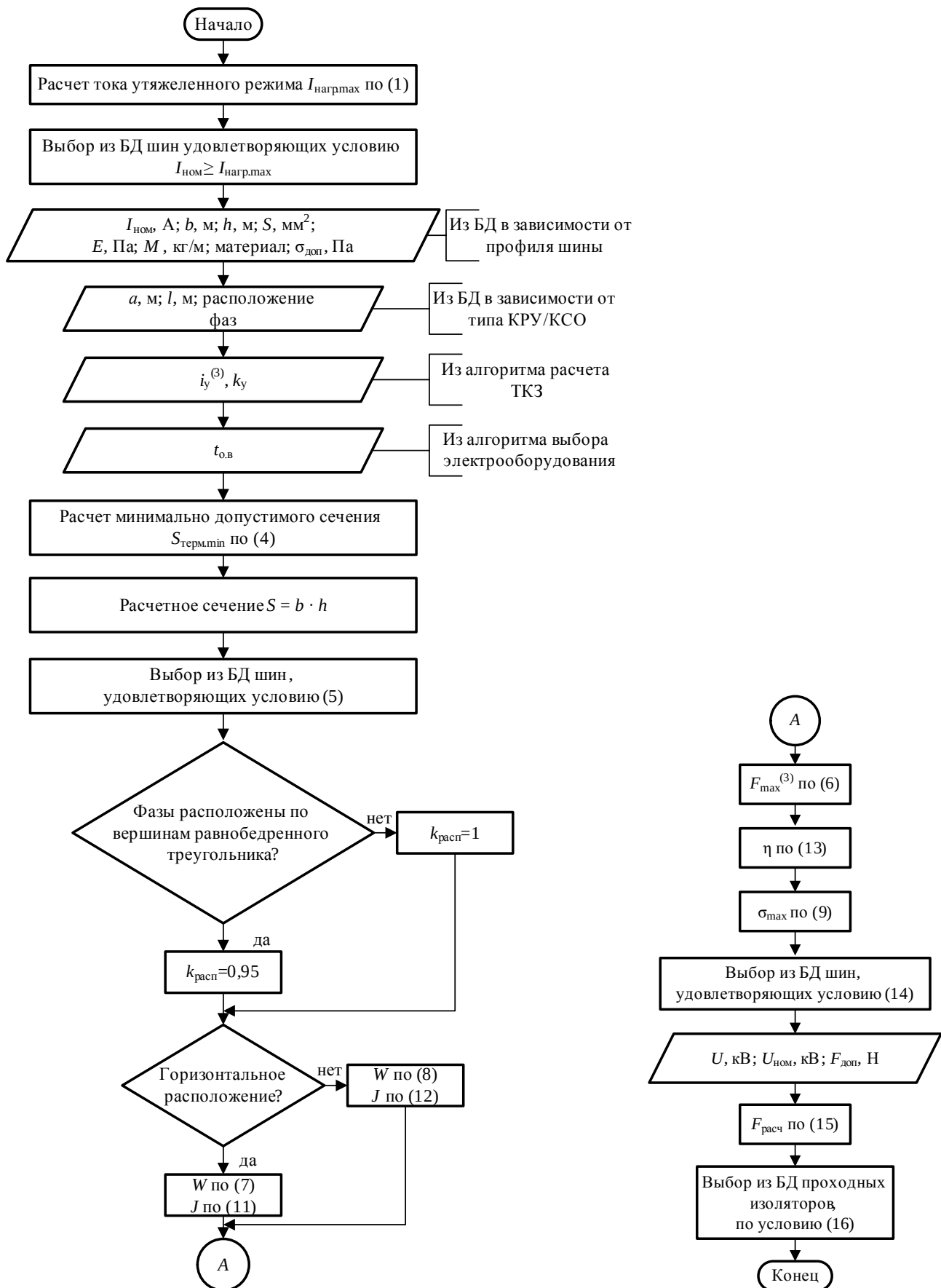
Алгоритмом предусмотрен расчет механической нагрузки на изоляторы при протекании по проводнику тока трехфазного короткого замыкания:

$$F_{\text{расч}} = \sqrt{3} \frac{\left(i_{\text{уд}}^{(3)} \cdot 10^3 \right)^2}{2a} l \cdot 10^{-7}. \quad (15)$$

В результате проектировщику доступны для выбора проходные изоляторы, удовлетворяющие условию:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{\text{ном}} \geq U; \\ F_{\text{расч}} \geq F_{\text{доп}}. \end{array} \right. \quad (16)$$

Описанный алгоритм представлен на рисунке.



Алгоритм проверки однополосных шин прямоугольного сечения на термическую и электродинамическую стойкость

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложен алгоритм автоматизированного выбора и проверки однополосных шин прямоугольного сечения, реализованный в САПР [14] пониженных подстанций. Разработанный алгоритм основан на действующих руководящих указаниях по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования и позволяет проектировщику сократить время на выполнение рутинных расчетов за счет интегрированной в САПР базы данных, а также математического описания номограммы коэффициента динамической нагрузки.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Официальный сайт Autodesk Inc. <https://www.autodesk.ru/products/autocad/overview>.
- Официальный сайт ООО «АСКОН - Системы проектирования». <https://kompas.ru/>
- Бриштен А.В., Беляев Я.С. Разработка системы автоматизированного выбора высоковольтных выключателей // Наука. Технологии. Инновации: сб. науч. трудов. 2017. С. 136-138.
- Воронин А.А., Одрозова В.А., Наурзов Т.Б. Система автоматизированного выбора гибких сборных шин распределительных устройств // Электроэнергетика глазами молодежи: материалы VIII Международной научно-технической конференции, 02 – 06 октября 2017, Самара. В 3 т. Т 1. Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2017. С. 154-157.
- Елисеев Д.С. Алгоритмы САПР для выбора проводов и кабелей. Волгоград: Волгоградский государственный аграрный университет, 2012. 184 с.
- Гуляева А.К., Долин А.П. Оптимизация параметров жесткой ошиновки // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Двадцать четвертая междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов (15–16 марта 2018 г., Москва): тез. докл. М.: ООО «Центр полиграфических услуг „Радуга“», 2018. С. 1033.
- Y. Jiaxin, W. Yang, W. Lei, L. Xiaoyu, L. Huimin and B. Longqing, "Thermal-Dynamic Stability Analysis for the Enclosed Isolated-Phase Bus Bar Based on the Subsegment Calculation Model," in IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, vol. 8, no. 4, pp. 626-634, April 2018.
- Y. Kanno, T. Amemiya, N. Takahashi and N. Kobayashi, "The Short Circuit Electromagnetic Force of the Three-Phase Encapsulated Gas Insulated Bus-Bar," in IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-103, no. 6, pp. 1386-1393, June 1984.
- X. W. Wu, N. Q. Shu, H. T. Li and L. Li, "Contact Temperature Prediction in Three-Phase Gas-Insulated Bus Bars With the Finite-Element Method," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 50, no. 2, pp. 277-280, Feb. 2014, Art no. 7006704.
- Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования : нормативный документ / Рос. АО энергетики и электрификации «ЕЭС России»; [под ред. Б.Н. Неклепаева]. Москва: Изд-во НИЦ ЭНАС, 2004. 150 с.
- Разработка базы данных электрооборудования 35-220 кВ для САПР "ОРУ CAD" / А.В. Варганова, Е.А. Панова, Т.В. Хатюшина, В.С. Кононенко, Х.М. Багаева // Электротехнические системы и комплексы. 2018. № 2 (39). С. 28-33.
- Панарина М.С., Панова Е.А., Варганова А.В. Алгоритм расчета токов короткого замыкания для САПР распределительных устройств подстанций // Наука и образование на современном этапе развития: опыт, проблемы и пути их решения: материалы междунар. науч.-практич. конф. 2018. С. 126-130.
- Panova E.A., Varganova A.V., Panarina M.S. Automation of the process of electrical substations design through the development and application of CAD when choosing electrical equipment // 2019 International Russian Automation Conference (RusAutoCon), 2019. P. 8867594. doi: 10.1109/RUSAUTOCON.2019.8867594
- ЗРУ CAD: свидетельство о гос. рег. программы для ЭВМ РФ. № 2019664573 / Варганова А.В., Панова Е.А., Кушмилль О.Е., Панарина М.С. Заявл. 01.11.2019. Опубл. 08.11.2019.

Поступила в редакцию 10 января 2020 г.

INFORMATION IN ENGLISH

AUTOMATED CHECK OF SINGLE-BAR RECTANGULAR BUSBARS ON THE CONDITIONS OF THERMAL AND ELECTRODYNAMIC WITHSTAND

Evgeniya A. Panova

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: ea.panova@magtu.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9392-3346>.

Aleksandra V. Varganova

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

Mariya S. Panarina

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

When designing dowstep substations, the designer is forced to perform a large volume of routine calculations. These calculations require the designer to be able to navigate in a large

volume of regulatory documents, instructions and GOST, as well as catalogs of manufacturers of electrical equipment. The use of CAD for this purpose significantly reduces the time spent by the

designer on the part of the project. However, existing CAD either automate one or several stages of the project or are based on norms and standards not in force in the Russian Federation. The authors of this paper have developed an algorithm of automated selection and checking of rigid buses of rectangular cross-section made from one strip. The algorithm described in the work allows to select the section of the bus according to the condition of its heating with the heavy mode current, as well as to carry out its check for thermal and electrodynamic withstand. The algorithm is characterized by the presence of a mathematical description of the nomogram of the dynamic coefficient, which reduces the possibility of error in its definition and greatly facilitates the work of the designer. The algorithm is based on the current guidelines for calculation of short-circuit currents and selection of electrical equipment. The developed algorithm is implemented in the original CAD of downstep substations, in which the database of electrical equipment is integrated. This approach automates the development of the project in complex. When selecting electrical equipment in this CAD, the designer at any stage has access to the database only those sets and conductors that satisfy the conditions of their operation in prolonged and emergency modes.

Keywords: computer-aided design, thermal withstand, electrodynamic withstand, busbars, switchgear, substation.

REFERENCES

- Autodesk Inc. <https://www.autodesk.ru/products/autocad/overview>.
- LLC «Ascon – Project systems». <https://kompas.ru/>
- Brishten A.V., Beliaev Ia.S. Development of an automated selection of high-voltage circuit breakers system. *Nauka. Tekhnologii. Innovatsii: sb. nauch. trudov* [The science. Technology. Innovation: a collection of scientific papers], 2017, pp. 136-138. (In Russian)
- Voronin A.A., Odruzova V.A., Naurzov T.B. System of automated selection of flexible busbars of switchgears. *Elektroenergetika glazami molodezhi* [Electricity through the eyes of youth], 2017, vol. 1, pp. 154-157 (In Russian).
- Eliseev D.S. *Algoritmy SAPR dlya vybora provodov i kabeley* [CAD algorithms for selecting wires and cables], Volgograd State Agrarian University Publ., 2012, 184 p. (In Russian).
- Gulyaeva A.K., Dolin A.P. Optimization of the busbar parameters. *Radioelektronika, elektrotehnika i energetika* [Electronics, electrical engineering and energy], XXIV International conference, Moscow, 2018, pp. 1033. (In Russian)
- Y. Jiaxin, W. Yang, W. Lei, L. Xiaoyu, L. Huimin and B. Longqing, "Thermal-Dynamic Stability Analysis for the Enclosed Isolated-Phase Bus Bar Based on the Subsegment Calculation Model," in *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, vol. 8, no. 4, pp. 626-634, April 2018.
- Y. Kanno, T. Amemiya, N. Takahashi and N. Kobayashi, "The Short Circuit Electromagnetic Force of the Three-Phase Encapsulated Gas Insulated Bus-Bar," in *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-103, no. 6, pp. 1386-1393, June 1984.
- X. W. Wu, N. Q. Shu, H. T. Li and L. Li, "Contact Temperature Prediction in Three-Phase Gas-Insulated Bus Bars With the Finite-Element Method," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 50, no. 2, pp. 277-280, Feb. 2014, Art no. 7006704.
- Rukovodnyashchie ukazaniya po raschetu tokov korotkogo замыкания i vyboru elektrooborudovaniya : normativnyy dokument* [Guidelines for the calculation of short circuit currents and the selection of electrical equipment: regulatory document], edited by B.N. Neklepavev, Moscow, NTS ENAS Publ., 2004, 150 p. (In Russian)
- Varganova A.V., Panova E.A., Khatyushina T.V., Kononenko V.S., Bagaeva Kh.M. [Development of Electrical Equipment Database of 35-220 kV for "ORU CAD"]. *Electrotechnical Systems and Complexes*, 2018, no. 2(39), pp. 28-33 (In Russian)
- Algorithm for calculating short circuit currents for CAD of substation switchgear. *Nauka i obrazovanie na sovremennom etape razvitiya: opyt, problemy i puti ikh resheniya* [Science and education at the present stage of development: experience, problems and solutions]. Proceedings of the international scientific-practical conference, 2018, pp. 126-130. (In Russian)
- Panova E.A., Varganova A.V., Panarina M.S. Automation of the process of electrical substations design through the development and application of CAD when choosing electrical equipment // 2019 International Russian Automation Conference (RusAutoCon), 2019. P. 8867594. doi: 10.1109/RUSAUTOCON.2019.8867594
- Varganova A.V., Panova E.A., Kushmil' O.E., Panarina M.S. ZRU CAD. Software RF, no. 2019664573.

Панова Е.А., Варганова А.В., Панарина М.С. Автоматизированная проверка однополюсных шин прямоугольного сечения по условиям термической и электродинамической стойкости // *Электротехнические системы и комплексы*. 2020. № 1(46). С. 28-33. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-1\(46\)-28-33](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-1(46)-28-33)

Panova E.A., Varganova A.V., Panarina M.S. Automated Check of Single-bar rectangular Busbars on The Conditions of Thermal and Electrodynamic Withstand. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2020, no. 1(46), pp. 28-33. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-1\(46\)-28-33](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-1(46)-28-33)

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОМПЛЕКСА ПОДЪЕМНЫХ КРАНОВ

Рассмотрена проблема искажения тока сети и большого энергопотребления подъемными кранами с частотно-регулируемым асинхронным электроприводом и промышленными комплексами подъемно-транспортного оборудования. Предложена технология повышения энергетических показателей энергоемкого электротехнического комплекса, характеризующих эффективность потребления и использования электроэнергии. Для повышения КПД за счет перераспределения энергии генераторного торможения между электроприводами и комплексами подъемных кранов выполнено подключение всех индивидуальных, для каждого асинхронного двигателя, автономных инверторов напряжения с входными C -фильтрами к общей выпрямительной подстанции, подобной типовой тяговой подстанции постоянного тока. В состав подстанции входит силовой преобразовательный трансформатор, диодный выпрямительный агрегат и выходной реактор. Для повышения коэффициента мощности силового трансформатора и сети применена коррекция входного тока диодного выпрямительного агрегата посредством активного фильтра тока сети. Кроме этого, предложен алгоритм и разработана система управления, позволяющие, сохраняя синусоидальность тока на входе выпрямительного агрегата, производить переключение транзисторного ШИМ коммутатора активного фильтра тока сети на транзисторный рекуператор по информации о знаке тока в звене постоянного напряжения и состоянию диодов выпрямительного агрегата. Приводятся результаты исследования в среде Matlab физических процессов выпрямительно-инверторного агрегата в составе электротехнического комплекса подъемно-транспортного оборудования.

Ключевые слова: частотно-регулируемый электропривод, диодный выпрямительный агрегат, искажения тока сети, активный фильтр тока сети, рекуператор, потребление электроэнергии, комплекс подъемных кранов.

ВВЕДЕНИЕ

Современное подъемно-транспортное оборудование преимущественно оснащается асинхронным частотно-регулируемым электроприводом на основе преобразователей со звеном постоянного напряжения. Наибольшее практическое применение получили электроприводы, преобразователи частоты которых состоят из диодного выпрямителя с выходным L -фильтром и транзисторного автономного инвертора напряжения (АИН) с входным C -фильтром. Электропривод выполняется с динамическим торможением на балластное сопротивление, коммутируемое транзисторным ключом. При сравнительной простоте и низкой стоимости элементов силовой электроники существенными недостатками данной модификации электропривода являются искажения тока сети и потеря энергии на тормозных резисторах.

Для снижения искажений тока и рационального использования электрической энергии разработаны преобразователи частоты со звеном постоянного напряжения на основе транзисторного выпрямителя с двухсторонним обменом энергии с выходным L -фильтром и транзисторного автономного инвертора напряжения с входным C -фильтром. Электропривод этой модификации способен не только вернуть энергию генераторного торможения в систему электропитания, но и сформировать синусоидальные токи потребления и рекуперацию с регулировкой фазой тока и управляемым коэффициентом мощности сети [1]. К недостатку этой модификации электропривода следует отнести большую стоимость двухкомплектного транзисторного преобразователя применительно к каждому двигателю.

Для группы асинхронных двигателей с частотным регулированием рациональное использование энергии генераторного торможения обеспечивают подключением всех автономных инверторов к общим шинам постоянного напряжения, через которые производится обмен энергией между двигателями. Например, в тяговой сети городского и железнодорожного электрифицированного транспорта снижение тока потребления происходит за счет использования энергии, вырабатываемой при генераторном торможении двигателями встречного подвижного состава [2]. Когда вырабатываемой электроприводами энергии становится больше, чем потребляемой, то целесообразно использовать транзисторный выпрямитель в режиме рекуператора для возврата энергии в питающую сеть. Такое техническое решение предназначают для грузоподъемных механизмов [3].

Результаты исследования систем электроснабжения отдельных предприятий, например тепловой электростанции [4] и горно-обогатительной фабрики [5], подтверждают актуальность мероприятий, направленных на повышение качества электрической энергии в электрических сетях при использовании частотно-регулируемого электропривода. Кроме этого, обширное исследование Российских электрических сетей на соответствие нормам показателей качества электрической энергии показало, что проблема несинусоидальности напряжения и тока характерна для всех регионов Российской Федерации [6].

Для улучшения синусоидальности тока [7-10] применяют пассивные резонансные фильтры, многопульсные схемы выпрямления и активные фильтры. Наиболее перспективным направлением является снижение искажений тока при помощи параллельного активного фильтра тока сети, который представляет собой управляемый источник тока, который генерирует в точке присоединения требуемый ток компенсации.

Для снижения искажений тока в сети и рационального использования энергии генераторного торможения рассматривается схемное решение для комплекса подъемно-транспортного оборудования с частотно-регулируемыми АД. В нем используется общий диодный выпрямитель для питания группы АИН с параллельным активным фильтром на входе выпрямителя. Для рекуперации избыточной энергии генераторного торможения асинхронных машин применен транзисторный выпрямитель с ШИМ в режиме инвертора, ведомого сетью (рекуператор).

Силовые схемы активного фильтра и рекуператора идентичны и состоят из мостового транзисторного коммутатора, индуктивности трехфазного тока и конденсатора постоянного напряжения. Отличие состоит в системах управления.

Разработанная модифицированная система управления по знаку тока в звене постоянного напряжения и состоянию диодов выпрямителя осуществляет перевод транзисторного коммутатора из режима активного фильтра в режим рекуператора, обеспечивая в том и другом случае синусоидальный ток на входе преобразователя.

Целью работы является исследование на блочно-модульной модели физических процессов энергоемкого электротехнического комплекса, получающего питание от сети переменного напряжения через подстанцию с силовым трансформатором, диодным выпрямительным агрегатом и выходным реактором, оснащенную транзисторным преобразователем с возможностью работы как активным фильтром тока сети, так и рекуператором. Для достижения поставленной цели разработана имитационная модель комплекса, где диодный выпрямитель и транзисторный преобразователь образуют выпрямительно-инверторный агрегат, для которого применена специально разработанная модель системы управления [11].

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫПРЯМИТЕЛЬНО-ИНВЕРТОРНОГО АГРЕГАТА

Выпрямительно-инверторный агрегат предназначен для питания группы асинхронных двигателей с частотным регулированием, подключенных через автономные инверторы напряжения к общему звену (шинам) постоянного напряжения. Структурная схема преобразователя изображена на **рис. 1**.

Питание устройства осуществляется от трехфазного силового трансформатора ТС. Электроприводы на базе автономного инвертора напряжения АИН и асинхронного электродвигателя АД, подключаются к шинам постоянного напряжения.

Различаются два режима работы агрегата – выпрямительный и инверторный. В выпрямительном режиме электроприводы питаются от трехфазного выпрямителя Д с встроенным LC-фильтром и низким уровнем пульсаций выпрямленного напряжения, при этом трехфазный коммутатор K_1 замкнут, шунтируя индуктивность L_2 , а ключ K_2 разомкнут и мостовой транзисторный коммутатор Т, совместно с индуктивностью L_1 и конденсатором C_1 , работает как активный фильтр тока, обеспечивая низкий уровень искажений, вносимых выпрямителем в питающую сеть.

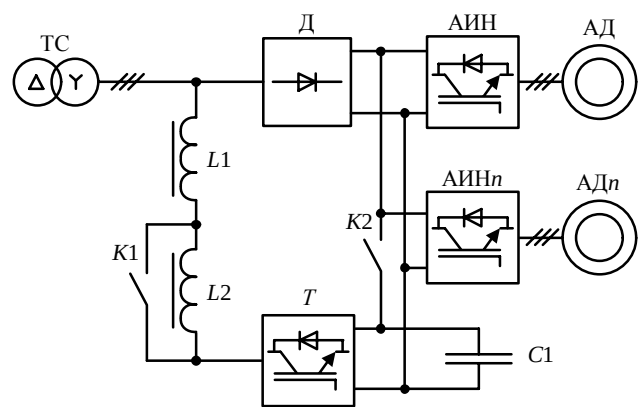


Рис. 1. Структурная схема выпрямительно-инверторного агрегата с общим звеном постоянного напряжения для группы асинхронных двигателей с индивидуальными автономными инверторами напряжения:
ТС – трансформатор силовой; Д – диодный выпрямитель; АИН-АИНn – индивидуальные автономные инверторы напряжения; для группы асинхронных двигателей АД-АДn; L_1 – трехфазная индуктивность; L_2 – трехфазная индуктивность; K_1 – трехфазный коммутатор; Т – транзисторный коммутатор; C_1 – конденсатор коммутатора; K_2 – ключ

В то время, когда электроприводами, подключенными к шинам, генерируется электрическая энергия, она потребляется другими электроприводами, работающими в двигательном режиме, и ток, потребляемый трехфазным выпрямителем, снижается. Когда генерируемой энергии становится больше, чем потребляемой, напряжение в промежуточном звене преобразователя повышается и, являясь обратным для диодов выпрямителя, закрывает их. Одновременно с этим система управления переключает преобразователь в инверторный режим. При этом коммутатор K_1 размыкается, а ключ K_2 замыкается, и энергия из сети постоянного напряжения поступает на транзисторный коммутатор, который совместно с индуктивностью, образованной элементами L_1 и L_2 , работает как ведомый сетью инвертор, обеспечивая возврат энергии из промежуточного звена постоянного напряжения в сеть. Конденсатор C_1 совместно с конденсаторами входных С-фильтров АИН кратковременно выполняет функцию накопителя рекуперированной в сеть энергии. Система управления выпрямительно-инверторного агрегата при помощи соответствующих датчиков получает информацию о мгновенных значениях тока и напряжения и вырабатывает сигналы управления для транзисторов коммутатора. Она также производит необходимые переключения ключей K_1 и K_2 .

Следует отметить важную особенность построения преобразователя применительно к энергоемкому электротехническому комплексу. Она заключается в том, что основной поток нерегулируемой активной мощности, потребляемой энергоемким электротехническим комплексом, проводит диодный выпрямитель, а регулированию подлежит только часть активной мощности сети. При потреблении энергии из сети она регулируется активным фильтром тока сети и необходима для создания антиискажений тока для выпрямителя и реактивной мощности для силового трансформатора, а при рекуперации энергии в сеть только для компенсации реактивной мощности силового трансформатора.

