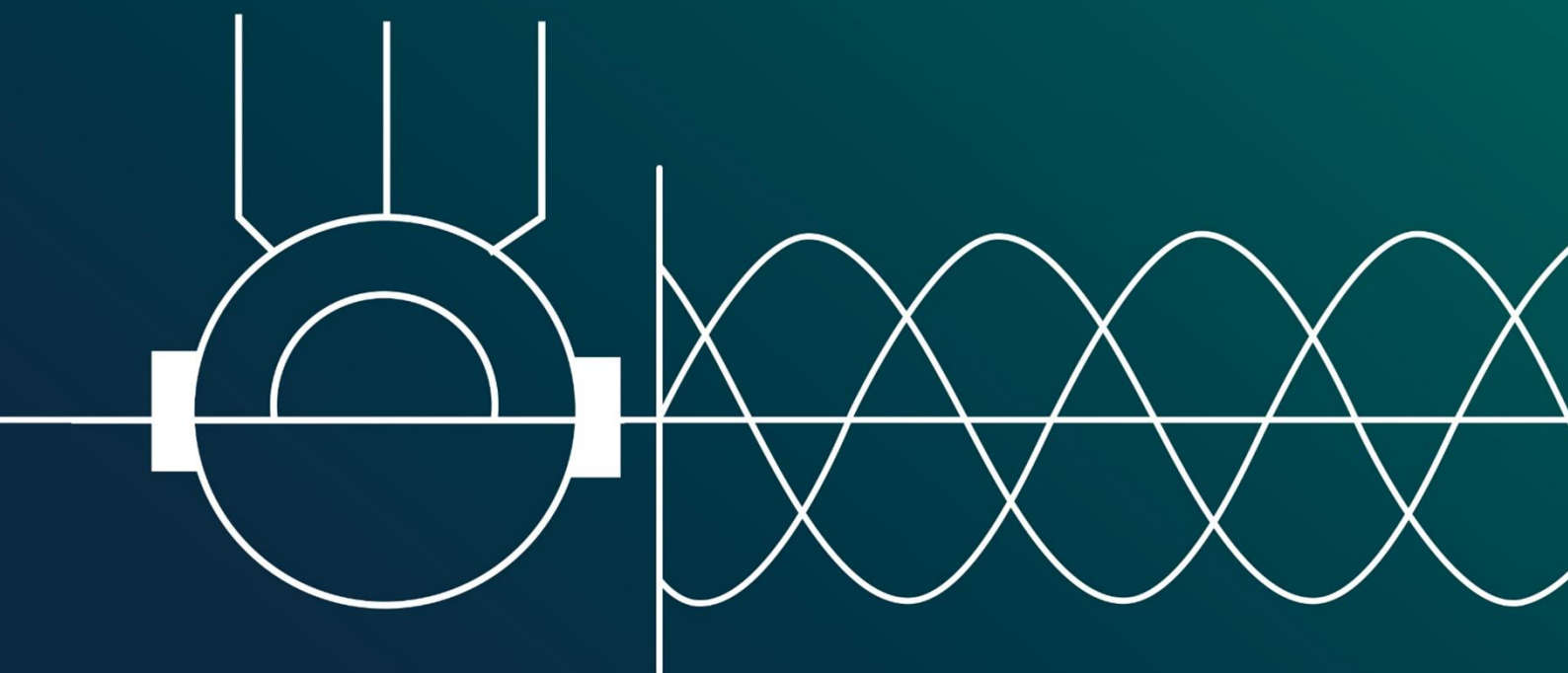


ЭЛЕКТРО- ТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

№ 4(61)

2023 г.



ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

ИЗДАЕТСЯ С ЯНВАРЯ 1996 Г.

№ 4(61), ДЕКАБРЬ 2023

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

Главный редактор:

В.Р. Храмишин – 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.

Члены редколлегии:

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

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

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

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

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

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

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

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

О.А. Кравченко – проф., д-р техн. наук,
Тульский государственный университет,
г. Тула, Россия;

Б.М. Логинов – канд. техн. наук,
ПАО «ММК», г. Магнитогорск, Россия;

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

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

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

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

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

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

А.А. Радионов – проф., д-р техн. наук,
Московский политехнический университет,
г. Москва, Россия;

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

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

Технические редакторы:

Н.П. Боярова – МГТУ им. Г.И. Носова,
г. Магнитогорск, Россия;

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

© ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2023

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, ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»
e-mail: ecis.red@gmail.com

Адрес издателя:

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

Адрес типографии:

455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск, пр. К. Маркса, 45/1,
ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»
участок оперативной полиграфии.

Выход в свет 25.12.2023. Заказ 404. Тираж 500 экз.
Цена свободная.

ELECTROTECHNICAL SYSTEMS AND COMPLEXES

PUBLISHED SINCE JAN., 1996

NO. 4(61), DEC., 2023

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

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.

Editor Board Members:

S.M. Andreev – Associate Professor, D.Sc.
(Engineering), NMSTU, Magnitogorsk, Russia;
I.V. Bochkarev – Professor, D.Sc. (Engineering),
KSTU, Bishkek, Kyrgyzstan;
N.F. Dzhagarov – Professor, D.Sc.
(Engineering), NVNA, Varna, Bulgaria;
A.M. Zyuzev – Associate Professor, D.Sc.
(Engineering), UrFU named after the first
President of Russia B.N