Синхронизированная с сетью система управления выпрямительно-инверторным агрегатом при помощи соответствующих датчиков получает информацию о мгновенных значениях тока и напряжения и вырабатывает управляющие импульсы для транзисторов коммутатора и сигналы управления для переключений ключей K_1 и K_2 , как для режима активного фильтра, так и для режима инвертора, ведомого сетью (рекуператора). Системы управления современных параллельных активных фильтров тока базируются на теории мгновенной мощности [12-14]. Она основана на определении мгновенной мощности во временной области. При этом отсутствуют ограничения на форму тока и напряжения, поэтому такой подход применим для рассмотрения процессов как в установившихся, так и переходных режимах. Для управления транзисторным выпрямителем системы управления строятся на преобразовании координат методом результирующего вектора напряжения и тока [15-17]. При этом часть математических преобразований одинакова для систем управления обоих устройств.

Сигналы управления для транзисторного коммутатора формируются широтно-импульсным модулятором из трехфазной системы координат I'_a , I'_b и I'_c , полученной из системы неподвижных координат I_a и I_b обратным преобразованием Кларка:

$$\begin{bmatrix} I'_a \\ I'_b \\ I'_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Координаты I'_a и I'_b вычисляются в зависимости от режима работы устройства.

Выпрямительный режим. Фазное напряжение трехфазной сети (U_a , U_b и U_c) преобразовывается в систему неподвижных координат U_α и U_β прямым преобразованием Кларка:

$$\begin{bmatrix} U_\alpha \\ U_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Аналогичным образом система трехфазного тока нагрузки (I_a , I_b и I_c) преобразуется в систему координат I_α и I_β :

$$\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}. \quad (3)$$

По найденным величинам U_α , U_β и I_α , I_β производится вычисление мгновенной реальной p и мнимой q мощности согласно выражениям:

$$p = U_\alpha I_\alpha + U_\beta I_\beta; \quad (4)$$

$$q = U_\beta I_\alpha - U_\alpha I_\beta. \quad (5)$$

После того как выделены реальная и мнимая мощности, возможны два алгоритма построения системы компенсации. При первом алгоритме с помощью соответствующих фильтров нижних частот выделяется часть реальной p и мнимой q мощности нагрузки, которая должна быть скомпенсирована. Далее рассчитываются токи I'_α и I'_β :

$$\begin{bmatrix} I'_\alpha \\ I'_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{U_\alpha^2 + U_\beta^2} \begin{bmatrix} U_\alpha & U_\beta \\ U_\alpha & -U_\beta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix}, \quad (6)$$

на основании которых по выражению (1) вычисляются координаты I'_a , I'_b и I'_c , из которых при помощи широтно-импульсного модулятора формируются сигналы управления для транзисторного коммутатора.

При втором алгоритме выделяются части реальной p и мнимой q мощностей нагрузки, которые не должны быть скомпенсированы. Затем аналогичным образом по выражениям (6) и (1) находят координаты I'_α , I'_b и I'_c для формирования сигналов управления транзисторами коммутатора, который работает как активный фильтр тока.

Инверторный режим. В этом режиме система управления осуществляет стабилизацию напряжения на шинах постоянного напряжения и раздельное управление по проекциям реактивного I_y и активного I_x тока сети. Стабилизация напряжения осуществляется регулированием величины вектора I_x , PI-регулятором в соответствии с заданным значением и величиной напряжения на шинах постоянного напряжения. Транзисторный коммутатор не потребляет реактивной мощности при величине тока I_y равным нулю, для управления коэффициентом мощности сети координатой задается опережающий или отстающий реактивный ток. Координаты I_y и I_x преобразуются в систему неподвижных координат I'_α и I'_β в соответствии с уравнениями:

$$I'_\alpha = I_x \cos(\omega_k t) - I_y \sin(\omega_k t); \quad (7)$$

$$I'_\beta = I_y \cos(\omega_k t) + I_x \sin(\omega_k t), \quad (8)$$

где ω_k – скорость вращения вектора относительно неподвижных координат.

Затем по выражению (1) находят координаты I'_a , I'_b и I'_c , и далее при помощи широтно-импульсного модулятора формируют сигналы управления транзисторами.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

На основе математической модели системы управления, в среде имитационного моделирования *Simulink* пакета *Matlab* построена модель электротехнического комплекса с выпрямительно-инверторным агрегатом. Осциллограммы токов в контрольных точках модели изображены на **рис. 2**.

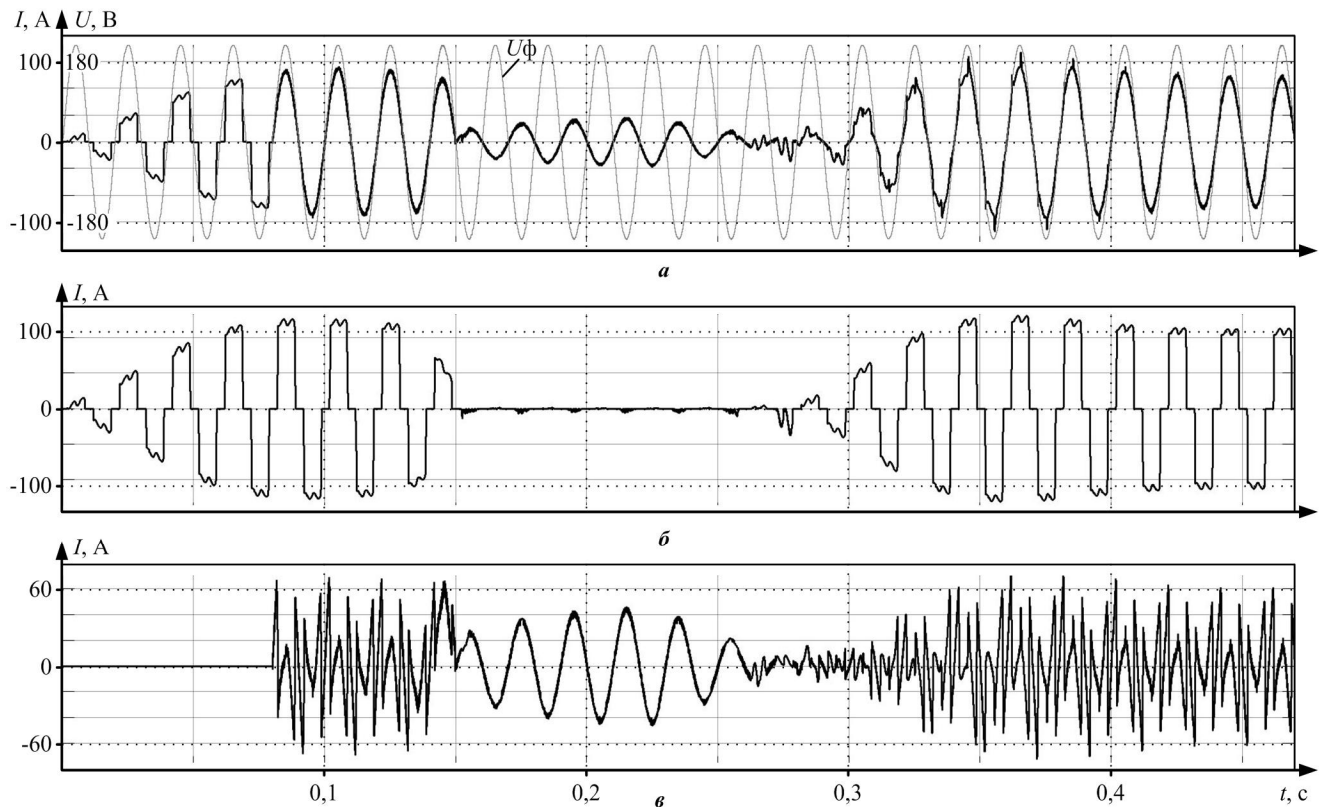


Рис. 2. Осциллограммы: *а* – фазное напряжения и ток сети; *б* – ток на входе диодного выпрямителя; *в* – ток на выходе транзисторного коммутатора

На первом интервале (от 0 до 0,08 с) общее для всех инверторов звено постоянного напряжения получает питание от диодного выпрямителя, при этом закрыты транзисторы коммутатора активного фильтра тока сети и компенсация искажений тока не производится. На втором интервале (от 0,08 до 0,12 с) производится включение активного фильтра тока сети. Он генерирует антиискажения (рис. 2, *в*), и суммарный ток сети (рис. 2, *а*) преобразуется в синусоидальный. На третьем интервале (от 0,12 до 0,25 с) имитируется генераторный режим торможения частотно-регулируемого электропривода, вызывающий рост напряжения на конденсаторе звена постоянного напряжения, которым выключаются диоды выпрямителя.

Выпрямительно-инверторный агрегат переключается в инверторный режим и транзисторный коммутатор с синхронизированной сетью системой управления преобразует постоянный ток в трехфазную систему синусоидальных токов, которые по отношению к напряжению сети находятся в противофазе, но с регулируемым опережающим емкостным характером для компенсации реактивной мощности силового трансформатора. На четвертом интервале (от 0,25 с) система управления снова переключается в выпрямительный режим.

Осциллограммы коэффициентов, характеризующих качество тока сети и эффективность потребления

электроэнергии, полученные при помощи специализированного модуля для исследования энергетических показателей электротехнических устройств [18], изображены на рис. 3.

Искажения тока сети наблюдаются при отключенном транзисторном коммутаторе на первом интервале и при прямом и обратном переключении выпрямительного и инверторного режимов работы устройства. В установившемся режиме коэффициент искажений тока стремится к единице, что свидетельствует о минимальном уровне искажений.

Величина коэффициента мощности в установившихся режимах также близка к единице. Гармонический состав тока питающей сети в разных режимах работы преобразователя, полученный при помощи «Powergui FFT Analysis Tool», приведен в таблице. На первом интервале, при питании электроприводов от выпрямителя с выключенным транзисторным коммутатором наблюдается значительная величина суммарного коэффициента гармонических искажений тока питающей сети (THD), а также гармоник пятого и седьмого порядка. При включении транзисторного коммутатора на втором и четвертом интервалах и при работе устройства в инверторном режиме на третьем интервале величина искажений тока снижается до нормативных значений [19, 20].

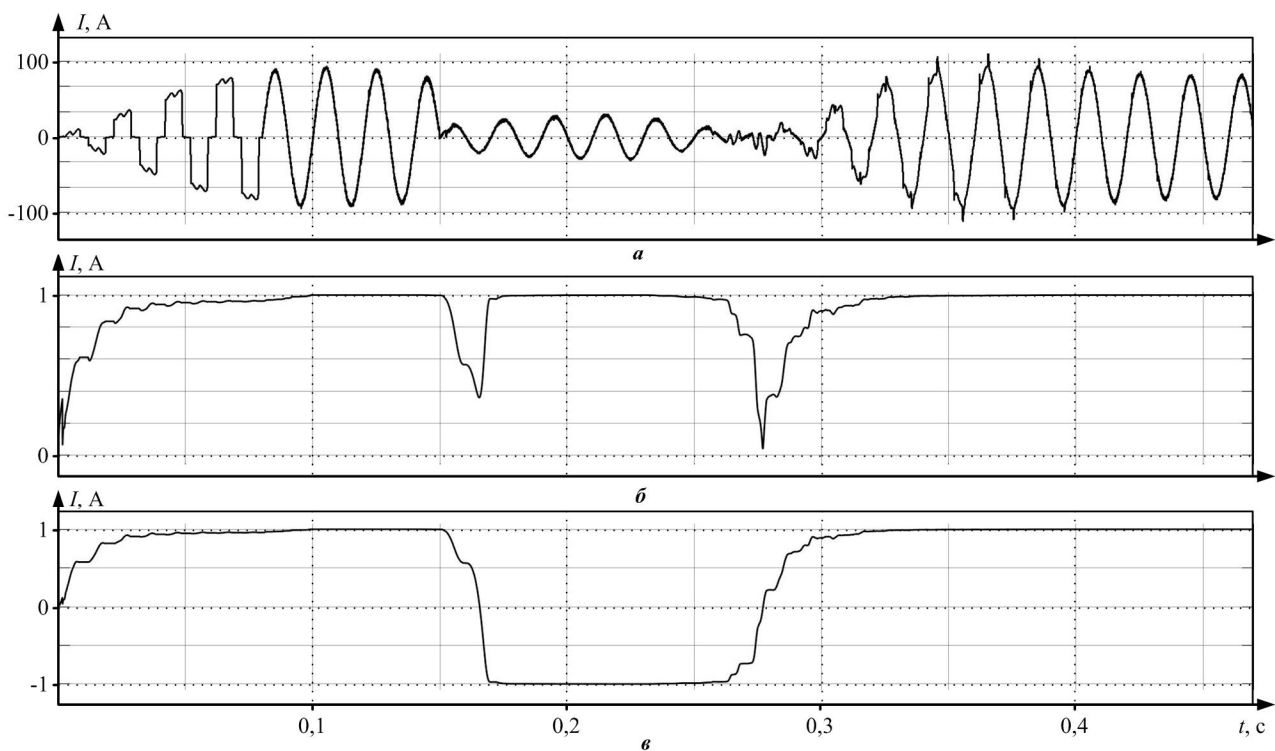


Рис. 3. Характеристики сети: а – фазный ток; б – коэффициент искажения тока; в – коэффициент мощности

Величина гармонических составляющих тока питающей сети для различных режимов работы преобразователя

Гармонические составляющие тока	Номер интервала			
	1	2	3	4
THD	28,2	2,2	3,3	2,4
50 Гц (h1)	100	100	100	100
100 Гц (h2)	1,5	0,2	1,1	0,1
150 Гц (h3)	0,8	0,1	0,5	0,0
200 Гц (h4)	0,7	0,0	0,2	0,1
250 Гц (h5)	20,6	0,3	0,2	0,4
300 Гц (h6)	0,1	0,0	0,2	0,0
350 Гц (h7)	13,2	0,4	0,1	0,4
400 Гц (h8)	0,4	0,0	0,2	0,0
450 Гц (h9)	0,3	0,1	0,2	0,1

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ результатов исследования физических процессов в выпрямительно-инверторном агрегате в составе комплекса подъемных кранов позволил сделать следующие выводы:

1. Численными экспериментами в среде *Matlab* показана возможность прямого и обратного переключения алгоритма работы транзисторного коммутатора у активного фильтра тока сети на рекуператор без всплесков токов и просадок напряжения в сети.
2. Перераспределение энергии генераторного торможения асинхронных двигателей у отдельных механизмов подъемных кранов через инверторы и шины постоянного напряжения между остальными АД энергоемкого комплекса снижает потребление энергии из сети через общий выпрямитель.
3. Подключение к входным зажимам выпрямителя активного фильтра тока сети, устраняющего искажением тока и реактивную мощность силового транс-

форматора, снижает потери в силовом трансформаторе и в сети.

4. Переключение транзисторного коммутатора активного фильтра тока сети в режим рекуператора обеспечивает возврат избыточной энергии генераторного торможения в сеть. При этом диоды выпрямителя заперты обратным напряжением конденсатора *LC*-фильтра, а транзисторный рекуператор создает синусоидальный опережающий ток во вторичной цепи силового трансформатора с компенсацией его реактивной мощности.

5. Выпрямительно-инверторный агрегат устраняет искажения тока сети как при потреблении энергии электротехническим комплексом, так и рекуперации ее в сеть.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Управление качеством электроэнергии слабых сетей посредством активного выпрямителя напряжения / А.С. Плехов, Д.Ю. Титов, Ю.В. Шевырев и др. // Интеллектуальная электротехника. 2018. №1. С. 101–111.
2. Гречишников В.А., Шаламай И.В., Власов С.П. Уменьшение потерь электроэнергии в тяговой сети за счет выравнивания напряжения на шинах тяговых подстанций постоянного тока // Электротехника. 2017. №9. С. 46–48.
3. Пат. 142676 Российская Федерация, МПК В66С 13/22 (2006.01). Система частотно-регулируемых электроприводов для комплекса грузоподъемных кранов / Климаш В.С., Соколовский М.А.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Комсомольский на Амуре государственный технический университет». №2013145059; заявл. 08.10.2013; опубл. 27.06.2014, Бюл. №18.
4. Медведев В.Н. Электромагнитная совместимость высокочастотных преобразователей частоты с сетями электропитания тепловых предприятий // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. 2015. №2. С. 22–29.
5. Харитонов Я.С., Бебихов Ю.В., Егоров А.Н. Сопоставление и анализ результатов контроля качества электроэнергии в системах электроснабжения горных предприятий // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2019. №4. С. 54–59.

6. Качество электрической энергии: современное состояние, проблемы и предложения по их решению / Л.И. Ковверникова, В.В. Суднова, Р.Г. Шамонов и др.; под общей редакцией Н.И. Воробей. Новосибирск: Наука, 2017. 219 с.
7. Aldousari B.F. Power system harmonics // *Int. Journal of Engineering Research and Application*. 2016. Vol. 6, no. 10, pp. 55–61.
8. Harshitha G.B. Simulation studies on autotransformer rectifier unit for aircraft applications // *International Journal of Electrical Engineering & Technology (IJEET)*. 2018. Vol. 9, no. 5, pp. 1–11.
9. Gamit K., Chaudhari K. Multi pulse rectifier using different phase shifting transformers and its THD comparison for power quality issues // *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. 2016. Vol. 3, no. 1, pp. 1025–1033.
10. Akagi H. New trends in active filters for power conditioning // *IEEE Transactions on Industry Applications*. 1996. Vol. 32, no. 6, pp. 1312–1322.
11. Пат. 2713493 Российская Федерация, МПК H02J 5/00 (2006.01). Выпрямитель с активным фильтром / Климаш В.С., Соколовский М.А., Петухов А.В.; заявитель и патентообладатель Климаш В.С., Соколовский М.А. №2019127420; заявл. 25.03.2019; опубл. 05.02.2020, Бюл. №4.
12. Akagi H. Modern active filters and traditional passive filters // *Bulletin of The Polish Academy of Sciences. Technical Sciences*. 2006. Vol. 54, no. 3, pp. 255–269.
13. Sharma U., Kharbanda S. Instantaneous reactive power theory active power line conditioner // *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. 2017. Vol. 4, no. 5, pp. 3302–3305.
14. Герман-Галкин С.Г. Виртуальные лаборатории устройств силовой электроники в среде Matlab-Simulink. Урок 16. Исследование электрической цепи с трехфазным активным фильтром // *Силовая электроника*. 2013. №1. С. 80–86.
15. Ефимов А.А., Шрейнер Р.Т. Активные преобразователи в регулируемых электроприводах переменного тока / под общ. ред. Р.Т. Шрейнера. Новоуральск: Изд-во НГТИ, 2001. 250 с.
16. Новожилов М.А., Пионкевич В.А. Разработка и исследование математических моделей трехфазных мостовых выпрямителей и инверторов // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2019. Т. 23. №3. С. 553–574.
17. Герман-Галкин С.Г. Моделирование устройств силовой электроники. Урок 10. Вторичный источник питания полупроводникового электропривода с рекуперацией энергии в сеть // *Силовая электроника*. 2009. №4. С. 102–107.
18. Климаш В.С., Климаш В.С., Власевский С.В. Специализированные модули для исследования энергетических показателей электротехнических устройств в среде Matlab // *Электротехнические системы и комплексы*. №3(36). С. 11–16.
19. ГОСТ 30804.3.12-2013 (IEC 61000-3-12:2004). Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы, гармонических составляющих тока, создаваемых техническими средствами с потребляемым током более 16 А, но не более 75 А (в одной фазе), подключаемыми к низковольтным распределительным системам электрооборудования. Нормы и методы испытаний. Введ. 01.01.2014. М.: Стандартинформ, 2014. 28 с.
20. IEEE Std 519-2014. IEEE Recommended practice and requirements for harmonic control in electric power systems. Approved 27.03.2014. IEEE-SA Standards Board. 2014. 17 p.

Поступила в редакцию 18 января 2020 г.

INFORMATION IN ENGLISH

IMPROVING THE ENERGY EFFICIENCY OF A LIFTING CRANE COMPLEX

Vladimir S. Klimash

D.Sc. (Engineering), Professor, the Department of Industrial Electronics, Komsomolsk-on-Amur State University, Komsomolsk-on-Amur, Russia. E-mail: klimash@yandex.ru.

Mikhail A. Sokolovskii

Postgraduate student, the Department of Industrial Electronics, Komsomolsk-on-Amur State University, Komsomolsk-on-Amur, Russia. E-mail: Socel@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7311-5584>.

The problem of network current distortion and high power consumption by lifting valves with frequency-controlled asynchronous electric drive and industrial complexes of lifting and transport equipment is considered. The technology of increasing energy indices of the energy-intensive electrical complex characterizing efficiency of electric power consumption and use is proposed. In order to increase the efficiency due to redistribution of energy of generator braking between electric drives and the complex of lifting cranes are all individual, for each asynchronous motor, independent voltage inverters with input C-filters are connected to common rectifying substation similar to standard DC traction substation. A substation consists of a power converter transformer, a diode rectifier unit and an output reactor. To increase the power factor of the power transformer and network, correction of input current of diode rectifier unit is applied by means of an active filter of network current. In addition, an algorithm is proposed and a control system is developed, which makes it possible to maintain sinusoidality of current at the input of the rectifier unit, to switch the transistor PWM of the switch of the active current filter of the network to the transistor recuperator according to the information

on the sign of current in the DC voltage link and the state of diodes of the rectifier unit. The results of research in Matlab environment of physical processes of rectifier-inverter unit as part of electrical complex of lifting and transportation equipment are given.

Keywords: frequency-controlled electric drive, diode rectifier unit, network current distortions, active network current filter, recuperator, electric power consumption, complex of lifting cranes.

REFERENCES

1. Plekhov A.S., Titov D.Yu., Shevryev Yu.V., et al. Power quality management of weakness networks by active voltage rectifier. *Intellektualnaya Elektrotehnika* [Smart electrical engineering], 2018, no. 1, pp. 101–111. (In Russian)
2. Grechishnikov V.A., Shalamai I.V., Vlasov S.P. Energy loss saving in the electric-traction network due to voltage grading in the buses of DC traction substation. *Elektrotehnika* [Electrical equipment], 2017, no. 9, pp. 46–48. (In Russian)
3. Klimash V.S., Sokolovskii M.A. *Sistema chastotno-reguliruemyykh elektroprivodov dlya kompleksa gruzopodъемnykh*

- krarov [System of frequency-controlled electric drives for complex of lifting cranes]. Patent RF, no. 142676, 2014.
4. Medvedev V.N. Electromagnetic compatibility of high-voltage frequency converters with power plant networks. *Elektrotehnika: setevoy elektronnyi nauchnyi zhurnal* [Russian Internet Journal of Electrical Engineering], 2015, no. 2, pp. 22–29. (In Russian)
5. Kharitonov Ya.S., Bebikhov Yu.V., Egorov A.N. Analysis of quality control in power supply systems of mining enterprises. *Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh i fundamentalnykh issledovaniy* [International Journal of Applied and Fundamental Research], 2019, no. 4, pp. 54–59. (In Russian).
6. Kovernikova L.I., Sudnova V.V., Shamonov R.G. et al. *Kachestvo elektricheskoi energii: sovremennoe sostoyanie, problemy i predlozheniya po ikh resheniyu* [Quality of electric energy: current state, problems and proposals to solve them]. Novosibirsk, Nauka, 2017. (In Russian)
7. Aldousari B.F. Power system harmonics. *Int. Journal of Engineering Research and Application*. 2016, no. 6(10), pp. 55–61.
8. Harshitha G.B. Simulation studies on autotransformer rectifier unit for aircraft applications. *International Journal of Electrical Engineering & Technology (IJEET)*. 2018, no. 9(5), pp. 1–11.
9. Gamit K., Chaudhari K. Multi pulse rectifier using different phase shifting transformers and its THD comparison for power quality issues. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. 2016, no. 3(1), pp. 1025–1033.
10. Akagi H. New trends in active filters for power conditioning. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 1996, no. 32(6), pp. 1312–1322.
11. Klimash V.S., Sokolovskii M.A., Petukhov A.V. *Vypriamitel s aktivnym filtrom* [Rectifier with active filter]. Patent RF, no. 2713493, 2020.
12. Akagi H. Modern active filters and traditional passive filters. *Bulletin of The Polish Academy of Sciences. Technical Sciences*. 2006, no. 54(3), pp. 255–269.
13. Sharma U., Kharbanda S. Instantaneous reactive power theory active power line conditioner. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. 2017, no. 4(5), pp. 3302–3305.
14. German-Galkin S.G. Virtual laboratories of power electronics devices in Matlab-Simulink. Lesson 16. Investigation of an electric circuit with a three-phase active filter. *Silovaya elektronika* [Power electronics]. 2013, no. 1, pp. 80–86. (In Russian)
15. Efimov A.A., Shreiner R.T.; Shreiner R.T., editors. *Aktivnye preobrazovateli v reguliruemyykh elektroprivodakh peremennogo toka* [Active converters in adjustable AC electric drives]. Novouralsk, NGTI, 2001. (In Russian)
16. Novozhilov M.A., Pionkevich V.A. Development and study of mathematical models of three-phase bridge rectifiers and inverters. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University]. 2019, no. 23(3), pp. 553–574. (In Russian). doi: 10.21285/1814-3520-2019-3-553-574
17. German-Galkin S.G. Simulation of power electronics devices. Lesson 10. Secondary power source of a semiconductor electric drive with regeneration of energy into the network. *Silovaya elektronika* [Power electronics]. 2009, no. 4, pp. 102–107. (In Russian)
18. Klimash S.V., Klimash V.S., Vlasayevsky S.V. Specialized modules for calculation of energy coefficients of electrical engineering devices in Matlab. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes]. 2017, no. 3(36), pp. 11–16. (In Russian). doi: 10.18503/2311-8318-2017-3(36)-11-16
19. GOST 30804.3.12-2013 (IEC 61000-3-12:2004). Electromagnetic compatibility of equipment. Rates of current harmonic components caused by equipment with current consumption of more than 16 A but no more than 75 A (in a single phase) switched to low voltage distribution power-supply systems. Rates and testing methods. Moscow, Standartinform, 2014. 28 p. (In Russian)
20. IEEE Std 519-2014. IEEE Recommended practice and requirements for harmonic control in electric power systems. Approved 27.03.2014. IEEE-SA Standards Board. 2014. 17 p.

Климаш В.С., Соколовский М.А. Повышение энергетической эффективности комплекса подъемных кранов // Электротехнические системы и комплексы. 2020. № 1(46). С. 34–40. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-1\(46\)-34-40](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-1(46)-34-40)

Klimash V.S., Sokolovskii M.A. Improving the Energy Efficiency of a Lifting Crane Complex. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2020, no. 1(46), pp. 34–40. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-1\(46\)-34-40](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-1(46)-34-40)

Корнилов Г.П., Кожевников И.О., Косматов В.И., Храмшин Т.Р., Храмшин Р.Р.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

РЕЗЕРВЫ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ МОЩНЫХ СИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРИВОДОВ

Развитие силовой электроники и микропроцессорной техники способствовало тому, что регулируемый электропривод на основе синхронных и асинхронных двигателей стал преобладающим в металлургической отрасли. Но сохраняется большое количество мощных синхронных двигателей (СД) в составе нерегулируемых электроприводов. При существующей технологии металлургического производства большинство сетевых синхронных двигателей сохранится в обозримом будущем и вопросы их эффективного использования как энергоемких потребителей остаются актуальными и практически значимыми. В статье рассмотрены нереализованные резервы экономии электроэнергии мощных синхронных двигателей прокатного производства. Сформулированы требования, предъявляемые к системам автоматического регулирования возбуждения (АРВ) СД прокатных станов, это обеспечение устойчивого, быстро затухающего характера переходного процесса при ударном приложении нагрузки, а также минимизация суммарных электрических потерь в статоре и обмотке возбуждения двигателя. Рассмотрены варианты построения систем возбуждения синхронных двигателей с силоизмерительным датчиком, а также косвенным методом по сигналам напряжения и тока преобразовательного агрегата. Выполнена оценка экономии электрической энергии (мощности) для режимов работы под нагрузкой и на холостом ходу. Обосновано, что у агрегатов с немотивированной работой двигателя на холостом ходу во время длительных технологических простоев основного оборудования для снижения потерь электроэнергии рекомендуется внедрение устройства плавного пуска синхронных двигателей.

Ключевые слова: синхронный двигатель, автоматическое регулирование возбуждения, прокатное производство.

ВВЕДЕНИЕ

Благодаря мощному развитию силовой электроники и микропроцессорной техники регулируемый электропривод на основе синхронных и асинхронных двигателей стал преобладающим во всех отраслях промышленности, в том числе и металлургической. Вместе с тем сохраняется большое количество мощных нерегулируемых электроприводов, выполненных на базе сетевых синхронных двигателей мощностью 1-20 МВт и напряжением 6-10 кВ. Такие машины используют в качестве приводных двигателей черновых клетей прокатных станов, турбокомпрессоров кислородных станций, а также в составе преобразовательных агрегатов. Можно предположить, что при существующей технологии металлургического и, в частности, прокатного производства значительная часть мощных сетевых синхронных двигателей сохранит свой статус и в обозримом будущем, а вопросы их эффективного использования, как наиболее энергоемких потребителей, будут решаться с учетом режимов работы по мере совершенствования элементной базы и принципов управления такими объектами.

ОСНОВНЫЕ ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ

В зависимости от характера нагрузки выделяют синхронные двигатели с резкопеременной и с практически постоянной нагрузкой. Основные требования, предъявляемые к системам автоматического регулирования возбуждения (АРВ) были сформулированы ранее в [1] следующим образом:

- АРВ должно обеспечивать устойчивую работу СД при заданных режимах нагрузки;
- АРВ СД должно способствовать поддержанию нормального (оптимального) напряжения в узле

нагрузки, к которому он присоединен, при допустимом тепловом режиме;

– АРВ должно обеспечивать минимум потерь электрической энергии в двигателе и в элементах системы электроснабжения, если это не противоречит первым двум пунктам.

Нетрудно заметить, что эти положения не могут быть реализованы одновременно, так как исключают друг друга. Например, обеспечение устойчивой работы СД предполагает регулирование активной составляющей тока статора за счет усиления демпфирования качания ротора, а поддержание напряжения в точке подключения СД может быть реализовано за счет регулирования реактивного тока статора. Поэтому на практике обычно выбирают один обобщенный критерий качества с учетом характера нагрузки и выбора приоритетов. Для СД прокатных станов большое значение имеет устойчивый, быстро затухающий характер переходного процесса при ударном приложении нагрузки, а также суммарные электрические потери в статоре и обмотке возбуждения двигателя.

Успешное практическое внедрение различных типов АРВ для СД прокатных станов было подготовлено глубокими теоретическими исследованиями, проведенными ранее учеными Уральского политехнического института [2-3], ВНИИ электропривода [4] и другими [5-6].

Для улучшения демпфирования СД с резкопеременной нагрузкой в системах АРВ часто используют основные входные величины самого СД – статорный ток и напряжение. По этим величинам выделяют контролируемые параметры – внутренний угол нагрузки θ , активную и реактивную мощности, угол φ и т.п. Возможен также и другой путь – это установка дополнительных датчиков в двигателе [7], на рабочем валу или в исполнительном механизме для измерения угла θ или прикладываемого статического момента.

Здесь уместны следующие замечания:

– синхронный двигатель как объект регулирования представляет собой колебательное звено с малым коэффициентом затухания и поэтому эффективность обратных связей в улучшении динамики по выходным координатам двигателя весьма ограничена;

– установка дополнительных датчиков в двигателе и на валу не практикуется из-за усложнения конструкции и снижения надежности.

Исследования режимов работы СД, проведенные ранее на одном из крупнейших металлургических предприятий, показали, что большая часть приводов оборудованы аналоговыми системами АРВ и работают в разомкнутой системе, то есть с постоянным током возбуждения, близким к номинальному. Исключение составили приводные двигатели черновых клетей широкополосного стана горячей прокатки, где задействован корректирующий сигнал, пропорциональный внешнему возмущающему воздействию – прикладываемому статическому моменту. На этом примере стоит остановиться подробнее.

В качестве датчика момента первоначально был использован силоизмерительный элемент – месдоза [8]. Она крепилась на станине под подушкой опорного вала и формировала сигнал, пропорциональный давлению на валки (рис. 1), а момент прокатки, как известно, линейно зависит от этого усилия.

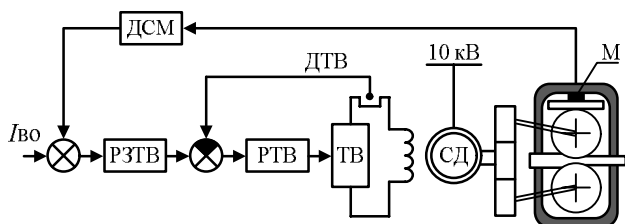


Рис. 1. Принципиальная схема системы возбуждения СД с силоизмерительным датчиком – месдозой:
РЗТВ – регулятор задания тока возбуждения;
ДСМ – датчик статического момента с месдозой (М);
ТВ – тиристорный возбудитель; ДТВ, РТВ – датчик и регулятор тока возбуждения

В современных автоматизированных системах управления механизмами прокатного стана величину статического момента рассчитывают программно по карте прокатки и в зависимости от нагрузки формируют задание на приращение тока возбуждения.

На осциллограмме (рис. 2) показано изменение токов статора и возбуждения СД черновой клетки того же стана горячей прокатки, где ранее стояли месдозы. Отметим, что для повышения устойчивости работы двигателя при набросе нагрузки ток возбуждения во время прокатки на 20-30% выше номинального значения, но с учётом того, что это время не превышает 10-15% времени цикла, среднеквадратичное значение тока возбуждения за цикл прокатки находится на уровне 60-65% номинального значения. Суммарные электрические потери в статоре и обмотке возбуждения при таком регулировании также существенно ниже номинальных. Работавшую на стане горячей прокатки систему АРВ синхронных двигателей, безусловно, следует признать энергоэффективной. Рассмотрим другой пример, где мощные двигатели преобразовательных агрегатов работают с постоянным током возбуждения.

Для СД преобразовательных агрегатов измерение момента (мощности) на валу двигателя не вызывает затруднений и может быть легко реализовано по току и напряжению приводного двигателя постоянного тока [9], как показано на рис. 3. Здесь сигналы с датчиков тока (ДТ) и напряжения (ДН) формируют на выходе блока перемножения сигнал, пропорциональный мощности (моменту) на валу СД. Но на практике предлагаемая система не реализована по причине морального и физического износа тиристорных возбудителей.

Для металлургических агрегатов и машин, у которых коэффициент включения заметно ниже единицы, такой простой параметрический способ регулирования возбуждения в зависимости от статической нагрузки на валу мог бы обеспечить значительную экономию электроэнергии за счет снижения потерь активной мощности при работе на холостом ходу ΔP_{xx} и под нагрузкой ΔP_{II} .

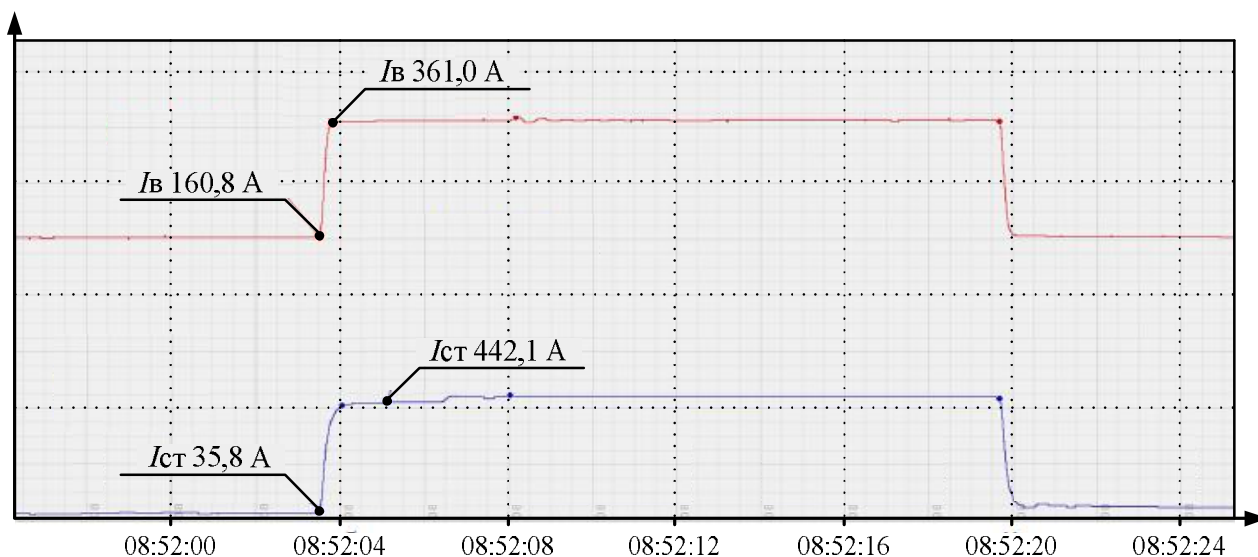


Рис. 2. Изменение тока статора и тока возбуждения синхронного двигателя черновой клетки прокатного стана

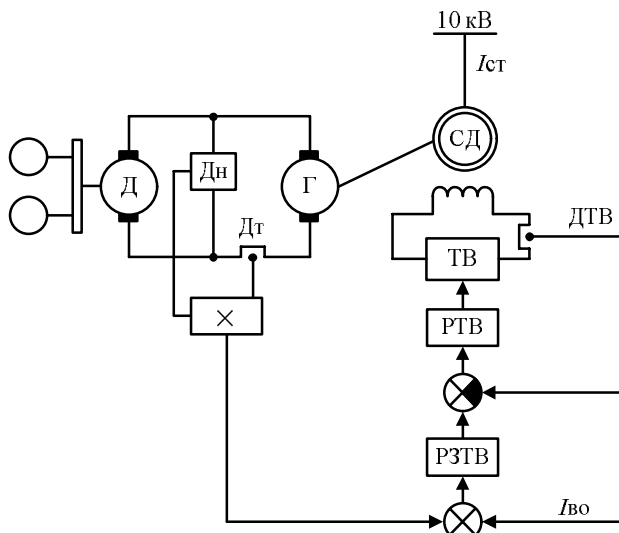


Рис. 3. Схема АРВ-СД преобразовательного агрегата

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

Используя U -образные характеристики синхронного двигателя, нетрудно рассчитать искомые величины.

Так, например, для действующего четырехклетьевого прокатного стана, где в составе преобразовательного агрегата работает двигатель типа СДСЗ 19-125-16 (его технические данные приведены в **таблице**), а U -образные характеристики на **рис. 4**, рассчитаем снижение потерь в двигателе на холостом ходу и под нагрузкой при переходе от ручного регулирования с постоянным током возбуждения $I_{вр} = 400$ А на автоматическое.

$$\Delta P_{xx} = 3R_{ст}(I_{сop}^2 - I_{coa}^2) + R_{в}(I_{вр}^2 - I_{ва}^2), \quad (1)$$

где $R_{ст}$, $R_{в}$ – сопротивления обмоток статора и возбуждения; $I_{сop}$, I_{coa} – токи статора при ручном и автоматическом регулировании на холостом ходу (коэффициент загрузки $\beta = 0$).

$$\Delta P_{н} = 3R_{ст}(I_{ср}^2 - I_{ca}^2) + R_{в}(I_{вр}^2 - I_{ва}^2), \quad (2)$$

где $I_{ср}$, I_{ca} – токи статора при ручном и автоматическом регулировании при работе с коэффициентом загрузки $\beta = 0,5$.

Данные синхронного двигателя СДСЗ 19-125-16

Наименование	Величина
Номинальная мощность	18500 кВт
Номинальная скорость	375 об/мин
Номинальный ток статора	1100 А
Номинальное напряжение статора	10500 В
Номинальный коэффициент мощности	0,95
Номинальное напряжение возбуждения	220 В
Сопротивление фаз обмоток статора	0,019 Ом
Сопротивление обмотки возбуждения	0,3265 Ом
Ток возбуждения холостого хода	315 А
Синхронное индуктивное сопротивление по продольной оси	0,905
Синхронное индуктивное сопротивление по поперечной оси	0,6

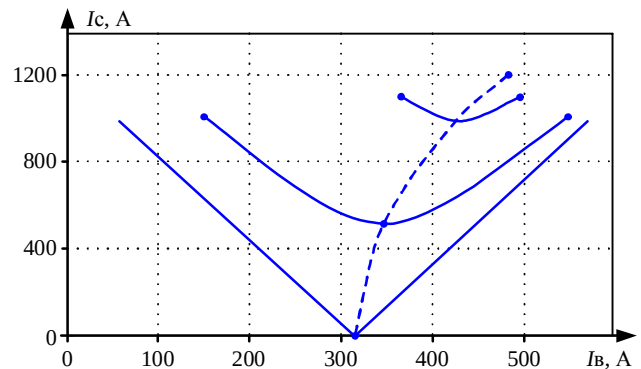


Рис. 4. U -образная характеристика двигателя СДСЗ

Примем $I_{ва} = 350$ А, $I_{ca} = 500$ А – это значит, что система АРВ настроена таким образом, чтобы сетевой ток двигателя во время прокатки был чисто активным, то есть $\cos \phi = 1$ (см. **рис. 4**), поскольку выработка реактивной мощности СД прокатных стансов с низкой частотой вращения не всегда является экономически целесообразной. В результате вычислений получены искомые величины $\Delta P_{xx} = 25,5$ кВт, $\Delta P_{н} = 18,5$ кВт.

Построение U -образных характеристик – зависимости тока статора от тока возбуждения при различных значениях нагрузки (момента на валу двигателя) – заслуживает отдельного рассмотрения. Их получают либо в результате эксперимента на действующем оборудовании, либо аналитически с помощью векторных диаграмм [10]. Приведенные на **рис. 4** характеристики получены по оригинальной методике, предложенной в [11].

Значительная экономия электроэнергии при эксплуатации мощных синхронных двигателей может быть достигнута за счет применения устройств плавного пуска. Эта экономия определяется не условиями и способом пуска, поскольку затраченная энергия в этом случае зависит исключительно от момента инерции и конечной скорости. Существенные потери мощности ΔP_0 и, соответственно, энергии обусловлены в основном немотивированной работой двигателя на холостом ходу во время длительных технологических простоев основного оборудования.

$$\Delta P_0 = 3R_{ст}I_{co}^2 + R_{в}I_{вр}^2. \quad (3)$$

На практике мощные сетевые синхронные двигатели отключают достаточно редко, чтобы избежать нежелательных последствий прямого пуска от сети в асинхронном режиме – увеличения тока в 5-6 раз по отношению к номинальному и, как следствие, значительных просадок питающего напряжения в точке подключения СД. Для двигателя, технические данные которого определены в **таблице**, мощность, потребляемая на холостом ходу, во время останова стана составит 58 кВт.

Из теоретически возможных и практически реализованных способов мягкого пуска мощных синхронных двигателей заслуживают внимания следующие варианты:

- пуск с пониженным напряжением, формируемым тиристорным регулятором напряжения (ТРН) [12];
- пуск по схеме вентильного двигателя с зависимым инвертором тока [13];
- пуск с преобразователем частоты [14, 15].

Вопросы, касающиеся обоснованного выбора пускового устройства и его адаптации к конкретным условиям работы синхронных двигателей, заслуживают отдельного рассмотрения в будущем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрены примеры эффективного использования систем автоматического регулирования возбуждения мощных синхронных двигателей прокатного стана, которые одновременно обеспечивают устойчивую работу при набросе нагрузки и снижение электрических потерь в обмотках статора и возбуждения.

Использование системы APV для СД, входящих в состав преобразовательных агрегатов, с помощью рассмотренного в статье параметрического метода регулирования возбуждения в зависимости от статической нагрузки на валу создаёт условия значительного снижения потерь активной мощности. Это снижение потерь нетрудно рассчитать с помощью U-образных характеристик действующего синхронного двигателя прокатного стана.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Логинов С.И., Михайлов В.В. Всесоюзное совещание по автоматическому регулированию и систем возбуждения синхронных двигателей // *Электричество*. 1964. №7.
2. Вейнгер А.М., Янко-Триницкий А.А. Критерий качества автоматического регулирования возбуждения крупных синхронных двигателей // *Инструктивные указания Тяжпромэлектропроект*. 1967. №7.
3. Вейнгер А.М., Янко-Триницкий А.А. Приближенный закон оптимального регулирования возбуждения крупных синхронных двигателей // *Инструктивные указания Тяжпромэлектропроект*. 1968. № 12.
4. Вайнтруб О.Ш., Вейнгер А.М., Гендельман Б.Р. Система управления синхронным двигателем с подчиненной структурой регулирования // *Электричество*. 1975. №4.
5. Корнилов Г.П., Шурыгина Г.В., Самохин Ю.А. Управление возбуждением синхронного двигателя преобразовательного агрегата с резкопеременной нагрузкой // *Промышленная энергетика*. 1990. №3. С. 24-26.
6. Корнилов Г.П., Карандаев А.С., Шурыгина Г.В. Оптимальное регулирование возбуждения синхронного двигателя // *Промышленная энергетика*. 1990. №8. С. 24-25.
7. Фомин Д.В., Косматов В.И. Исследование режимов синхронного двигателя с автоматическим регулированием возбуждения в функции внутреннего угла методами промышленного испытания // *Сборник трудов IV международной конференции по автоматизированному электроприводу*. Ч.1. Магнитогорск. 2004. С. 287-291.
8. Анализ систем возбуждения мощных синхронных двигателей металлургических приводов / Семёнов Е.А., Корнилов Г.П., Храмшин Т.Р., Чигвинцев Е.Н. // *Электроприводы переменного тока: труды Международной тринадцатой научно-технической конференции*. Екатеринбург: УГТУ – УПИ, 2005. С. 286-287.
9. А.с. 1339862. Устройство для автоматического регулирования возбуждением синхронного двигателя преобразовательного агрегата / Корнилов Г.П., Шурыгина Г.В., Карандаев А.С. Оpubл. в Б.И. 1987, №35.
10. Иванов–Смоленский А.В. *Электрические машины: учебник для вузов*. Т.2. М.: Изд-во МЭИ, 2004.
11. Першин Ю.С., Першина Л.М. Расчет оптимального режима работы синхронного двигателя // *Электричество*. 1981. №9.
12. Басков С.Н., Давыдкин М.Н., Коньков А.С. Устройство плавного пуска высоковольтного синхронного двигателя с векторно-импульсным управлением // *Известия ТулГУ. Технические науки*. Ч.3. 2010. №3.
13. Кабанов П.С., Каспаров Э.А. Пути создания мощных синхронных компенсаторов продольно-поперечного возбуждения // *Электричество*. 1984. №9.
14. Xiaolu Li, J. Kou, Xiao Han, Q. Gao, Gang Li and D. Xu, "Research on soft starting control strategy for LCI-fed synchronous motor," 2016 IEEE 8th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC-ECCE Asia), Hefei, 2016, pp. 1858-1862.
15. Castagnini A., Kansakangas T., Kolehmainen J. and Termini P.S., "Analysis of the starting transient of a synchronous reluctance motor for direct-on-line applications," 2015 IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC), Coeur d'Alene, 2015, pp. 121-126.

Поступила в редакцию 15 января 2020 г.

INFORMATION IN ENGLISH

RESERVES FOR POWER SAVING OF SYNCHRONOUS MOTORS AS A PART OF METALLURGICAL DRIVES

Gennadiy P. Kornilov

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

Igor O. Kozhevnikov

Foreman of vocational training, Department no. 1 "Information Technology", Polytechnical College, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Valeriy I. Kosmatov

Ph.D. (Engineering), Professor, Department of Automated Electrical Drive and Mechatronics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Timur R. Khramshin

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Electric Power Supply of Industrial Enterprises Department, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: timur.hramshin@mail.ru.

Rifhat R. Khramshin

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Electric Power Supply of Industrial Enterprises Department, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: hramshinrr@mail.ru.

Evolution of power electronics and microprocessor technology has contributed to the situation when an adjustable electric drive based on synchronous and asynchronous motors has become predominant in metallurgical industry. However, a large number of nonadjustable powerful synchronous motors (SM) are still in operation. With the existing technology of metallurgical industry, most powerful synchronous motors will remain in the near future and the issues of their effective use as energy-intensive consumers as remain relevant and practically significant. The article discusses the unrealized reserves for power saving of powerful SM for rolling production. The paper states the requirements to the automatic excitation control system of synchronous motors of rolling mills; these requirements include provision of stable, rapidly damping character of the transient process during impulse loads and minimization of total electric losses in the stator and in the motor field. The paper considers different options for design of the excitation systems of synchronous motors with a force-measuring transducer as well as excitation by the indirect method, by the signals of the voltage and the current of the converting unit. Assessment of electric energy saving was carried out for operating modes, for on-load operation and for idle running. The practice was justified when the unit with the unmotivated idle operation of the motor during long operational delays of the capital equipment was equipped with soft starters to reduce power losses.

Keywords: synchronous motor, automatic excitation control, rolling production.

REFERENCES

1. Loginov S.I., Mikhailov V.V. All-Union conference on automatic control and excitation systems synchronous motors. *Elektrichestvo* [Electricity], no. 7, 1964. (In Russian)
2. Veinger A.M., Yanko-Trinititskii A.A. Quality factor of automatic excitation control of large synchronous motors. *Instruktivnye ukazaniya Tyazhpromelektroproekt* [Implementing guidance of Tyazhpromelektroproekt], no. 7, 1967. (In Russian)
3. Veinger A.M., Yanko-Trinititskii A.A. Approximate law of optimizing excitation control of large synchronous motors. *Instruktivnye ukazaniya Tyazhpromelektroproekt* [Implementing guidance of Tyazhpromelektroproekt], no. 12, 1968. (In Russian)
4. Vaintrub O.Sh., Veinger A.M., Gendelman B.P. Control system of a synchronous motor with subordinate control system. *Elektrichestvo* [Electricity], no. 4, 1975. (In Russian)
5. Kornilov G.P., Shurygina G.V., Samokhin Yu.A. Excitation control of a synchronous motor of a converting unit with abruptly variable load. *Promyshlennaya energetika* [Industrial power engineering], no. 3, 1990, pp. 24-26. (In Russian)
6. Kornilov G.P., Karandaev A.S., Shurygina G.V. Optimizing excitation control of a synchronous motor. *Promyshlennaya energetika* [Industrial power engineering], no. 8, 1990, pp. 24-25. (In Russian)
7. Fomin D.V., Kosmatov V.I. Operating modes of a synchronous motor with automatic excitation control as a function of a torque angle using commercial test methods. *Sbornik trudov IV mezhdunarodnoy konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu* [Collection of scientific paper of IV international conference on automatic electric drive]. Part 1. Magnitogorsk, 2004, pp. 287-291. (In Russian)
8. Semenov E.A., Kornilov G.P., Khramshin T.R., Chigvintsev E.N. Analysis of excitation systems of power synchronous motors of metallurgical drives. *Elektroprivody peremennogo toka: Trudy mezhdunarodnoy trinatsetsatoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [AC electric drives: Papers of the international thirteenth scientific and technical conference]. Yekaterinburg: UGTU – UPI, 2005, pp. 286-287.
9. Kornilov G.P., Shurygina G.V., Karandaev A.S. A.S. 1339862 *Ustroystvo dlya avtomaticheskogo regulirovaniya vzbuzhdeniem synkhronnogo dvigatelya preobrazovatel'nogo agregata* [A.S. 1339862 Device for automatic excitation control of a synchronous motor of a converting unit]. Published in B.I., no. 35, 1987. (In Russian)
10. Ivanov-Smolenskii A.V. *Elektricheskie mashiny* [Electrical machines]: Textbook for Universities. Vol. 2. M.: Publishing house of MEI, 2004. (In Russian)
11. Pershin Yu.S., Pershina L.M. Calculation of the optimum operation of a synchronous motor. *Elektrichestvo* [Electricity], no. 9, 1981. (In Russian)
12. Baskov S.N., Davydkin M.N., Konkov A.S. Soft start device for a high voltage synchronous motor with a vector-pulse control. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki* [Proceedings of TulGU. Technical sciences]. Part 3, no. 3, 2010. (In Russian)
13. Kabanov P.S., Kasparov E.A. Development of power synchronous compensators of direct-and-quadrature axes excitation. *Elektrichestvo* [Electricity], no. 9, 1984. (In Russian)
14. Xiaolu Li, J. Kou, Xiao Han, Q. Gao, Gang Li and D. Xu, "Research on soft starting control strategy for LCI-fed synchronous motor," 2016 IEEE 8th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC-ECCE Asia), Hefei, 2016, pp. 1858-1862.
15. Castagnini A., Kansakangas T., Kolehmainen J. and Termini P.S., "Analysis of the starting transient of a synchronous reluctance motor for direct-on-line applications," 2015 IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC), Coeur d'Alene, 2015, pp. 121-126.

Резервы энергосбережения мощных синхронных двигателей металлургических приводов / Г.П. Корнилов, И.О. Кожевников, В.И. Косматов, Т.Р. Храмшин, Р.Р. Храмшин // Электротехнические системы и комплексы. 2020. № 1(46). С. 41-45. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-1\(46\)-41-45](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-1(46)-41-45)

Kornilov G.P., Kozhevnikov I.O., Kosmatov V.I., Khramshin T.R., Khramshin R.R. Reserves for Power Saving of Synchronous Motors as a Part of Metallurgical Drives. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2020, no. 1(46), pp. 41-45. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-1\(46\)-41-45](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-1(46)-41-45)

СИСТЕМА ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ШЛАКА ПРИ ВЫПУСКЕ МЕТАЛЛА ИЗ КИСЛОРОДНОГО КОНВЕРТЕРА ПО ИНТЕНСИВНОСТИ ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ РАСПЛАВА

Одним из резервов повышения конкурентоспособности отечественной продукции на мировом рынке черной металлургии является повышение эффективности сталеплавильных агрегатов и качества изделий или продукта за счет минимизации объема печного шлака в сталеразливочном ковше. Последнее достигается посредством непрерывного наблюдения, в основном визуального, за потоком расплава на стадии его выпуска из ванны кислородного конвертера в сталеразливочный ковш. В работе приведены результаты экспериментальных исследований и статистической обработки массивов данных интенсивности инфракрасного излучения потока расплава на действующих сталеплавильных агрегатах в различных технологических интервалах выпуска стали. Доказано, что в качестве диагностического признака наличия шлака в выпускаемом расплаве можно применять математическое ожидание инфракрасного излучения расплава. Определены диагностические условия наблюдения шлака в выпускаемом расплаве по изменению интенсивности излучения. Предложены методика и алгоритм расчета диагностических условий наблюдения шлака в расплаве для отечественных кислородных конвертеров. Приведены результаты промышленной апробации результатов исследования.

Ключевые слова: система диагностирования, кислородный конвертер, инфракрасное излучение, выпуск стали, мониторинг.

ВВЕДЕНИЕ

Процесс производства стали в кислородном конвертере заключается в продувке кислородом жидкого чугуна с помощью кислородной фурмы. При продувке окисляются примеси чугуна, продукты реакций переходят в газовую фазу или шлак. Завершающей стадией производства стали в кислородном конвертере является процесс выпуска стали в сталеразливочный ковш. Наиболее важной операцией на этапе выпуска стали является остановка потока шлак-металл в конечной фазе выпуска стали. В крупных кислородно-конвертерных цехах предприятий черной металлургии распространен визуальный способ детектирования наличия шлака в потоке расплава. При данном способе результат детектирования существенно зависит от квалификации сталевара, при этом условия процесса не позволяют относительно точно предугадать момент попадания шлака в сталеразливочный ковш даже опытному специалисту. В результате в ковш попадает непредсказуемое количество высокоокисленного шлака, что приводит к нежелательным с точки зрения технологии последствиям [1-3].

Наиболее перспективным и достоверным методом детектирования шлака в струе при выпуске расплава из кислородного конвертера большого объема (более 200 т) следует считать метод, основанный на анализе интенсивности инфракрасного излучения потока расплава, истекающего из конвертера [1, 2].

В настоящее время крупные производители систем автоматизации металлургических процессов предлагают готовые технические решения, обеспечивающие непрерывный контроль процесса выпуска металла и позволяющие оценить технико-экономические показа-

тели эффективности процесса выпуска стали посредством наблюдения за струей с помощью видеодетекторов инфракрасного диапазона. Среди производителей указанных систем можно выделить компании Technoap, Siemens-VAI, Apera, Infratech, Land.

Проблемой автоматического контроля процесса выпуска стали занимались следующие авторы: А.Н. Сорокин, А.М. Формакидов, Б. Энкер, Д.А. Дюдкин, F. Zahorszki и R. Anthony, A. Lyons, D. Goldstein, T. Zhiheng и др. Большинство из них сходятся во мнении, что задача контроля процесса выпуска расплава из кислородного конвертера с целью, например, диагностирования шлака в потоке является актуальной задачей и позволяет повысить производительность процесса выплавки стали. Из работ указанных авторов также следует, что метод наблюдения за потоком, истекающим из кислородного конвертера при выпуске расплава, обеспечивает наибольшую достоверность и надежность по сравнению с электромагнитным или вибрационным методом [4-8].

Однако применение метода наблюдения за потоком детекторами инфракрасного излучения требует выполнения следующих условий:

1. Детектор должен быть установлен в таком месте, чтобы поток, истекающий из кислородного конвертера, находился в зоне видимости детектора излучения.
2. Задымление и запыление воздушной среды между детектором и объектом наблюдения – потоком расплава вносят погрешность в измерение интенсивности инфракрасного излучения при диагностировании шлака.

Целью данного исследования является анализ излучения в инфракрасном диапазоне струи металла при выпуске его из кислородного конвертера с целью определения возможности автоматического контроля процесса выпуска расплава при помощи детектора инфракрасного излучения.

Достижение указанной цели потребовало решения следующих задач:

1. Разработки функциональной схемы системы сбора, хранения и индикации параметров излучения потока расплава с учетом строительного плана кислородно-конвертерного цеха одного из крупнейших предприятий чёрной металлургии России.

2. Формирования статистических массивов значений интенсивности излучения струи на различных этапах выпуска стали из кислородного конвертера.

3. Статистического анализа указанных массивов с целью определения доверительных интервалов для характеристик излучения расплава на различных этапах процесса выпуска стали и определения диагностических условий наблюдения шлака в расплаве и на их основе разработки алгоритма диагностирования.

4. Оценки полученных результатов.

МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

На **рис. 1** представлена последовательность технологических операций при выплавке стали в кислородном конвертере.

На этапе I в ванну конвертера 1 подачей 2 загружается металлолом 3, далее на этапе II выполняется заливка жидкого чугуна 4, затем в течение этапа III через погружаемую сверху водоохлаждаемую фурму 5 подается кислород, обеспечивающий химические реакции окисления и рафинирования металла. На этапе IV через лёточное отверстие 9 происходит выпуск расплава 6 в сталеразливочный ковш 8 и на этапе V осуществляется слив шлака 7 в специально предназначенную чашу 10 [1-3]. В работе [1] приводятся следующие сведения относительно процедуры выпуска расплава из конвертера: при объеме конвертера 370 т и длительности выпуска 5 мин за одну минуту из конвертера истекает 74 т расплава (1,23 т/с), температура которого составляет 1620-1650°C.

При этом в сталеразливочный ковш попадает до 30% конвертерного шлака, увлеченного потоком жидкой стали. Объем шлака в сталеразливочном ковше в среднем на 30-40% состоит из шлака, попавшего в моменты наклона конвертера в начале выпуска расплава

и возврата конвертера в рабочее положение. Указанная доля шлака зависит в основном от состояния выпускного отверстия и скорости изменения угла наклона конвертера, поэтому практически не поддается контролю (при условии отсутствия активных систем отсечки шлака). Приблизительно 60% шлака, попавшего в ковш, поступает в конечной фазе процесса выпуска расплава. Указанная доля шлака может быть значительно сокращена за счет своевременного обнаружения наличия шлака в потоке расплава. Момент появления шлака в потоке расплава на кислородных конвертерах большинства металлургических предприятий России определяется визуально, а отсечка шлака достигается простым отворотом конвертера. Как говорилось ранее, повышенный объем печного шлака в сталеразливочном ковше приводит к существенному снижению эффективности процесса выплавки стали, а при попадании шлака в кристаллизатор машины непрерывного литья заготовок может привести к браку и даже серьезной аварии.

СИСТЕМА РЕГИСТРАЦИИ ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

С целью получения массивов данных об интенсивности инфракрасного излучения на кислородном конвертере по известной схеме [7, 8] смонтирована система регистрации инфракрасного излучения (**рис. 2**), содержащая инфракрасный детектор (ИД) и промышленный компьютер (ПК).

Основные параметры инфракрасного детектора представлены в **табл. 1**.

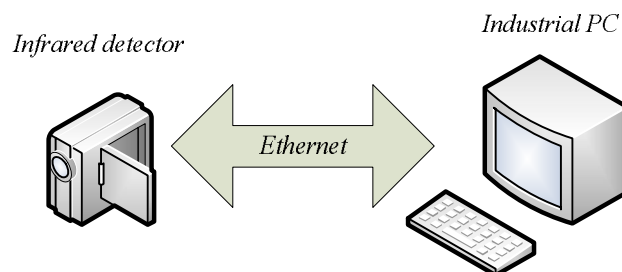


Рис. 2. Структурная схема системы регистрации инфракрасного излучения

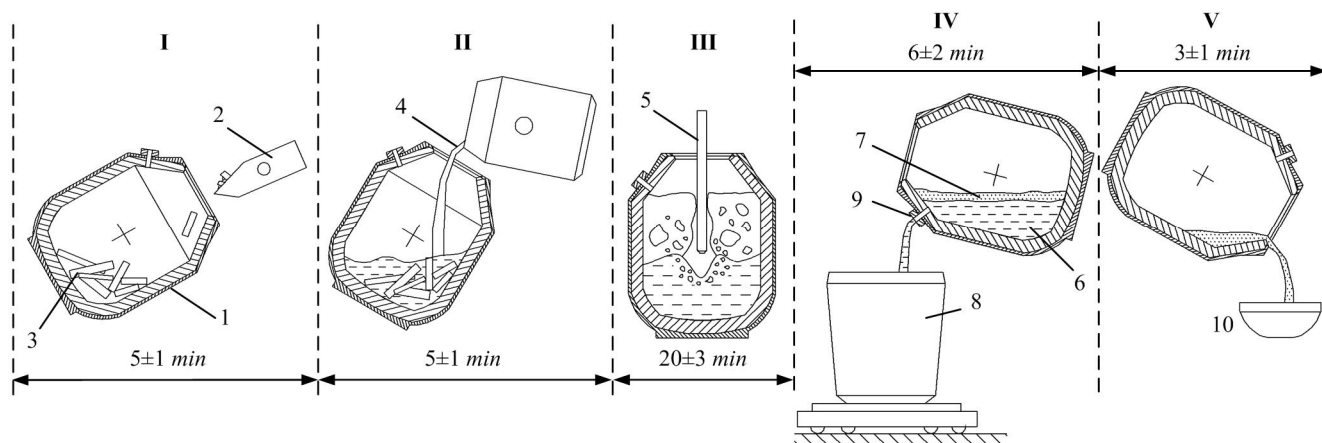


Рис. 1. Этапы выплавки стали в кислородном конвертере:

I – загрузка лома; II – заливка чугуна; III – продувка кислородом; IV – выпуск стали; V – слив шлака

Таблица 1
Основные характеристики инфракрасного детектора

Периметр	Значение	Ед. изм.
Температурный диапазон	-20...+150 0...+650 +300...+2000	°С
Точность измерения интенсивности излучения	±2	°С
Частота кадров	до 50	кадр/с
ИК-разрешение	480×640	пикс.
Фокусное расстояние / Угол обзора	25 / 25 40 / 15	мм/град мм/град
Интерфейсы	USB, Ethernet	

Информация от ИД по сети Ethernet поступает с частотой 12,5 fps в ПК в виде числовых массивов значений, пропорциональных величине интенсивности излучения объектов, попавших в область объектива. Объем массива соответствует разрешающей способности ИД и составляет 480×640 элементов. Программное обеспечение ПК обеспечивает прием массивов данных от ИД, их отображение на мониторе и архивацию.

ИД был стационарно установлен на расстоянии 20 м от кислородного конвертера, а объектив направлен непосредственно на выпускное отверстие. ПК расположен в специализированном помещении автоматики.¹

Один из кадров записи процесса выпуска расплава из кислородного конвертера, полученного от ИД, представлен на **рис. 3**. В верхней части снимка можно наблюдать фрагмент кислородного конвертера в положении, соответствующем процедуре выпуска расплава. В центре кадра наблюдается поток расплава, а в нижней части – верхняя граница сталеразливочного ковша. Наиболее темным участкам кадра (точка 1) соответствуют значения интенсивности излучения в диапазоне 5000-8000 ед., наиболее ярким – значения в диапазоне 25000-28000 ед., жидкому расплаву (точка 2) соответствуют значения в диапазоне 14000-16000 ед. Для сопоставления цветов в кадре и значений интенсивности излучения использована шкала интенсивности. Кроме того, в кадре вертикальными и горизонтальными линиями проведены границы наблюдения потока расплава. Прямоугольник, образованный указанными линиями, формирует матрицу размером 100×35 пикселей, которая содержит информацию о потоке расплава.

Указанная матрица пикселей программным способом выделяется из кадра и формирует массив $I[100;36]$ 16-битных слов, кодирующих значения интенсивности излучения, зафиксированные соответствующей областью чувствительной матрицы ИД. Массив I содержит информацию, требуемую для исследования потока расплава, и использован в качестве исходных данных для последующего статистического анализа.

¹ Инфракрасный детектор и промышленный компьютер безвозмездно для проведения исследований предоставлен компанией ООО «Техноап-Инжиниринг», Россия, г. Москва.

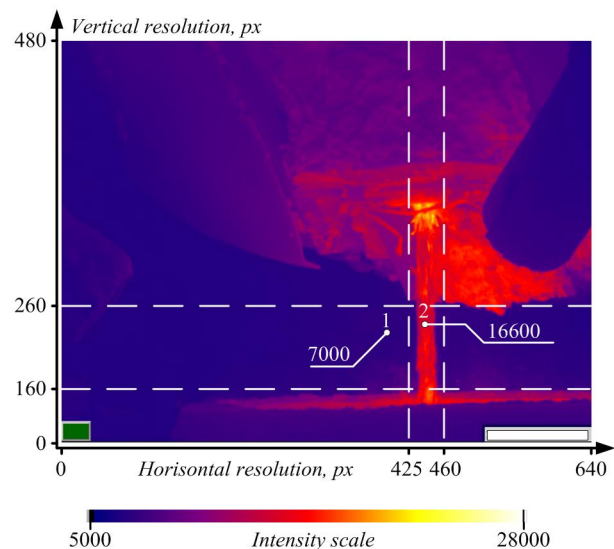


Рис. 3. Кадр записи процесса выпуска расплава из кислородного конвертера

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МАССИВОВ ЗНАЧЕНИЙ ИНТЕНСИВНОСТИ ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПОТОКА РАСПЛАВА

При выполнении статистического анализа массивов значений интенсивности излучения потока расплава процесс выпуска стали разделен на шесть технологических интервалов:

- 1) попадание первичного шлака в ковш;
- 2) до отдачи сыпучих материалов в ковш;
- 3) в процессе отдачи сыпучих материалов в ковш;
- 4) при значении угла наклона конвертера 85°;
- 5) за 30 с до момента попадания шлака в ковш;
- 6) при попадании шлака в ковш.

В качестве исследуемой величины принято среднее значение интенсивности излучения расплава C_i на произвольном срезе времени каждого из интервалов процесса выпуска:

$$C_i = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^{100} \sum_{j=1}^{35} I_{kj}, \quad (1)$$

где i – номер интервала процесса выпуска стали; k – номер строки массива I ; j – номер столбца массива I ; $N = k \cdot j = 350$ – количество элементов массива I .

В **табл. 2** представлены результаты вычисления значений C_i для десяти случаев выпуска расплава, также представлены продолжительность процесса выпуска расплава и значения угла α поворота конвертера, при котором выполнены расчеты.

Таблица 2
Результаты вычисления C_i при выпуске расплава из конвертера

$T_{сл}, c$	C_1 , тыс. ед.	C_2 , тыс. ед.	C_3 , тыс. ед.	C_4 , тыс. ед.	C_5 , тыс. ед.	C_6 , тыс. ед.
363	15,7	12,8	13,9	12,8	13,8	14,5
352	13,9	12,9	13,0	13,5	13,6	15,5
459	12,9	12,8	14,0	12,7	11,7	17,4
391	13,7	13,4	14,5	13,5	13,3	17,2
319	14,0	13,9	13,0	12,7	14,3	16,9
381	12,0	13,1	13,4	13,9	14,0	17,7
354	16,2	13,0	13,3	14,2	12,1	18,4
393	11,8	13,5	12,7	12,7	13,4	18,1
380	12,9	13,7	14,5	13,1	13,5	15,8
426	12,7	14,7	14,1	13,5	12,8	18,3

График изменения значений C_i представлен на **рис. 4**. По оси абсцисс нанесены отсчёты, соответствующие номеру кадра, полученного от ИД. Для пересчёта шкалы в единицы времени следует разделить номер кадра на значение частоты его приема (12,5 кадров в секунду). Также на графике пунктиром нанесены значения угла наклона конвертера.

Для каждого технологического интервала процесса выпуска стали сформированы статистические массивы значений C_i . По данным 100 случаев выпуска расплава из конвертера доказано соответствие распределения величин C_i нормальному закону. Графики функций плотности вероятностей величин C_i , построенные по выборочным значениям математического ожидания $\mu_C = \bar{C}_i$ и дисперсии $\sigma^2 = S_i^2$ для указанных технологических интервалов, представлены на **рис. 5** [10].

По результатам анализа **рис. 5** сделаны следующие выводы:

- 1) функции плотности вероятностей величин C_i в интервалах 1-5 процесса выпуска стали в значительной степени накладываются друг на друга, что может свидетельствовать об однородности параметров излучения расплава в указанных интервалах;
- 2) функции плотности вероятностей величины C_i в интервале 6 значительно отдален от аналогичных функций из интервалов 1-5 по оси абсцисс в сторону увеличения значений C_i , что свидетельствует о значи-

мом отличии параметров излучения расплава в технологическом интервале 6 от значений в интервалах 1-5.

По результатам дисперсионного анализа выборок значений C_i , полученных на технологических интервалах 1-5 процесса выпуска расплава, подтверждена гипотеза о равенстве их математических ожиданий. Также по критерию Кохрена доказана гипотеза об однородности оценочных дисперсий выборок значений C_i в интервалах 1-5. Обобщив полученные результаты, сделан вывод: выборки значений C_i в технологических интервалах 1-5 процесса выпуска расплава принадлежат одной генеральной совокупности (линия 7, **рис. 6**) и могут быть объединены в одну выборку (параметры выборки представлены в **табл. 3**). Указанное может свидетельствовать о том, что процессы, протекающие на указанных интервалах, имеют общую физическую природу [9].

Также было доказано, что математическое ожидание μ_{1245} объединенной выборки 7 и μ_6 выборки 6 (соответствующей этапу выпуска шлака из конвертера) принадлежат разным генеральным совокупностям и значительно отличаются между собой (**рис. 7**). Данное обстоятельство может быть использовано для диагностирования наличия шлака в потоке расплава при выпуске его из конвертера, а величина $\mu_C = \bar{C}_i$ принята в качестве диагностического признака.

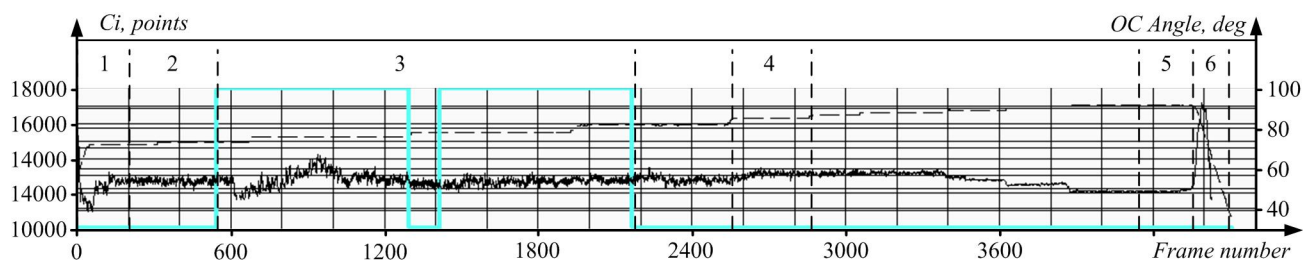


Рис. 4. График изменения значений интенсивности расплава C_i на различных этапах выпуска стали

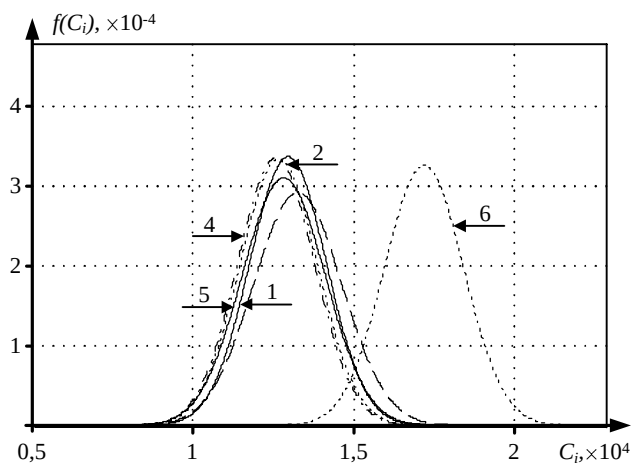


Рис. 5. Графики функций плотности вероятностей величин C_i :

- 1 – попадание первичного шлака в ковш; 2 – до отдачи сыпучих материалов в ковш; 3 – в процессе отдачи сыпучих материалов в ковш; 4 – при значении угла наклона конвертера 850; 5 – за 30 с до момента попадания шлака в ковш; 6 – при попадании шлака в ковш

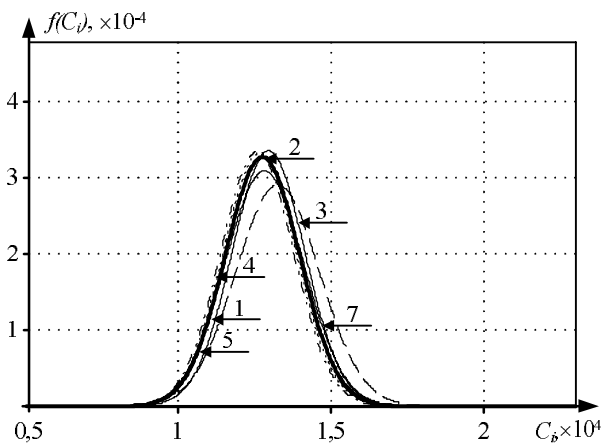


Рис. 6. Графики функций плотности вероятностей величин C_i :

- 1 – попадание первичного шлака в ковш; 2 – до отдачи сыпучих материалов в ковш; 3 – в процессе отдачи сыпучих материалов в ковш; 4 – при значении угла наклона конвертера 850; 5 – за 30 с до момента попадания шлака в ковш; 7 – объединенная выборка

Таблица 3

Параметры объединенной выборки

Объем выборки N_{1245}	Выборочное среднее $\overline{C}_{1245}$, отн. ед	Выборочная дисперсия S_{1245}^2
400	12746,0	1487178,9

Таблица 5

Границы доверительного интервала для величины C_i

Интервал i	$C_{i \min}$	$C_{i \max}$
Объединённая выборка	10125,4	15366,6
Выборка 6	14304,6	20039,95

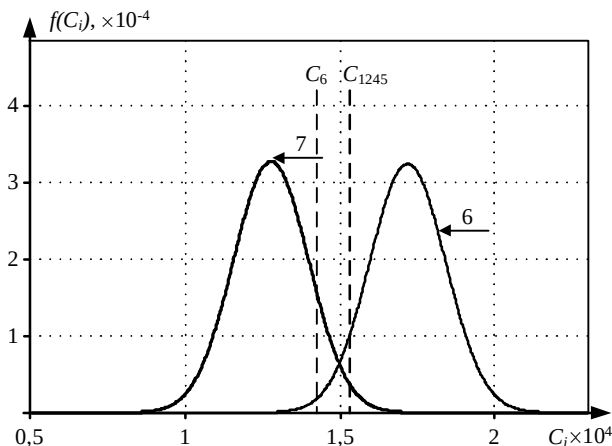


Рис. 7. График функций распределения средних значений интенсивностей в струе металла:
6 – при попадании шлака в ковш;
7 – объединенная выборка

Для определения граничных значения C_i при переходе процесса выпуска с металла на шлак необходимо произвести расчет доверительных интервалов значений C_i при выпуске металла и шлака.

РАСЧЕТ ДОВЕРИТЕЛЬНЫХ ИНТЕРВАЛОВ ИЗМЕНЕНИЯ ВЕЛИЧИНЫ C_i

С целью определения доверительных интервалов для величины C_i из объединенной выборки и выборки 6 выполнена оценка верхней границы доверительного интервала дисперсий σ_i^2 указанных выборок. Оценка выполнена с помощью χ^2 -статистики Пирсона [9] (табл. 4).

Доверительные интервалы с уровнем значимости $q=0,01$ для величины C_i (табл. 5) определены с использованием следующего выражения:

$$\overline{C}_i - \sigma_i < C_i < \overline{C}_i + \sigma_i. \quad (2)$$

С целью определения худшего варианта с точки зрения ошибки диагностирования принят случай наиболее близкого расположения значений C_i : $C_{1245} = C_{1245 \max}$; $C_6 = C_{6 \min}$ (см. рис. 7).

Таблица 4

Верхняя граница доверительного интервала генеральной дисперсии

Выборка	N	$\chi^2_{кр}$	S_i^2	σ_i^2
Объединённая выборка	400	346,5	1487178,9	1716891,38
Выборка 6	96	69,9	1513247,8	2055900,15
Выборка	N	$\chi^2_{кр}$	S_i^2	σ_i^2
Объединённая выборка	400	346,5	1487178,9	1716891,38
Выборка 6	96	69,9	1513247,8	2055900,15

ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ШЛАКА В ПОТОКЕ РАСПЛАВА ПРИ ВЫПУСКЕ ЕГО ИЗ КОНВЕРТЕРА

Из рис. 7 следует, что области решений о наличии или отсутствии шлака в потоке расплава пересекаются. Следовательно, неизбежны ошибки первого рода H_{21} (ложная тревога) и второго рода H_{12} (пропуск цели). По выражению (3) определена суммарная вероятность ошибочного решения, которая составила 2,1%, что вполне допустимо при решении диагностических задач.

$$E = 2 \int_{-\infty}^{C_{1245}} f_6(C_i) dC_i \cdot \int_{C_6}^{\infty} f_{1245}(C_i) dC_i. \quad (3)$$

По результатам исследований определены диагностические условия детектирования шлака при выпуске расплава из конвертера:

$$\begin{cases} C > 15366,6: \text{ выпуск шлака;} \\ 14304,6 \geq C \geq 15366,6: \text{ состояние} \\ \text{не определено;} \\ C < 14304,6: \text{ выпуск металла.} \end{cases} \quad (4)$$

Следует отметить, что диагностические условия (4) справедливы только для случая использования системы регистрации инфракрасного излучения с конфигурацией элементов, описанной выше, и неизменным местом установки ИД. Так, например, при приближении ИД к потоку расплава абсолютные значения C_i увеличиваются из-за снижения влияния окружающей воздушной среды на прохождение излучения от расплава до сенсора ИД.

На рис. 8 представлена диаграмма изменения значений C_i в процессе выпуска расплава. На рис. 8 изображена заштрихованная область, границы которой получены из диагностических условий 4. Все значения C_i , расположенные ниже указанной области, соответствуют выпуску металла, значения, попадающие в заштрихованную область, соответствуют неопределённому состоянию, а значения, расположенные выше границы области, соответствуют выпуску шлака.

На рис. 8 в начальный момент времени ($Frame\ number=0\dots50$) значения C_i сначала находятся выше границы заштрихованной области, затем резко снижаются, пересекая её, и затем располагаются ниже границы области. Данные изменения значений C_i объясняются попаданием первичного шлака в ковш на начальном этапе выпуска расплава, затем с увеличением угла наклона конвертера (пунктирная линия на рис. 8) концентрация шлака в потоке расплава сокращается до нуля и поток полностью состоит из жидкой стали. Далее до момента $Frame\ number = 4400$ поток полностью состоит из жидкой стали, и значения C_i не достигают заштрихованной области. Затем при попадании шлака в поток расплава значения C_i начинают увеличиваться, и когда концентрация шлака в потоке достигает примерно 70%, значения C_i , пересекая область неопределённого состояния, попадают в область, соответствующую шлаку. На рис. 8 момент детектирования высокой концентрации

шлака в потоке расплава отмечено красным флажком.

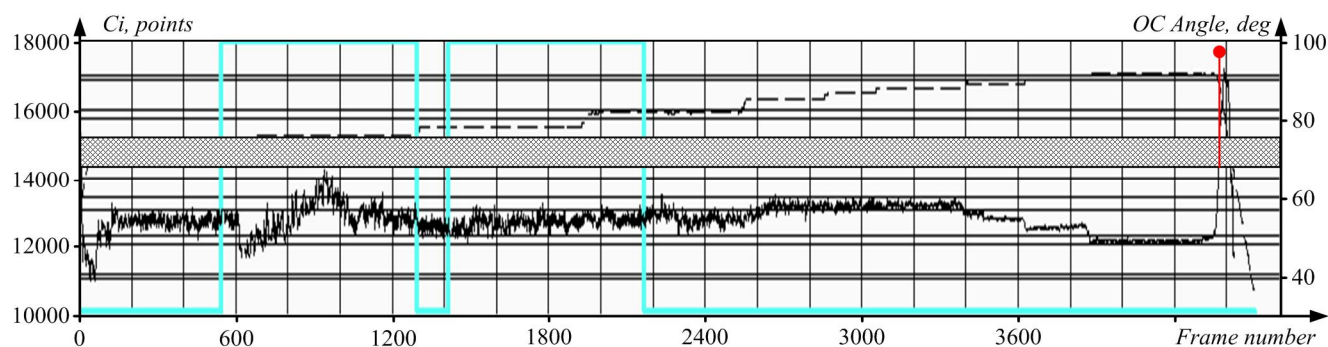


Рис. 8. График изменения значений C_i в процессе выпуска расплава

В результате исследований получены диагностические условия принятия решения о наличии высокой доли шлака (более 70%) в потоке расплава при его выпуске из кислородного конвертера на основе анализа средних значений интенсивности инфракрасного излучения потока расплава и представляют собой совокупность интервалов (4). Макроалгоритм диагностирования содержит следующие этапы:

- в процессе выпуска расплава в реальном масштабе времени создаются массивы значений инфракрасного излучения; по этим массивам по выражению (1) выполняется расчет средних значений интенсивности инфракрасного излучения C_i ;
- значения C_i сравниваются с условиями (4) и принимается решение об одном из следующих трех состояний: выпуск металла, неопределенное состояние, выпуск металла со шлаком.

С целью проверки эффективности диагностирования шлака на конвертере выполнено тестирование приведенного алгоритма диагностирования шлака. Достоверность диагностирования составило 95%. В процессе промышленной апробации результатов исследования было установлено, что система диагностирования вырабатывает сигнал о наличии шлака в потоке расплава на восемь секунд раньше, чем сталевар при визуальном наблюдении потока расплава. С учетом того, что во время выпуска за 1 с в сталеразливочный ковш поступает около 1,23 т расплава, то за 8 с в ковш сможет попасть около 10 т шлака, что весьма негативно сказывается на качестве металлургической продукции и эффективности процесса выплавки стали и её дальнейшей переработки.

В итоге промышленной апробации системы диагностирования появления шлака в расплаве доказано, что её применение позволяет в 2 раза снизить объем шлака в сталеразливочном ковше.

Следует отметить, что полученные диагностические условия не являются универсальными для других сталеплавильных агрегатов, так как числовая информация в значительной степени зависит от технических параметров ИД (диапазона чувствительности, типа объектива и др.) и места его установки (удаленность от источника излучения, угол обзора). Однако методика получения диагностических условий (4), приведенная выше, может быть использована при исследовании потока расплава других сталеплавильных агрегатов. Так, по указанной методике были проведены исследования процесса выпуска расплава на электродуговой сталеплавильной печи и кислородных конвертерах

крупных металлургических предприятий России. Абсолютные значения границ интервалов выражения (4) несколько отличались от представленных в данной работе. Однако алгоритм детектирования, построенный на базе проверки полученных диагностических условий, дал такие же высокие результаты с точки зрения достоверности диагностирования появления шлака в потоке расплава.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Одним из резервов повышения качества металлургической продукции и технической и экономической эффективности сталелитейного производства является минимизация объема печного шлака в сталеразливочном ковше за счет своевременного диагностирования его наличия в потоке расплава и прекращения выпуска стали со шлаком из кислородного конвертера. Показано, что наиболее эффективным способом выявления шлака в потоке расплава на стадии его выпуска из конвертера является способ, основанный на анализе параметров инфракрасного излучения потока расплава. Разработка эффективной системы диагностирования наличия шлака в потоке расплава позволяет автоматизировать процесс выпуска стали из кислородного конвертера и существенно ограничить объем шлака в сталеразливочном ковше.

В работе на основе анализа массивов интенсивности инфракрасного излучения доказано, что величина математического ожидания, рассчитанная по данным интенсивности инфракрасного излучения на заключительной стадии выпуска металла из конвертера, значительно отличается от математических ожиданий интенсивности, рассчитанных на начальных стадиях выпуска стали. Математическое ожидание интенсивности инфракрасного излучения принято в качестве диагностического признака наличия шлака в расплаве. На основе массивов экспериментальных данных для технологических условий кислородного конвертера определены диагностические условия наблюдения шлака в потоке металла. Предложены методика расчёта диагностических условий и алгоритм диагностирования появления шлака в потоке расплава, позволяющие разработать аналогичные системы для различных конвертеров.

В результате опытно-промышленной апробации разработанной системы диагностирования в условиях действующего металлургического предприятия доказана её техническая эффективность: достоверность диагностирования наличия шлака в потоке расплава составила 95%; объем шлака в сталеразливочном ковше

ше уменьшился почти в 2 раза. Создание достоверной системы диагностирования шлака в потоке расплава создало предпосылки автоматизации процесса выпуска расплава из конвертера.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дюдкин Д.А., Кисиленко В.В. Производство стали. Том 1. Процессы выплавки, внепечной обработки и непрерывной разливки. М.: Теплотехник, 2008. 528 с.
2. Система управления электроприводом фурмы кислородного конвертера: монография / С.И. Лукьянов, Е.С. Суспицын, А.Ю. Мещеряков, С.С. Красильников. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2014. 101 с.
3. Лукьянов С.И., Карандаев А.С., Евдокимов С.А. Разработка и внедрение интеллектуальных систем диагностирования технического состояния электрического оборудования // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014. №1. С. 129-136.
4. Штилькеринг Б. Эффективность методов отсечки шлака при сливе металла из конвертера // Металлургическая и горнорудная промышленность. 2002. №10. С. 38-41.
5. Система раннего обнаружения шлака / А.Д. Носов, В.Ф. Дьяченко, В.М. Бузинник, А.М. Формакидов // Труды седьмого конгресса сталеплавильщиков. Магнитогорск, 2002. С. 238-242.
6. Frank Zahorski, Anthony R.A. Lyons. Online slag detection in steelmakingProc. SPIE 4020, Thermosense XXII, 2000. doi:10.1117/12.381544.
7. R. Strąkowski, K. Pacholski, B. Więcek, R. Olbrycht, W. Wittchenand, M. Borecki (2014) Radiative parameters of steel slag for FeO content estimation using multispectral thermography system. Quantitative InfraRed Thermography Journal, vol. 11, Issue 2, pp. 222-232. DOI:10.1080/17686733.2014.970754.
8. Pat. EP 0 922 774 A1 int. Cl.6. C21C 5/28, B22D 2/00, G01F 23/292, G0 1 J 5/00 System and method for minimizing slag carryover during the tapping of a BOF converter in the production of steel/ Goldstein, Daniel A., Sharan, Alok Easton, Elizabeth Ann. Publ. 16.06.1999.
9. Pat. EP 2177947 A1 Int.Cl. B22D2/00, G03B17/00. Video camera device for detecting molten slag in flow of molten steel/Zhiheng Tian. Publ. 21.04.2010.
10. Лукьянов С.И., Панов А.Н., Васильев А.Е. Основы инженерного эксперимента: учеб. пособие. М.: РИОР: ИНФРА-М, 2018. 99 с.

Поступила в редакцию 30 декабря 2019 г.

INFORMATION IN ENGLISH

SLAG DIAGNOSTIC SYSTEM FOR METAL RELEASE FROM THE OXYGEN CONVERTER BY THE INTENSITY OF INFRARED MELT RADIATION

Sergei I. Lukyanov

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

Sergey S. Krasilnikov

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

Dmitry V. Shvidchenko

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, the Department of Electronics and Microelectronics, Power Engineering and Automated Systems Institute, Magnitogorsk State Technical University, Vice Director of OSC «Technoap Engineering», Magnitogorsk, Russia. E-mail: schvidmit@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1932-9239>

Nickolay V. Shvidchenko

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

Roman S. Pishnograev

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

One of the ways to increase the competitiveness of domestic products on the world market of ferrous metallurgy is to increase the efficiency of steelmaking units and the quality of products or product by minimizing the amount of furnace slag in a steel pouring ladle. The latter is achieved through continuous monitoring, mainly visual, of the melt flow at the stage of its release from the bath of the oxygen converter into the steel pouring ladle. The work presents the results of experimental studies and statistical processing of data sets of the intensity of infrared radiation from the melt flow on existing steelmaking

units in various technological ranges of steel production. It has been proved that as a diagnostic sign of the presence of slag in the produced melt, one can apply the mathematical expectation of infrared radiation of the melt. Diagnostic conditions for observing slag in the produced melt are determined by the change in the radiation intensity. A technique and an algorithm for calculating the diagnostic conditions for observing slag in the melt for domestic oxygen converters are proposed. The results of industrial testing of the research results are presented.

Keywords: diagnostic system, oxygen converter, infrared radiation, steel production, monitoring.

REFERENCES

1. Dyudkin D.A., Kisilenko V.V. *Proizvodstvo stali. Tom 1. Protsessy vyplavki, vnepechnoy obrabotki i nepreryvnoy razlivki* [Steel production. Vol. 1. Processes of smelting, secondary refining and continuous casting]. Moscow, Heat engineer, 2008. 528 p. (In Russian)
2. Lukyanov S.I., Suspitsyn E.S., Meshcheryakov A.Yu., Krasilnikov S.S. *Sistema upravleniya elektroprivodom furmy kislorodnogo konvertora: monografiya* [Oxygen converter lance electric drive control system : monograph]. Magnitogorsk: Publishing House Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2014. 101 p.
3. Lukyanov S.I., Karandaev A.S., Evdokimov S.A. Development and implementation of intelligent systems for diagnosing the technical condition of electrical equipment. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Bulletin of MSTU], 2014, no 1, pp. 129-136. (In Russian)
4. Shilker B. The effectiveness of methods of slag cutoff when draining metal from the converter. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost* [Metallurgical and mining industry], 2002, no. 10, pp. 38-41. (In Russian)
5. Nosov A.D., Diachenko V.F., Buzinnik V.M., Formakidov A.M. Early slag detection system. *Trudy sedmogo kongressa staleplavilscshikov* [Proceedings of the Seventh Congress of Steelmakers]. Magnitogorsk, 2002, pp. 238-242. (In Russian)
6. Frank Zahorszki, Anthony R. A. Lyons. Online slag detection in steelmaking Proc. SPIE 4020, Thermosense XXII, 2000. doi: 10.1117 / 12.381544
7. R. Strąkowski, K. Pacholski, B. Więcek, R. Olbrycht, W. Wittchen and M. Borecki. Radiative parameters of steel slag for FeO content estimation using multispectral thermography system. *Quantitative InfraRed Thermography Journal*, vol. 11, issue 2, pp. 222-232. DOI: 10.1080 / 17686733. 2014.970754
8. Patent EP 0 922 774 A1 int. Cl.6. C21C 5/28, B22D 2/00, G01F 23/292, G01 J 5/00/ System and method for minimizing slag carryover during the tapping of a BOF converter in the production of steel / Goldstein, Daniel A., Sharan, Alok Easton, Eliza-beth Ann, publ. 06/16/1999.
9. Patent EP 2 177 947 A1 Int.Cl. B22D2 / 00, G03B17 / 00 Video camera device for detecting molten slag in flow of molten steel / Zhiheng Tian, publ. 04/21/2010
10. Lukyanov S.I., Panov A.N., Vasiliev A.E. *Osnovy inzhernogo eksperimenta* [Fundamentals of an engineering experiment: textbook. Manual]. Moscow: RIOR: INFRA-M, 2018. 99 p. (In Russian)

Система диагностирования шлака при выпуске металла из кислородного конвертера по интенсивности инфракрасного излучения расплава / С.И. Лукьянов, С.С. Красильников, Д.В. Швидченко, Н.В. Швидченко, Р.С. Пишнограев // Электротехнические системы и комплексы. 2020. № 1(46). С. 46-53. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-1\(46\)-46-53](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-1(46)-46-53)

Lukyanov S.I., Krasilnikov S.S., Shvidchenko D.V., Shvidchenko N.V., Pishnograev R.S. Slag Diagnostic System For Metal Release From the Oxygen Converter by the Intensity of Infrared Melt Radiation. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2020, no. 1(46), pp. 46-53. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-1\(46\)-46-53](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-1(46)-46-53)

ИНФОРМАЦИОННОЕ, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 621.746.27-52

[https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-1\(46\)-54-59](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-1(46)-54-59)Логунова О.С.¹, Андреев С.М.¹, Гарбар Е.А.^{1,3}, Маркевич А.В.², Николаев А.А.¹¹Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова²ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат»³ООО «Студия ФАКТ», г. Магнитогорск**АВТОМАТИЗАЦИЯ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ НАРУШЕНИЯ СПЛОШНОСТИ ПЛОСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ: КОНСТРУКЦИОННОЕ РЕШЕНИЕ ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА**

Современные тренды развития науки и техники все чаще используют системы мониторинга за объектами по изображениям, которые захвачены из видеопотока. Для принятия решения о состоянии объекта возникает необходимость получения библиотеки изображений, которые получены с использованием автоматизированных систем научных исследований. Целью предлагаемой работы является обоснование использования автоматизированных систем научных исследований нарушения сплошности плоской движущейся поверхности. Особенностью исследования является появление на поверхности объектов нерегулярной формы и возникновения конфликтов классификатора при идентификации этих объектов. В ходе исследования определена блочно-модульная структура системы и предложены два варианта ее реализации. Предлагаемые решения отличаются количеством приводов, реализующих движение катушек и структурой системы управления. Реализация одного из предложенных решений позволила провести опытную эксплуатацию системы с использованием программного обеспечения «Video Stream», позволяющим выполнять захват изображения из видеопотока. Результаты опытной эксплуатации системы доказали достаточность использования автоматизированной системы научных исследований для построения библиотеки изображений, захваченных из видеопотока, для изучения его структуры и отдельных частей. Реализованная автоматизированная система научных исследований планируется к использованию для выявления причин появления и устранения конфликтов классификаторов при идентификации дефектов металлической полосы, в частности плены.

Ключевые слова: нарушение сплошности поверхности, плоская поверхность, изображение в потоке, автоматизация исследований, программно-аппаратный комплекс.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие научных исследований в настоящее время приводят к разработке новых методов и средств научного познания. Среди этих средств и методов можно определить информационные, математические, логические, технические, технологические, лингвистические, эргономические, программные [1]. В своем историческом развитии промышленные системы автоматизированных систем управления прошли несколько этапов, в том числе становление «новой автоматизации», «комплексную автоматизацию», «комплексную интеллектуальную систему автоматизации» [2]. В настоящее время сочетание опыта и знаний экспертов позволяет выстраивать программно-аппаратные комплексы, обеспечивающие все информационные процессы в системах автоматизации управления.

Для любого технологического процесса рассматривают две стороны: энергетическое воздействие и управление энергетическим воздействием. Управление с этой точки зрения подразумевает наблюдение за ходом обработки и установление наилучшего режима на основе осмысленного использования информации о протекании процесса [2]. Учитывая, что современные технологические процессы и системы автоматизации являются сложными, становится целесообразным синтезировать и использовать автоматизированные системы научных исследований. Согласно [3] автоматизированные системы научных исследований – это

программно-аппаратные комплексы, обрабатывающие данные, поступающие от экспериментальных установок и измерительных приборов, и анализирующие их. Основной функцией автоматизированных систем научных исследований является сбор информации, формирование информационной библиотеки и подготовка информации для последующего принятия решений.

Авторами работы определена цель исследования: повышение точности классификации объектов на плоской движущейся поверхности в реальном времени. Для решения указанной проблемы в настоящее время созданы как технические, так программные предпосылки. Эти предпосылки указаны в работах, которые:

- описывают структуру синтезируемых программно-аппаратных комплексов для различных областей [4-7];
- обеспечивают высокую производительность вычисления [8-10];
- систематизировано излагают основы обработки, сегментации и классификации изображений в статическом и динамическом состоянии [11-14];
- обосновывают использование изображений в автоматизированных системах инспекции качества [15-20].

При поиске публикаций, которые рассматривают синтез автоматизированных систем научных исследований, обнаружено только на платформе Российского индекса научного цитирования 158 тыс. научных публикаций. Несмотря на множество проведенных исследований, остаются актуальными следующие проблемы:

- наличие высоких технологических требований к программно-аппаратным решениям для сбора и анализа уникальности информации, получаемой с помощью автоматизированных систем научных исследований, с учетом динамики объекта;

- наличие конфликтов в классификаторах при распознавании объектов нерегулярной формы на плоской динамической поверхности в реальном времени;
- отсутствие полноценных библиотек изображений для изучения структуры объектов нерегулярной формы для систематизации и обобщения признаков классификации.

Сокращение затрат на экспериментальные исследования достигается использованием автоматизированных систем научных исследований.

КОНСТРУКЦИЯ АППАРАТНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРИ КЛАССИФИКАЦИИ ОБЪЕКТОВ НА ПЛОСКОЙ ДВИЖУЩЕЙСЯ ПОВЕРХНОСТИ

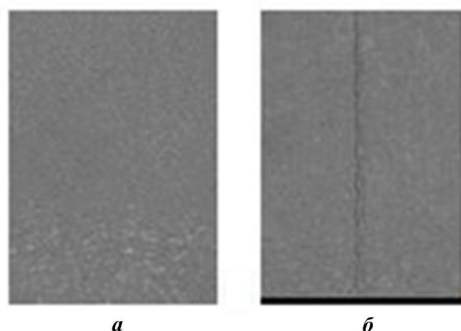
Нарушением сплошности движущейся поверхности, в рамках работы, принято считать любые дефекты поверхности, нарушающие ее однородность. Примером нарушения сплошности на поверхности листового проката можно считать образование плены (**рис. 1**).

В работе [21] представлена блочно-модульная структура системы автоматизации научных исследований для плоской движущейся поверхности (**рис. 2**). В состав системы входит аппаратный блок, включающий аналог-подобие промышленного оборудования и комплекс системы управления.

Системы автоматизации научных исследований нарушения сплошности поверхности должна обеспечивать:

- движение плоской полосы с линейной скоростью до 1 м/мин;
- равномерное движение полосы из легкого и тяжелого материала;
- минимальное отклонение от горизонта поверхности плоскости полосы;
- захват видеоизображения без размытия и бликов освещения на заданной скорости.

Авторами работы для реализации системы автоматизации научных исследований предложены две схемы аппаратной механической части, схемы которых приведены на **рис. 3** и **4**. В состав каждой схемы включены: механическая часть, обеспечивающая движение полосы (перемотчик); система управления, обеспечивающая регулирование параметров движения полосы на механической части.



**Рис. 1. Вид фрагмента поверхности
металлического листа:**

***a* – без нарушения сплошности; *б* – с нарушением
сплошности поверхности – дефект «Плена»**

На **рис. 3** введены обозначения: 1) элементов управляющей части: ЦАП – цифроаналоговый преобразователь; ЭВМ – электронно-вычислительная машина; УВ – устройство ввода; *Driver* – устройство управления; 2) информационных сигналов: I_1 – напряжение на электродвигатель 1; I_2 – частота вращения ротора двигателя 1, ток статора; I_3 – сигнал уставки скорости вращения двигателя 1; I_4 – цифровой сигнал уставки скорости вращения двигателя 1; I_5 – напряжение на электродвигатель 1'; I_6 – частота вращения ротора двигателя 1', ток статора; I_7 – сигнал уставки скорости вращения двигателя 1'; I_8 – цифровой сигнал уставки скорости вращения двигателя 1'; I_9 – сигнал диаметра намотки на вал 1; I_{10} – цифровой сигнал изображения с камеры; I_{11} – сигнал диаметра намотки на вал 1'; I_{12} – сигнал с чувствительного элемента камеры; I_{13} – ток светодиода подсветки; I_{14} – сигнал управления величиной подсветки; I_{15} – сигнал уставки яркости светодиода.

На **рис. 4** введены обозначения: I_1 – напряжение на электродвигатель; I_2 – частота вращения ротора двигателя, ток ротора; I_3 – сигнал уставки скорости вращения двигателя; I_4 – цифровой сигнал уставки скорости вращения двигателя; I_5 – сигнал диаметра намотки на вал 1; I_6 – цифровой сигнал изображения с камеры; I_7 – сигнал диаметра намотки на вал 2; I_8 – сигнал с чувствительного элемента камеры; I_9 – ток светодиода подсветки; I_{10} – сигнал управления величиной подсветки; I_{11} – сигнал уставки яркости светодиода.

Реализация системы по схеме, приведенной на **рис. 3**, требует использования двух двигателей для обеспечения натяжения плоской полосы. В системе, построенной по схеме **рис. 4**, использован один двигатель. Такая конструкция является более простой в реализации. Для реализации стендов выбраны двигатели постоянного тока, способные обеспечивать равномерную скорость движения. С помощью датчиков положения контролируется диаметр ленты, находящейся на катушках.

Для обнаружения нарушений сплошности на поверхности полосы требуется освещение, которое обеспечивает отсутствие бликов на поверхности. В качестве вариантов освещения опробованы: лампы накаливания; светодиодные лампы; инфракрасные лампы; галогенные лампы. Из всех перечисленных источников освещения требованию по отсутствию бликов удовлетворяет только инфракрасная лампа. Свет, проходя через цветное стекло, не засвечивает поверхность.

Для поиска областей с нарушением сплошности на поверхности полосы в традиционных системах используют два вида камер: однострочную и матричную. В предлагаемых решениях использована длиннофокусная камера для съемки на расстоянии 30–50 см от объекта.

Каждое из предлагаемых решений обладает достоинствами и преимуществами в зависимости от условий проводимых экспериментальных исследований (см таблицу).

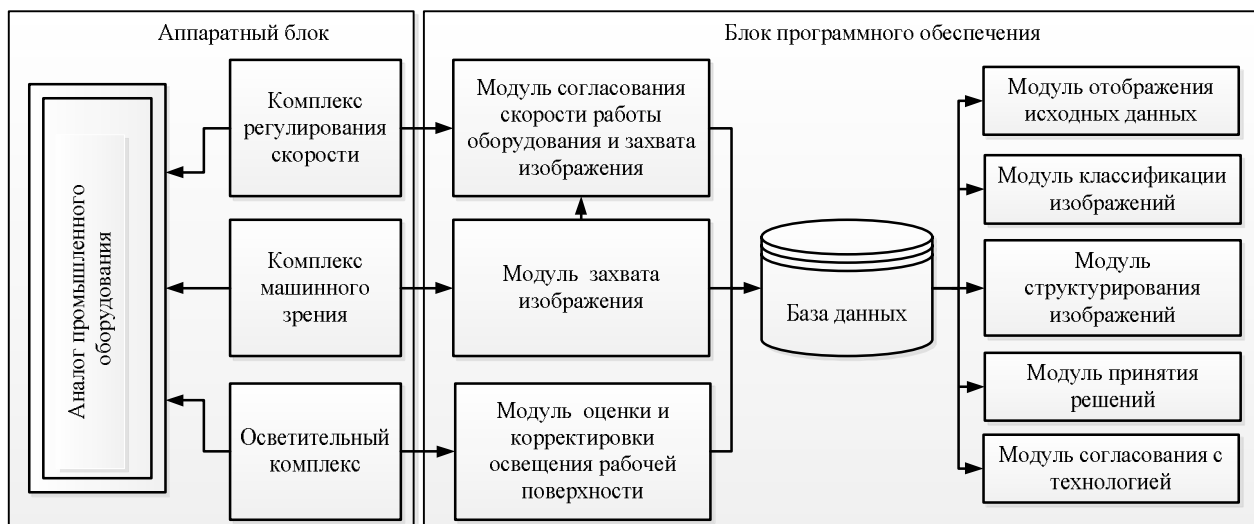


Рис. 2. Блочно-модульная структура системы автоматизации научных исследований плоской движущейся поверхности продукции

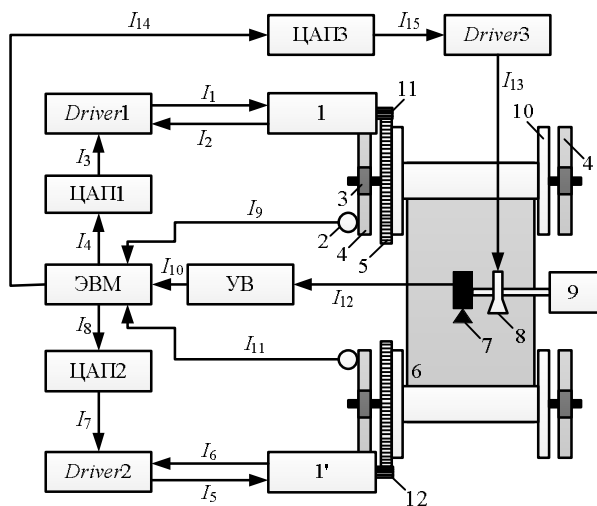


Рис. 3. Схема автоматизированной системы научных исследований с двумя активными двигателями:
1, 1' – двигатель; 2 – датчик положения; 3 – подшипник; 4 – опора; 5 – ведомая шестерня; 6 – плоская поверхность; 7 – видео(фото)камера; 8 – освещение; 9 – станина для камеры; 10 – катушка; 11 – ведущая шестерня

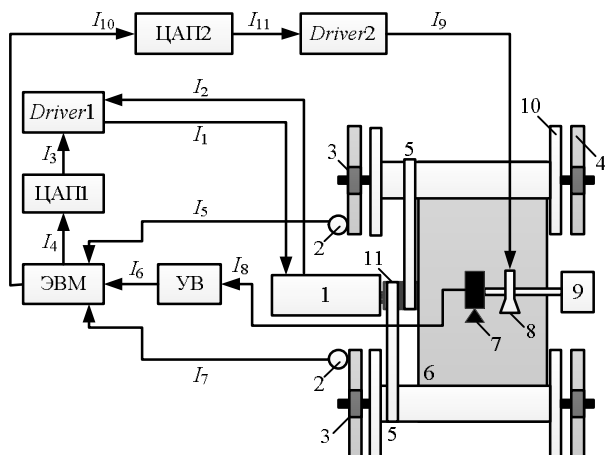


Рис. 4. Схема автоматизированной системы научных исследований с одним активным двигателем:
1 – двигатель; 2 – датчик положения; 3 – подшипник; 4 – опора; 5 – ведомый шкив; 6 – плоская поверхность; 7 – видео (фото) камера; 8 – освещение; 9 – станина для камеры; 10 – катушка; 11 – ведущий шкив

Перечень достоинств и недостатков конструкционных решений при реализации автоматизированной системы научных исследований нарушения сплошности плоской полосы

№ п/п	Конструкция с двумя двигателями	Конструкция с одним двигателем
Достоинства конструкции		
1	Обеспечивает независимое управление каждым двигателем	Имеет упрощенную структуру с меньшим количеством элементов управления
2	Обеспечивает стабильную работу конструкции при любой толщине рулона полосы	Не требует системы согласования скоростей движения катушек для исключения провисания полосы
3	Обеспечивает движение полосы в две стороны и перематывание полосы на любую катушку	Обеспечивает стабильную работу конструкции при одинаковой толщине полосы на каждой катушке
Недостатки конструкции		
1	Требует согласования в скорости работы двигателей для устранения провисания полосы при движении	Обеспечивает движение полосы в сторону катушки с ведущей шестерней
2	Требует дублирования системы управления для каждого двигателя	Требует механизма для крепления и снятия катушек для их перестановки

РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЫТНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

В ходе экспериментальных исследований реализована автоматизированная система по схеме, приведенной на рис. 4. Вид системы приведен на рис. 5.

Проведение опытной эксплуатации системы проведено при условиях: материал для плоской поверхности – алюминиевая фольга; толщина материала – 0,3 мм; линейная скорость движения полосы – 0,3 м/мин.

Используя программное обеспечение «Video Stream» [21], получены результаты, приведенные на рис. 6. На рис. 6 введены обозначения: 1 – список видеоустройств; 2 – кнопочный блок событий; 3 – рабочее окно с изображением; 4 – раскадровка видеопотока; 5 – нарушение сплошности текстурированной поверхности.

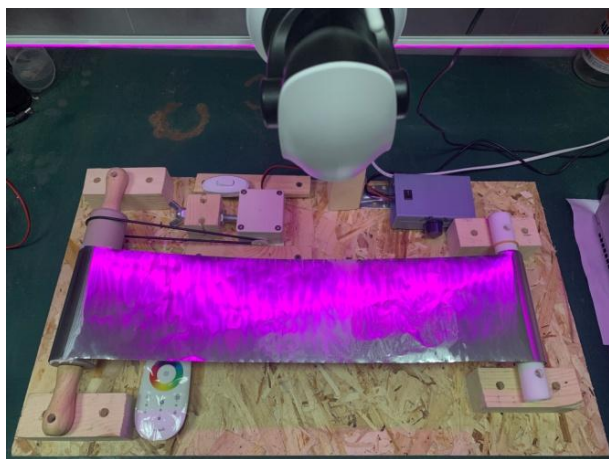


Рис. 5. Вид упрощенной опытной автоматизированной системы научных исследований, реализованной по схеме с одним двигателем

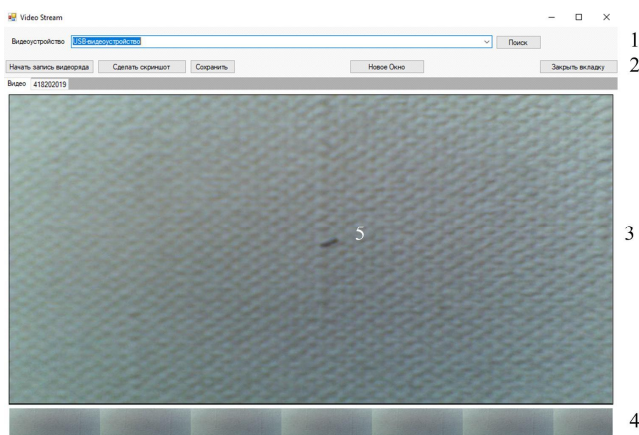


Рис. 6. Вид рабочих окон программного обеспечения «Video Stream»

Опытная эксплуатация автоматизированной системы доказала ее работоспособность для сбора графической информации в ходе захвата изображений из видеопотока плоской движущейся поверхности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выявлено, что современные тенденции развития науки и техники требуют построения систем мониторинга структуры поверхности, находящейся в движении. Эти тенденции характерны для металлургической, лесной, бумажной и других отраслей экономики.

2. Задачи мониторинга за нарушением сплошности поверхности требуют принятия решения на основе обработки изображений, получаемых из видеопотока. Получение большого количества графической информации в производственных условиях является задачей, требующей вмешательства в производственный процесс, и является труднореализуемой. Задача построения множества изображений в достаточном количестве для систематизации структуры объектов, построения правил принятия решений и обобщения результатов реализуема с использованием автоматизированной системы научного исследования.

3. В ходе исследования авторы работы предложили две схемы построения автоматизированной системы научного исследования нарушения сплошности движущейся плоской поверхности и выполнили реализацию одной из схем с использованием одного двигателя.

4. Опытная эксплуатация построенной автоматизированной системы научного исследования нарушения сплошности движущейся плоской поверхности показала достаточность предложенных решений для формирования библиотеки изображений и последующего ее использования при изучении структуры как изображения в целом, так и объектов нерегулярной формы на ее поверхности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Информационные технологии в экономике: учебник / под ред. проф. Г.А. Титоренко. М.: ЮНИТИ, 2001. 399 с.
2. Дудников Е.Г., Левин А.А. Промышленные автоматизированные системы управления. М.: Энергия, 1973. 192 с.
3. Гамов В.Ю. Автоматизированные системы научных исследований. СПб.: ГАУП, 2015. 96 с.
4. Лесных А.Н., Сарычев В.А. Автоматизированная система научных исследований для синтеза систем электропитания космических аппаратов // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. 2005. № 4. С. 48-52.
5. Штриков Б.Л., Шуваев В.Г., Папшев В.А. Автоматизированная система научных исследований процессов ультразвуковой сборки // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2007. № 12. С. 19-22.
6. Автоматизированная система научных измерений для исследования перспективных теплотехнических материалов методами обратных задач теплообмена / Алифанов О.М., Будник С.А., Михайлов В.В. и др. // Современные наукоемкие технологии. 2005. № 5. С. 67-68.
7. Ульянычев Н.В., Колосов В.П., Перельман Ю.М. Автоматизированная система для научных исследований дальневосточного научного центра физиологии и патологии дыхания СО РАМН // Информатика и системы управления. 2008. № 2 (16). С. 103-106.
8. Мозгов С.С. Средства повышения производительности вычислений в автоматизированных системах научного исследования // Известия Орловского государственного технического университета. Серия: Информационные системы и технологии. 2007. № 4-2. С. 277-279.
9. Халкечев Р.К. Теоретические основы мультифрактального моделирования функциональных задач автоматизированной системы научных исследований физических процессов горного производства // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2015. №8. С. 136-142.
10. Соловьев А.М., Адаменко В.С. Разработка автоматизированной системы научных исследований усилительной аппаратуры с использованием микропроцессорной платы ARDUINO // Технические науки – от теории к практике. 2016. № 56. С. 68-74.
11. Прэтт У. Цифровая обработка изображений: пер. с англ. Кн. 1. М.: Мир, 1982. 312 с.
12. Шапиро Л., Стокман Дж. Компьютерное зрение. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. 752 с.
13. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2005. 1072 с.
14. Automated processing of retinal images / A.A. Chernomoretz, A.S. Krylov, A.V. Nasonov [et al.] // The 21st International Conference on Computer Graphics and Vision GraphiCon'2011. Conference Proceedings. M.: МАКС Пресс, 2011. P. 78-81.
15. Application of on-line infrared thermography in steel making industry / M. Viale, O. Martin, F. Muratori [et al.] // Thermosense XXIX. Edited by K.M. Knettel, V.P. Vavilov, J.J. Miles. Proc. of the SPIE. 2007. № 6541. С. 65410H 1-20.
16. Сомина С., Кадушиников Р., Разводов А. Цифровая микроскопия уходит в онлайн // Наноиндустрия. 2012. №4. С. 42-45.

17. Разработка методов оценки микроструктурной неоднородности трубных сталей / Казаков А.А., Казакова Е.И., Кисилев Д.В. [и др.] // Черные металлы. 2009. № 12. С. 12–15.
18. Posokhov I.A., Logunova O.S., Mikov A.Yu. Method and algorithms for cascade classification of sulfur print images of billet transverse templates // Journal of Computational and Engineering Mathematics. 2016. Т. 3. № 4. С. 11–40.
19. The results of sulfur print image classification of section images / Logunova O.S., Posokhov I.A., Mikov A.Y. and all. // CEUR Workshop Proceedings 5. Сеп. “AIST-SUP 2016”: Supplementary Proceedings of the 5th International Conference on Analysis of Images, Social Networks and Texts, AIST 2016. Yekaterinburg: Centre of Information Technologies, 2016. P. 170–181.
20. Adaptive fuzzy decision tree with dynamic structure for automatic process control system of continuous cast billet production / Matsko I.I., Logunova O.S., Pavlov V.V. [et al.] // IOSR Journal of Engineering (IOSRJEN). 2012. Vol. 2. №8. P. 53–55.
21. Структура программного модуля для захвата изображения из видеопотока / Николаев А.А., Логунова О.С., Гарбар Е.А., Якименко А.Е. // Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах. 2019. Т. 7. № 2. С. 19–24

Поступила в редакцию 10 января 2020 г.

INFORMATION IN ENGLISH

AUTOMATION OF SCIENTIFIC RESEARCH OF FLAT SURFACE DISCONTINUITIES: STRUCTURAL SOLUTION OF A HARDWARE-SOFTWARE COMPLEX

Oksana S. Logunova

D.Sc. (Engineering), Professor, Director of the Institute, Civil Engineering, Architecture and Arts Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: logunova66@mail.ru. ORCID: 0000-0002-7006-8639.

Sergei M. Andreev

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Automated Control Systems, Institute of Energy and Automated Systems, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: andreev.asc@gmail.com. ORCID: 0000-0003-0735-6723.

Evgenii A. Garbar

Post graduate student, Nosov Magnitogorsk State Technical University; Chief Technical Officer, CIT “Fact” LLC, Magnitogorsk, Russia. E-mail: evgenyjam@yandex.ru, soft@studiofact.ru. ORCID: 0000-0002-2449-2789.

Artem V. Markevich

Ph.D. (Engineering), Leading Engineer, Central Control Laboratory, Magnitogorsk Iron and Steel Works, Magnitogorsk, Russia. E-mail: Markevich.AV@mmk.ru.

Artem A. Nikolaev

Student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: aantn2001@gmail.com.

Modern trends in the development of science and technology are increasingly using monitoring systems for objects from images that are captured from the video stream. To make a decision about the state of the object, it becomes necessary to obtain a library of images obtained using automated scientific research systems. The aim of the proposed work is to justify the use of automated systems for scientific research of discontinuity on a plane moving surface. The main feature of the study is the appearance of the surface of objects of an irregular shape and the occurrence of classifier conflicts when identifying objects. During the study, the block-modular structure of the system was determined and two implementation options were proposed. The proposed solutions differ in the number of drives that implement the movement of the coils and the structure of the control system. The implementation of one of the proposed solutions makes it possible for trial operation using the “Video Stream” software, which makes it possible to capture images from a video stream. The results of the trial operation of the system proved the sufficiency of using an automated research system to build a library of images captured from a video stream to study its structure and individual parts. The implemented automated system of scientific research is planned to be used to eliminate conflicts of classifiers in identifying defects in a metal strip, in particular, shells.

Keywords: violation of surface continuity, flat surface, image in a stream, research automation, software and hardware complex.

REFERENCES

1. *Informatsionnye tekhnologii v ekonomike: uchebnik* [Information technology in economics: textbook] / Under the editorship of Professor G.A. Titorenko. Moscow: YuNITI, 2001. 399 p. (In Russian)
2. Dudnikov E.G., Levin A.A. *Promyshlennyye avtomatizirovannyye sistemy upravleniya* [Industrial automatic control systems]. M.: Energy, 1973. 192 p. (In Russian)
3. Gamov V.Yu. *Avtomatizirovannyye sistemy nauchnykh issledovaniy* [Automatic systems of scientific research]. St. Petersburg: GAUP, 2015. 96 p. (In Russian)
4. Lesnykh A.N., Sarychev V.A. Automatic system of scientific research to design power supply systems of space vehicles. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akademika M.F. Reshetneva* [Bulletin of Reshetnev Siberia State Aerospace University]. 2005. No. 4. P. 48–52. (In Russian)
5. Shtrikov B.L., Shuvaev V.G., Papshev V.A. Automatic system of scientific research of ultrasonic assembling processes. *Sborka v mashinostroenii, priborostroenii* [Assembly in machine-building and instrument-making]. 2007. No. 12. P. 19–22. (In Russian)
6. Alifanov O.M., Budnik S.A., Mikhaylov V.V., et al. Automatic system of scientific measurements for investigation of promising thermotechnical materials using methods of inverse problems of heat transfer. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii* [Current high-end technology]. 2005. No. 5. P. 67–68. (In Russian)

7. Ulyanychev N.V., Kolosov V.P., Perelman Yu.M. Automatic system for scientific research of the Far East scientific center of physiology and breathing abnormalities of RAMS. *Informatika i sistemy upravleniya* [Information science and control systems]. 2008. No. 2(16). P. 103-106. (In Russian)
8. Mozgov S.S. Ways of improving the efficiency of calculations in automatic systems of scientific investigation. *Izvestiya Orlovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Informatsionnye sistemy i tekhnologii* [Proceedings of Orel State Technical University. Series: Information systems and technology]. 2007. No. 4-2. P. 277-279. (In Russian)
9. Khalkechev R.K. Theoretical foundation of multifractal simulation of functional tasks of an automatic system of scientific research of physical processes in mining. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tekhnicheskiy zhurnal)* [Mining research and information bulletin (research journal)]. 2015. No. 8. P. 136-142. (In Russian)
10. Solovlev A.M., Adamenko V.S. Development of an automatic system of scientific research of amplifying equipment using ARDUINO microprocessor board. *Tekhnicheskie nauki - ot teorii k praktike* [Technical sciences – from theory to practice]. 2016. No. 56. P. 68-74. (In Russian)
11. Pretti U. *Tsifrovaya obrabotka izobrazheniy* [Digital processing of images]. Moscow: Mir, 1982. Vol. 1. 312 p. (In Russian)
12. Shapiro L., Stokman Dzh. *Kompyuternoe zrenie* [Computer vision]. Moscow: BINOM. Laboratory of know-how, 2006. 752 p. (In Russian)
13. Gonsales R., Vuds R. *Tsifrovaya obrabotka izobrazheniy* [Digital processing of images]. Moscow: Tekhnosfera, 2005. 1072 p. (In Russian)
14. Automated processing of retinal images / A. A. Chernomorets, A. S. Krylov, A. V. Nasonov [et al.] // The 21st International Conference on Computer Graphics and Vision GraphiCon'2011. Conference Proceedings. Moscow: MAKS Press, 2011. P. 78–81.
15. Application of on-line infrared thermography in steel making industry / M. Viale, O. Martin, F. Muratori [et al.] // *Thermosense XXIX*. Edited by K.M. Knettel, V.P. Vavilov, J.J. Miles. Proc. of the SPIE. 2007. No. 6541. P. 65410H 1–20.
16. Somina S., Kadushnikov R., Razvodov A. *Tsifrovaya mikroskopiya ukhodit v onlayn* [Digital microscopic investigation goes on-line] // *Nano-industry*. 2012. No. 4. P. 42–45. (In Russian)
17. Kazakov A. A., Kazakova E. I., Kisilev D. V., et al. Development of assessment methods of microstructure nonuniformity of tube steels. *Chernye metally* [Ferrous metals]. 2009. No. 12. P. 12–15. (In Russian)
18. Posokhov I.A., Logunova O.S., Mikov A.Yu. Method and algorithms for cascade classification of sulfur print images of billet transverse templates // *Journal of Computational and Engineering Mathematics*. 2016. Vol. 3. No. 4. P. 11-40.
19. The results of sulfur print image classification of section images / Logunova O.S., Posokhov I.A., Mikov A.Y. and all. // *CEUR Workshop Proceedings 5. Ser. "AIST-SUP 2016"*: Supplementary Proceedings of the 5th International Conference on Analysis of Images, Social Networks and Texts, AIST 2016. Yekaterinburg: Centre of Information Technologies, 2016. P. 170–181.
20. Adaptive fuzzy decision tree with dynamic structure for automatic process control system of continuous cast billet production / Matsko I. I., Logunova O. S., Pavlov V. V. [et al.] // *IOSR Journal of Engineering (IOSRJEN)*. 2012. Vol. 2. No. 8. P. 53–55.
21. Nikolaev A.A., Logunova O.S., Garbar E.A., Yakimenko A.E. Structure of the program module for image capture from the video stream. *Matematicheskoe i programnoye obespechenie sistem v promyshlennoy i sotsialnoy sferakh* [Mathematical support and software in industry and in social services]. 2019. Vol. 7. No. 2. P. 19-24. (In Russian)

Автоматизация научных исследований нарушения сплошности плоской поверхности: конструкционное решение программно-аппаратного комплекса / О.С. Логунова, С.М. Андреев, Е.А. Гарбар, А.В. Маркевич, А.А. Николаев // *Электротехнические системы и комплексы*. 2020. № 1(46). С. 54-59. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-1\(46\)-54-59](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-1(46)-54-59)

Logunova O.S., Andreev S.M., Garbar E.A., Markevich A.V., Nikolaev A.A. Automation of Scientific Research of Flat Surface Discontinuities: Structural Solution of a Hardware-Software Complex. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2020, no. 1(46), pp. 54-59. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-1\(46\)-54-59](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-1(46)-54-59)

Юдинцев А.Г.¹, Ткаченко А.А.¹, Ляпунов Д.Ю.^{1,2}¹Научно-исследовательский институт автоматики и электромеханики ТУСУР, Томск²Национальный исследовательский Томский политехнический университет

МЕТОДИКА РАЗРАБОТКИ ИМИТАТОРА НАГРУЗОК ДЛЯ НАЗЕМНЫХ ИСПЫТАНИЙ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ АВТОНОМНЫХ ОБЪЕКТОВ

В статье описана методика разработки имитатора нагрузки для наземных испытаний систем электропитания автономных объектов различного назначения с применением блока повышающих преобразователей напряжения в качестве формирующего ток нагрузки электротехнического комплекса. Рассмотрена структура силовой части и системы управления блока повышающих преобразователей. Проанализированы современные методики разработки электротехнических комплексов. Предложено учитывать допустимый разброс параметров отдельных компонентов силовых схем (резисторов, конденсаторов и дросселей) при моделировании разрабатываемых электротехнических комплексов с применением современных программных продуктов, таких как *Matlab Simulink*. Созданная методика позволяет выявлять особенности работы имитаторов нагрузок на этапе разработки с учётом разброса параметров компонентов силовых схем, настраивать регуляторы с применением имитационных моделей, рассматривать множество вариантов реализации силовых схем и систем управления электротехнического комплекса. Перечисленные преимущества позволяют значительно сократить временные и стоимостные затраты на процесс разработки имитаторов нагрузок для систем электропитания автономных объектов и настройки их регуляторов. Численные и натурные эксперименты показывают хорошую корреляцию, что даёт основания для применения разработанной методики при создании новых электротехнических комплексов различного назначения и их компонентов. Удобство сохранения результатов экспериментов в виде массивов значений переменных и доступность для разработчика электротехнических комплексов имитационных моделей в среде *Simulink* позволяет использовать созданную методику для дальнейшего анализа работы изготовленного имитатора нагрузки на этапе наземных испытаний систем электропитания автономных объектов с целью совершенствования схемотехнических решений и подстройки регуляторов.

Ключевые слова: методика разработки, электротехнический комплекс, имитатор нагрузки, наземные испытания, система электропитания, автономный объект, повышающий преобразователь напряжения, разброс параметров, регулятор, имитационная модель.

ВВЕДЕНИЕ

Для наземных испытаний систем электропитания (СЭП) автономных объектов (космических [1], подводных [2], диагностических [3]) используются специальные электротехнические комплексы, именуемые имитаторами нагрузок (ИН).

Задачи разработки структурной и принципиальной схем, проектирования СЭП, обеспечения их комплектующими, сборка устройств и последующая настройка являются полной технологической цепочкой создания ИН, которые в режиме тестовых испытаний позволяют определить перспективные направления модернизации СЭП автономных объектов, для чего результаты испытаний анализируются совместно коллективами разработчиков СЭП и ИН. В результате принимаются решения по доработке изделий с целью повышения их ключевых показателей качества, таких как надёжность, долговечность, стабильность выходной координаты (ток, напряжение, мощность), полоса пропускания. Кроме того, к ИН для автономных объектов предъявляются повышенные требования к их энергосбережению. На основании анализа известных схем ИН авторами был создан, спроектирован и реализован ИН для испытаний СЭП автономных объектов (рис. 1).

В данной статье детально рассмотрен БПП (обведён штриховой линией на рис. 1). Функциональная схема одного из множества повышающих преобразователей, входящих в структуру БПП, представлена на рис. 2.

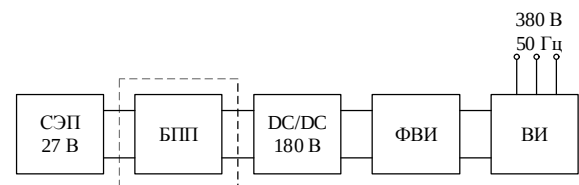


Рис. 1. Функциональная схема силового канала имитатора нагрузки силового канала:

СЭП – система электропитания; БПП – блок повышающих преобразователей, содержащий n преобразователей; DC/DC – блок преобразователей постоянного напряжения на базе автономных инверторов напряжения и выпрямителей, содержащий m преобразователей; ФВИ – фильтр ведомого инвертора; ВИ – ведомый инвертор, подключённый к мощной сети 380 В, 50 Гц

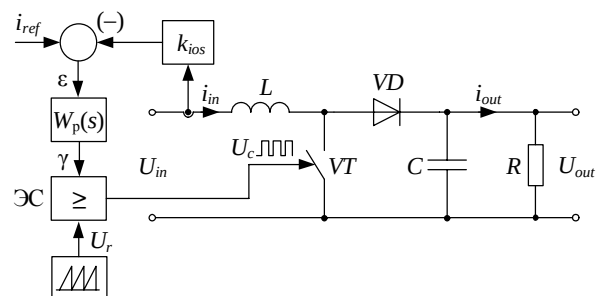


Рис. 2. Функциональная схема повышающего преобразователя: i_{ref} – ток задания; k_{ios} – коэффициент обратной связи по входному току; $W_p(s)$ – передаточная функция регулятора входного тока; ЭС – элемент сравнения; ε – ошибка по входному току; γ – сигнал управления; U_r – сигнал пилообразного напряжения; L – дроссель; C – конденсатор; R – сопротивление нагрузки; VT – транзистор; VD – диод; U_{in} – входное напряжение; U_{out} – выходное напряжение; i_{in} – входной ток; i_{out} – ток нагрузки

Отметим, что отдельный повышающий преобразователь в составе электротехнического комплекса является сложной динамической системой, что налагает определённые особенности на процесс разработки и настройки регулятора. Основные признаки сложности объектов управления перечислены в [4]. С классификацией систем в соответствии с их структурной сложностью можно познакомиться в [5], где также отмечается, что «сложность подсистем оценивается полностью независимо от системы и может отличаться от её сложности в любую сторону».

Применительно к повышающему преобразователю, сложность задачи его разработки состоит в необходимости детального математического описания силовой части для качественной настройки регуляторов и обеспечения процесса управления. Кроме того, нестационарность параметров рассматриваемого нами БПП, выражающаяся в их допустимом статистическом разбросе и дрейфе в процессе работы, также вносит свои коррективы в процесс разработки и настройки регуляторов БПП. Для выявления всех перечисленных особенностей работы электротехнического комплекса была создана предлагаемая в данной статье методика разработки ИН.

Вкратце перечислим требования к БПП ИН. Разрабатываемый БПП должен обеспечить ток нагрузки для СЭП в диапазоне от 0 до 360 А и качественно формировать форму тока (синусоида, трапеция, меандр и др.). Возможность задания формы тока нагрузки позволяет, в частности, снимать частотные характеристики СЭП, определять статические (статическая ошибка, коэффициент передачи) и динамические показатели качества (полоса пропускания по модулю и по фазе, перерегулирование, время регулирования) и обеспечивать корректную настройку регуляторов СЭП. Таким образом, от качества настройки регуляторов ИН в конечном счёте зависит качество наземных испытаний СЭП.

ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДИК РАЗРАБОТКИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

В настоящее время существует множество методик разработки электротехнических комплексов. Ниже приводятся некоторые из них, принятые авторами во внимание при создании методики разработки имитатора нагрузки.

В первую очередь выделим подход, вовлекающий понятие систем автоматизированного проектирования (САПР). Эти системы содержат программные и аппаратные средства, назначением которых является автоматизация рутинной части работы конструктора и проектировщика. Для функционирования САПР создаются соответствующие пакеты прикладных программ по расчёту входящих в электротехнический комплекс устройств, их компоновке и построению графиков и изображений. В [6] отмечается важность математической базы, на которой построена та или иная САПР, подробно описывается используемый математический аппарат и основы графического представления информации.

С целью настройки СЭП телеуправляемого необитаемого подводного аппарата в [7] предлагается применение средств когнитивной графики, что позволяет

снизить временные и стоимостные затраты на разработку, а также повысить качество настройки регуляторов. Преимуществом рассматриваемого в этой статье подхода является возможность наглядного визуального отображения показателей качества работы СЭП в процессе настройки её регуляторов.

Важной составляющей процесса проектирования СЭП автономных объектов является взаимодействие коллективов, занимающихся различными сторонами процесса, начиная с математического моделирования подсистем СЭП, заканчивая составлением перечней покупных изделий, закупкой компонентов, сборкой и настройкой ИН СЭП автономных объектов.

В [8] предложен трёхмерный параллельный инжиниринг (3DCE – *three dimensional concurrent engineering*) как метод обеспечения цепочки поставок компонентов для новых продуктов в процессе их разработки. Отмечается важность и настоятельная необходимость применения информации о предыдущих инновационных разработках в процессе создания новых. При этом на каждой стадии учитываются требования к продукту со стороны потребителя и устанавливаются партнёрские отношения с поставщиками.

В [9] отмечается важность для процесса разработки и проектирования устройств силовой электроники ERP-систем, представленных на российском рынке (Лощман (*PLM + Вертикаль*), Спрут-ТП, SAP, Oracle EBS, Галактика и 1С УПП). Предлагается методика создания электронных устройств на базе наработанных алгоритмов автоматизации процесса комплектования, реализованных в программе Excel. Описанный в этой статье подход позволяет в процессе создания устройства силовой электроники загружать номенклатуру; отлаживать как взаимодействие перечней элементов и спецификаций, так и механизм разуплодения устройств по спецификациям; инициировать процесс размещения на склад и отдел комплектации. В конечном счёте, это позволяет значительно ускорить процесс комплектования для производства, уменьшить финансовые потери и снизить риски, связанные с невыполнением сроков. Более того, используемые алгоритмы обеспечивают всесторонний анализ и контроль состояния производственных процессов и передвижения материальных ценностей в процессе разработки и изготовления ИН.

В настоящее время стало возможно объединять САПР для повышения эффективности разработки электронных устройств. Так, в [10] предлагается методика так называемого междисциплинарного проектирования (*cross-cutting design (CCD)*), обеспечивающего коллективную непрерывную работу над одним проектом с использованием САПР различного функционального назначения. При этом для разрабатываемого проекта одновременно разными специалистами производится оценка электрических и тепловых процессов, разрабатывается печатная плата, отображается 3D-модель готового устройства, что значительно снижает затраты на проектирование, изготовление и испытание прибора.

Для качественной разработки ИН СЭП необходима методика, которая позволит использовать современные программные средства для качественной настройки регуляторов ИН СЭП, выявления особенностей режимов работы – динамических и статических.

МЕТОДИКА РАЗРАБОТКИ ИМИТАТОРА НАГРУЗКИ

Принимая во внимание вышеперечисленные особенности существующих методик и подходов к разработке устройств, создана методика разработки ИН для СЭП автономных объектов, позволяющая значительно сократить временные и стоимостные затраты на процесс разработки и настройки ИН с применением среды Matlab Simulink для конструирования математических и имитационных моделей и проведения над ними ряда виртуальных экспериментов.

Пакет моделирования Matlab Simulink обладает значительными преимуществами при разработке СЭП, так как содержит готовые элементы электрических цепей с возможностью их взаимного соединения в файле Simulink [11]. Кроме того, рассматриваемая среда позволяет реализовывать силовые блоки и элементы систем управления в программном виде на языках matlab, C и C++ [12].

Таким образом, представляется возможным в процессе разработки ИН для СЭП автономных объектов задавать допустимый разброс параметров отдельных компонентов (сопротивлений, дросселей, конденсаторов), применяя характерные для них распределения вероятностей, что позволит исследовать систему на робастную устойчивость и проверить работу регуляторов в этих условиях. Отметим, что блок повышающих преобразователей в составе имитатора нагрузки является основным функциональным элементом, формирующим ток нагрузки.

В [13] подробно рассмотрены особенности моделирования одного из вариантов повышающего преобразователя в среде Matlab Simulink. В результате подтверждена работоспособность системы управления преобразователем в различных режимах работы. Авторами рассматриваемой статьи были выявлены особенности динамических процессов в различных режимах работы комплекса, при сбросе и набросе нагрузки. Адекватность модели была подтверждена на реальном объекте. В связи с этим результаты исследований, приведённые в [13], были применены при создании методики разработки ИН.

Созданная авторами методика разработки ИН для наземных испытаний СЭП автономных объектов на базе БПП выражена следующими пунктами:

1. Расчёт параметров электрической принципиальной схемы БПП в зависимости от требуемой амплитуды пульсаций входного тока, его величины.
2. Построение имитационной модели силовой части БПП в среде Matlab Simulink, её запуск в разомкнутой системе.
3. Настройка контуров регулирования входного тока каждого повышающего преобразователя ИН и внешнего контура суммарного входного тока.
4. Построение имитационной модели замкнутой системы БПП, её запуск.
5. Сравнение показателей качества переходных процессов и статических режимов с требуемыми (перерегулирование, время переходного процесса, статическая ошибка и др.), коррекция параметров регуляторов, если требуется.
6. Учёт разброса параметров элементов имитационной модели силовой схемы. Повторение процедур, приведённых в пункте 5.

7. Создание перечня покупных изделий БПП.

8. Анализ статических и динамических характеристик модели специалистами из различных проблемных областей (силовая электроника, теплотехника, системы автоматического управления), задействованных в процессе разработки ИН. Коррекция параметров устройства, если требуется.

9. Сборка и монтаж БПП.

10. Испытание ИН. Сопоставление динамических характеристик, полученных при моделировании и испытаниях. Коррекция параметров регуляторов, если требуется.

Предложенная методика позволит в значительной степени обобщить подход к проектированию как повышающих преобразователей в частности, так и основанных на них имитаторов нагрузки.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

В процессе разработки ИН в среде *Matlab Simulink* была создана имитационная модель, фрагмент которой приведён на **рис. 3**. Фрагмент включает силовую часть повышающего преобразователя ПП1 (обведён штриховой линией) и систему управления (сверху). Также показаны два повышающих преобразователя в виде блоков ПП2 и ПП3. Рассматриваемый ИН состоит из 20 повышающих преобразователей, подключённых параллельно.

Выбор количества преобразователей определяется максимальным в диапазоне регулирования значением нагрузочного тока (360 А) во входной цепи ИН, который, в свою очередь, определяется токонесущей способностью применяемых полевых транзисторов VT1...VT20 в составе каждого повышающего преобразователя. То есть формируемый имитатором нагрузки ток зависит от применяемой элементной базы силовых полупроводниковых ключей. Таким образом, среднее значение тока каждого полевого транзистора ИН составляет $360/20=18$ А.

Преимуществом рассматриваемого технического решения является значительное снижение амплитуды пульсаций входного тока за счёт временного сдвига пилообразного сигнала временной развёртки на 1 мкс для управления каждым последующим ключом БПП относительно предыдущего. Так как частота коммутаций каждого ключа составляет 50 кГц (период равен 20 мкс), а использование большей частоты приводит к повышенным потерям на переключение, то использование указанного временного сдвига при формировании сигнала управления приводит к эквивалентной частоте коммутаций 1 МГц, что является причиной значительного уменьшения коэффициента пульсаций, составляющего сотые доли процента в установившемся режиме.

На **рис. 3** сверху приведена система управления, содержащая внутренний контур тока одного преобразователя и внешний контур суммарного тока ИН. Каждый преобразователь имеет обратную связь по входному току с ПИ-регулятором, настроенным в соответствии с желаемыми показателями качества переходного процесса. Внешний контур обратной связи по суммарному входному току содержит регулятор, настроенный с учётом всех внутренних контуров каждого повышающего преобразователя на этапе разработки.

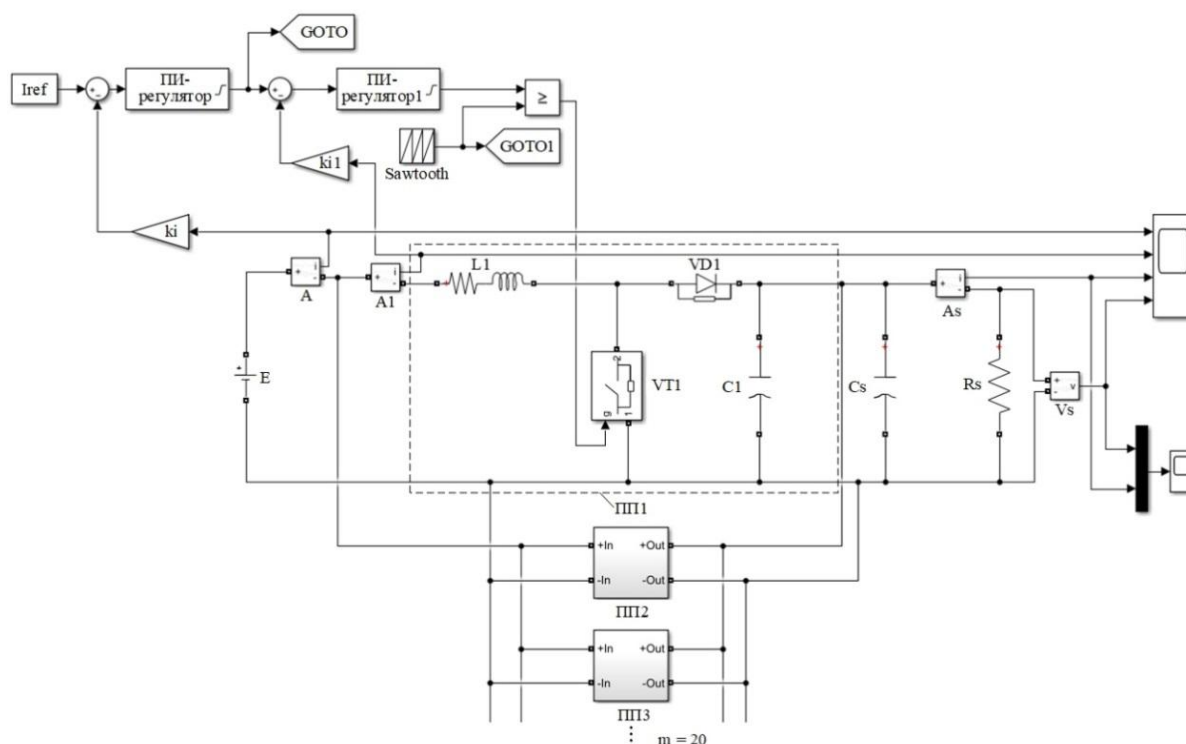


Рис. 3. Фрагмент имитационной модели имитатора нагрузки системы электропитания автономного объекта: I_{ref} – задание тока на входе блока повышающих преобразователей; ПИ-регулятор и ПИ-регулятор1 – пропорционально-интегральные регуляторы входного тока БПП и первого повышающего преобразователя соответственно; ki и $ki1$ – коэффициенты обратной связи по входному току БПП и току первого преобразователя соответственно; $GOTO$ и $GOTO1$ – блоки, передающие в систему управления сигнал с выхода регулятора входного тока БПП и сигнал пилообразного задающего напряжения соответственно; A , $A1$ и As – амперметры; Vs – вольтметр; ПП1, ПП2, ПП3, ... – повышающие преобразователи БПП, их количество $m = 20$; E – выходное напряжение испытуемой системы электропитания; $L1$, $C1$, Cs , Rs – параметры силовой цепи: индуктивность входного дросселя, ёмкость одного повышающего преобразователя, выходная ёмкость БПП, сопротивление нагрузки соответственно; $VT1$ – полевой транзистор; $VD1$ – диод; справа расположены два осциллографа

При моделировании учитываются возможные отклонения параметров компонентов ИН путём использования функции *rand*, реализующей нормальное распределение. Допустимые разбросы параметров задаются исходя из паспортных данных резисторов ($\Delta R = 5\%$), конденсаторов ($\Delta C = 15\%$) и дросселей ($\Delta L = 10\%$). Все функции и параметры задаются в окне свойств модели (*Model properties* → *Callbacks* → *InitFcn*).

Результаты численного эксперимента ИН в виде графика входного тока одного повышающего преобразователя от времени $i_{in}(t)$ приведены на рис. 4. Полученный график имеет максимум во время $t_{max} = 0,5$ мс, что связано с зарядкой выходной ёмкости повышающего преобразователя. Отметим, что в макетном образце ИН подобного скачка тока не наблюдается, так как на этапе проектирования синтезируется алгоритм плавного запуска, заключающийся в плавном нарастании сигнала задания на суммарный ток, формируемый ИН, с интенсивностью, вычисленной на основании рис. 3.

При этом предполагается, что сигнал задания на суммарный ток нагрузки должен линейно увеличиваться от 0 до номинального значения за время, большее, чем 2,5 мс.

После получения результатов численных экспериментов проводятся испытания непосредственно на

макете ИН. При этом параметры регулятора определяются исходя из разработанной имитационной модели, что значительно упрощает процедуру его настройки. Данные вышеперечисленных экспериментов сравниваются и корректируются с учётом особенностей разброса параметров компонентов макетного образца. Таким образом, достигается значительная экономия временных и стоимостных затрат на разработку и настройку ИН.

Цикл нагружения ИН приведён на рис. 5.

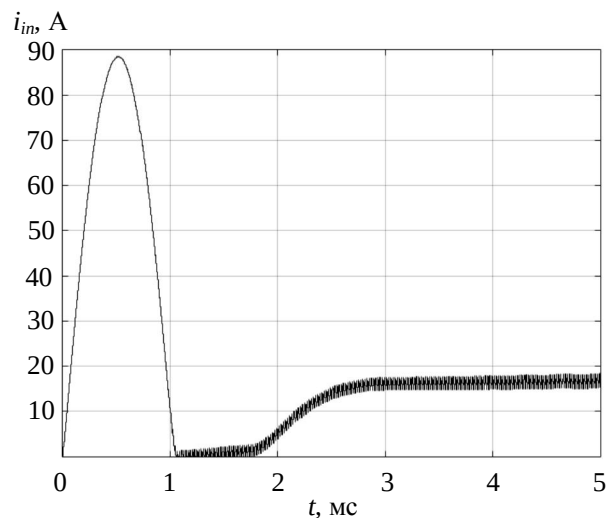


Рис. 4. Зависимость входного тока от времени

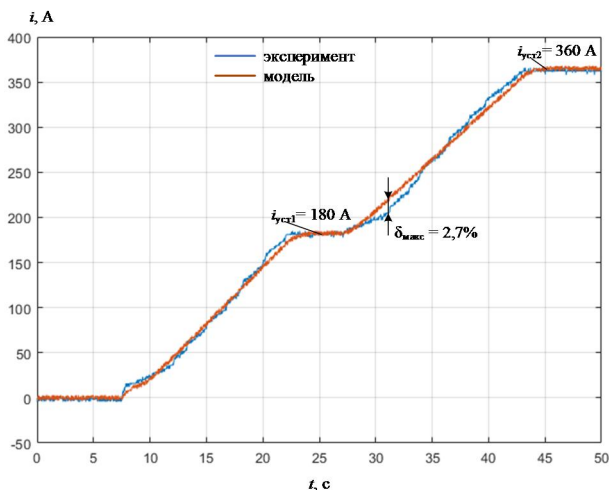


Рис. 5. Цикл нагружения имитатора нагрузки

В момент времени 7,5 с на вход системы подаётся сигнал задания, соответствующий 180 А. Далее в момент времени 27,5 с сигнал задания удваивается, что соответствует заданию на входной ток 360 А. Как видно из рис. 5, величина динамической ошибки, характеризующая максимальное отклонение экспериментальных исследований от результатов численного моделирования, составляет $\delta_{\max} = 2,7\%$. В статических же режимах величина ошибки пренебрежимо мала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная методика разработки ИН для СЭП автономных объектов позволяет исследовать электротехнические комплексы с применением современных средств моделирования с учётом разброса параметров компонентов. На основе полученной имитационной модели настроены регуляторы модуля повышающего преобразователя ИН и проанализированы графики переходных процессов. БПП обеспечивает ток нагрузки СЭП в диапазоне от 0 до 360 А, что удовлетворяет предъявляемым требованиям. Использование разработанной методики позволяет значительно сократить временные и стоимостные затраты на настройку регуляторов, так как настройка происходит на этапе разработки. Отметим, что в процессе настройки возможно рассмотрение нескольких вариантов регуляторов, настроенных на один из оптимумов – линейный, технический, симметричный либо иной в зависимости от требуемых показателей качества. В рассматриваемом случае был применён вариант настройки на линейный оптимум. Применение программного пакета *Matlab Simulink* позволило не только производить схемотехническое описание, но и учитывать разброс параметров компонентов, а также их изменение в процессе работы электротехнического комплекса.

Результаты численных экспериментов сохраняются в виде массивов данных, организованных в компактные файлы. Высокая скорость моделирования позволяет также отказаться от сохранения данных, так как доступность файла *Simulink* с моделью преобразователя подразумевает доступность для разработчика всего множества вариантов параметров элементов ИН.

Численные и натурные эксперименты показали хорошую корреляцию. Ошибка по выходному напряжению БПП не превышает 3%. Ошибка по суммарному

току преобразователя составляет не больше 2,7%. Таким образом, разработанная методика позволяет значительно сократить временные и стоимостные затраты как на проектирование, так и на экспериментальные исследования имитаторов нагрузок, выявляя особенности работы электротехнического комплекса на стадии разработки.

Дальнейшие исследования по совершенствованию методики разработки имитатора нагрузки будут направлены на выявление особенностей электромагнитных процессов в комплексе и учёт взаимного влияния всех компонентов силового канала ИН, приведённых на рис. 1.

Статья подготовлена в рамках выполнения работы Г/Б 2/20/1 «Изучение фундаментальных проблем создания и теоретические исследования систем ресурсосберегающей интеллектуальной силовой электроники с использованием технологий интернет вещей и радиофотоники на основе компонентной базы собственной разработки».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Системы электропитания космических аппаратов / Б.П. Соустин, В.И. Иванчура, А.И. Чернышёв, Ш.Н. Исляев. Новосибирск: ВО «Наука», Сибирская издательская фирма, 1994. 318 с.
2. Система электропитания глубоководного аппарата с высоковольтной передачей энергии постоянного тока по кабель-тросу / В.М. Рулевский, В.А. Чех, В.Г. Букреев, Р.В. Мещеряков // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2018. № 1 (195). С. 155-167.
3. Поезжаева Е.В., Горетова В.А. Модернизация внутритрубной диагностической системы // Молодой учёный. 2019. № 1 (239). С. 43-46.
4. Расстригин Л.А. Современные принципы управления сложными объектами. М.: Сов. радио, 1980. 232 с.
5. Кохановский В.А., Сергеева М.Х., Комахидзе В.Г. Оценка сложности систем // Вестник Донского государственного технического университета. 2012. № 4 (65). С. 22-26.
6. Шенен П., Коснар М., Гардан И. Математика и САПР: в 2-х кн. Кн. 1. М.: Мир, 1988. 204 с.
7. Моделирование системы электропитания телеуправляемого необитаемого подводного аппарата с использованием средств когнитивной графики / Д.Ю. Ляпунов, А.Е. Янковская, В.М. Рулевский, А.А. Правикова // Труды конгресса по интеллектуальным системам и информационным технологиям «IS&IT'17», 2-9 сентября 2017 г., Дивноморское, Россия. Таганрог: Изд-во Ступица С.А., 2017. Т. 1. С. 265-271.
8. Bakås O., Magerøy K., Sjøbakk B., Thomassen M.K. Performing supply chain design in three-dimensional concurrent engineering: Requirements and challenges // IFIP Advances in Information and Communication Technology: Proc. of the International Conference. September 7-9, 2015, Tokyo, Japan. Springer Nature, 2015, pp. 549-557.
9. Пучков А.Н., Юдинцев А.Г. Внедрение ERP-систем в производственные и финансовые процессы для увеличения уровня автоматизации управления // Научная сессия ТУСУР-2019: материалы Международной научно-технической конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, 22-24 мая 2019 г., Томск, Россия. Томск: В-Спектр, 2019. Ч. 2. С. 146-149.
10. Korolev P.S., Novikov K.V., Polesskiy S.N., Korotkova G.K. The Implementation of the Cross-cutting Design of Electronic Communication Modules Using National Instruments Technologies // Proc. of International Siberian Confer-

- ence on Control and Communications SIBCON, April 18–20, 2019, Tomsk, Russia. IEEE: 2019. Paper № 8729585.
11. Герман-Галкин С.Г. Виртуальные лаборатории полупроводниковых систем в среде Matlab-Simulink. СПб.: Лань, 2018. 443 с.
 12. Shaffer R. Fundamentals of Power Electronics with Matlab. Boston, Massachusetts, Charles River Media, 2007, 384 p.
 13. Володин Е.В., Осипов О.И. Экспериментальное исследование повышающего DC-DC-преобразователя // Электротехнические системы и комплексы. 2019. №3(44). С. 47-52.

Поступила в редакцию 31 января 2020 г.

INFORMATION IN ENGLISH

METHODOLOGY OF LOAD SIMULATOR DESIGN FOR GROUND TESTING OF POWER SUPPLY SYSTEMS OF AUTONOMOUS OBJECTS

Anton G. Yudintsev

D.Sc. (Engineering), Director, the Research Institute of Automation and Electromechanics of TUSUR (Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics), Tomsk, Russia. E-mail: yag@niiam.tomsk.ru.

Alexander A. Tkachenko

D.Sc. (Engineering), Director, Head of the Information Technology Department of the Research Institute of Automation and Electromechanics of TUSUR (Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics), Tomsk, Russia. E-mail: aem@tusur.ru.

Danil Yu. Lyapunov

D.Sc. (Engineering), Senior Research Associate, the Research Institute of Automation and Electromechanics of TUSUR (Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics), Associate Professor of the Department of Power and Electrical Engineering, School of Energy & Power Engineering of the National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia. E-mail: lyapdy@gmail.com. ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9326-3595>

The paper deals with the methodology for the design of load simulators for ground testing of power supply systems for various autonomous objects using a boost converter as a current wave-forming electrical complex. The structure of the power unit and control system of the boost converter block is considered. The modern methodologies of design of electrical complexes are analyzed. It is suggested to take into account the allowable variation in the parameters of power electronic components (resistors, capacitors and inductors) when modeling the complexes under development using modern software such as Matlab Simulink. The created methodology makes it possible to identify the peculiarities of the load simulator operation during the development stage, to take into account the variation of the parameters of the power circuit components, to adjust the regulators using simulation models, to analyze a set of design options for power circuits and control systems of the electrical complex. This significantly reduces the time and cost of the simulator design process as well as controller tuning. Numerical and laboratory-scale experiments showed good correlation, which gives grounds for applying the developed methodology to create new electrical complexes for various purposes and their components. The convenience of saving the results of experiments in the form of arrays of variables and the availability of simulation models of electrical complexes in Matlab Simulink for the developer allows application of the created methodology for further analysis of the load simulator operation at the stage of ground testing of power supply systems for autonomous objects in order to improve circuitry solutions and to additionally adjust the regulators if necessary.

Keywords: methodology of design, electrical complex, load simulator, ground tests, power supply system, autonomous object, boost converter, parameter variation, controller, simulation model.

REFERENCES

1. Soustin B.P., Ivanchura V.I., Chernyshev A.I., Islyaev S.N. *Sistemy electropitaniya kosmicheskikh apparatov* [Power Supplies of Space Vehicles]. Novosibirsk, VO Nauka, Siberian Publishing Company, 1994. 318 p. (In Russian)
2. Rulevskiy V.M., Chekh V.A., Bukreev V.G., Mescheryakov R.V. Power Supply System for Deep Sea Underwater Vehicle with HVDC Power Transmission via Rope-cable. *Izvestiya Yuzhnoy federalnoy universiteta. Tehnicheskiye nauki* [Bulletin of South Federal University. Technical Sciences], 2018, no. 1 (195), pp. 155–167. (In Russian)
3. Poezhaeva E.V., Goretova V.A. Modernization of Pipeline Diagnostic System. *Molodoy ucheniy* [Young Scientist], 2019, no. 1 (239), pp. 43–46. (In Russian)
4. Rasstrigin L.A. *Sovremennye principy upravleniya slozhnyimi ob'yektami* [Modern Principles for Complex Objects Control]. Moscow, Soviet Radio, 1980, 232 p. (In Russian)
5. Kohanovskiy V.A., Sergeeva M.H., Komahidze V.G. Assessment of System Complexity. *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Don State Technical University], 2012, no. 4 (65), pp. 22–26. (In Russian)
6. Chenin P, Cosnard M, Gardan Y. *Matematika i SAPR* [Mathematics and CAD]. Moscow, Mir; 1988, 204 p. (In Russian)
7. Lyapunov D.Y., Yankovskaya A.E., Rulevskiy V.M., Pravikova A.A. Power Supply System Modeling for Remotely Operated Unmanned Underwater Vehicle Using Cognitive Graphic Tools. *Trudy kongressa po intellektualnym sistemam i informatsionnym tekhnologiyam «IS&IT'17»* [Proceedings of the Congress on Intelligent Systems and Information Technologies “IS&IT’17”] Divnomorskoye, Russia, 2017, September 2–9, Taganrog, Stupin Publishing House; 2017, vol. 1, pp. 265–271. (In Russian)
8. Bakås O., Magerøy K., Sjøbakk B., Thomassen M.K. Performing supply chain design in three-dimensional concurrent engineering: Requirements and challenges. *IFIP Advances in Information and Communication Technology: Proc. of the International Conference. September 7–9, 2015, Tokyo, Japan. Springer Nature*, 2015, pp. 549–557.
9. Puchkov A.N., Yudintsev A.G. Implementing ERP-systems in Production and Financial Processes for Control Automation Level Improvement. *Nauchnaya sessiya TUSUR-2019: materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh* [Scientific Session TUSUR-2019: Proceedings of International Scien-

- tific and Technical Conference], Tomsk, Russia, 2019, May 22–24, Tomsk, V–Spectr, 2019, pp. 146–149. (In Russian)
 10. Korolev P.S., Novikov K.V., Polesskiy S.N., Korotkova G.K. The Implementation of the Cross-cutting Design of Electronic Communication Modules Using National Instruments Technologies. Proc. of International Siberian Conference on Control and Communications SIBCON, April 18–20, 2019, Tomsk, Russia. IEEE: 2019. Paper № 8729585.
 11. German-Galkin S.G. *Virtualnye laboratorii poluprovodnikovyyh sistem v srede Matlab-Simulink* [Virtual Semiconductor System Labs in Matlab-Simulink]. St. Petersburg, Lan, 2018, 443 p. (In Russian)
 12. Shaffer R. *Fundamentals of Power Electronics with Matlab*. Boston, Massachusetts, Charles River Media, 2007, 384 p.
 13. Volodin E.V., Osipov O.I. Experimental Research of Stepup DC-DC Converter. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2019, no. 3(44), pp. 47-52. (In Russian)
-
- Юдинцев А.Г., Ткаченко А.А., Ляпунов Д.Ю. Методика разработки имитатора нагрузок для наземных испытаний систем электропитания автономных объектов // *Электротехнические системы и комплексы*. 2020. № 1(46). С. 60-66. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-1\(46\)-60-66](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-1(46)-60-66)
- Yudintsev A.G., Tkachenko A.A., Lyapunov D.Yu. Methodology of Load Simulator Design for Ground Testing of Power Supply Systems of Autonomous Objects. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2020, no. 1(46), pp. 60-66. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-1\(46\)-60-66](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-1(46)-60-66)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Аминов Дилшод Саидович – аспирант, кафедра теоретических основ электротехники, Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), г. Челябинск, Россия. E-mail: Dilshod-aminov-93@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8712-8063>.

Андреев Сергей Михайлович – канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой, кафедра автоматизированных систем управления, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия. E-mail: andreev.asc@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0735-6723>.

Вавилов Вячеслав Евгеньевич – канд. техн. наук, доцент, ведущий научный сотрудник, кафедра электромеханики, Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа, Россия. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5695-6974>.

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

Воронин Сергей Григорьевич – д-р техн. наук, профессор, кафедра летательных аппаратов, Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), г. Челябинск, Россия. E-mail: voroninsg@susu.ru.

Гарбар Евгений Александрович – технический директор, ООО ЦИТ «Факт», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: soft@studiofact.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2449-2789>.

Герасин Александр Анатольевич – канд. экон. наук, доцент, заместитель генерального директора, Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем, г. Уфа, Россия.

Зиннатуллина Гузель Салаватовна – инженер, кафедра электромеханики, Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа, Россия. E-mail: zinnatullina95@list.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9254-8369>.

Исмаилов Флюр Рашидович – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой, кафедра электромеханики, Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа, Россия. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2525-9815>.

Климаш Владимир Степанович – д-р техн. наук, профессор, кафедра промышленной электроники, Комсомольский-на-Амуре государственный университет, г. Комсомольск-на-Амуре, Россия. E-mail: klimash@yandex.ru.

Кожевников Игорь Олегович – мастер производственного обучения, Отделение №1 «Информационные технологии», Многопрофильный колледж, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия.

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

Косматов Валерий Иванович – канд. техн. наук, профессор, кафедра автоматизированного электропривода и мехатроники, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия.

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>.

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. E-mail: Logunova66@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7006-8639>.

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

Ляпунов Данил Юрьевич – канд. техн. наук, старший научный сотрудник, Научно-исследовательский институт автоматики и электромеханики ТУСУР «НИИ АЭМ ТУСУР», доцент, отделение электроэнергетики и электротехники, инженерная школа энергетики, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия. E-mail: lyapdy@gmail.com. ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9326-3595>.

Маркевич Артем Валерьевич – канд. техн. наук, ведущий инженер, лаборатория ДиРБ, ЦЛК, ПАО «ММК», г. Магнитогорск, Россия.

Николаев Артем Андреевич – студент, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия.

Панарина Мария Сергеевна – студент, кафедра электроснабжения промышленных предприятий, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия.

Панова Евгения Александровна – канд. техн. наук, доцент, кафедра электроснабжения промышленных предприятий, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия. E-mail: ea.panova@magtu.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9392-3346>.

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>.

Соколовский Михаил Александрович – аспирант, кафедра промышленной электроники, Комсомольский-на-Амуре государственный университет, г. Комсомольск-на-Амуре, Россия. E-mail: Socel@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7311-5584>.

Ткаченко Александр Александрович – канд. техн. наук, директор, заведующий информационно-техническим отделом, Научно-исследовательский институт автоматики и электромеханики ТУСУР «НИИ АЭМ ТУСУР», г. Томск, Россия. E-mail: aem@tusur.ru.

Храмшин Рифхат Рамазанович – канд. техн. наук, доцент, кафедра электроснабжения промышленных предприятий, институт энергетики и автоматизированных систем, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия.

Храмшин Тимур Рифхатович – канд. техн. наук, доцент, кафедра электроснабжения промышленных предприятий, институт энергетики и автоматизированных систем, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия.

Чернышев Алексей Дмитриевич – инженер, конструкторское бюро электропривода, ООО НПП «Резонанс», г. Челябинск, Россия. E-mail: Ad.chernyshev@icloud.com.

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

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

Юдинцев Антон Геннадьевич – канд. техн. наук, директор, Научно-исследовательский институт автоматики и электромеханики ТУСУР «НИИ АЭМ ТУСУР», г. Томск, Россия. E-mail: yag@nii.aem.tomsk.ru

Уважаемые коллеги!

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

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

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

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

05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты (технические науки);

05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы (технические науки);

05.09.10 – Электротехнология (технические науки);

05.09.12 – Силовая электроника (технические науки);

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

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

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

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

05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы (технические науки)

05.14.04 – Промышленная теплоэнергетика (технические науки).

Журнал публикует научные работы по следующим рубрикам:

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

Публикация статей является бесплатной.

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

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

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

Пакет подаваемых документов:

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



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



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

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

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



Перечень направлений подготовки в рамках НОЦ для бакалавров и магистрантов:

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

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

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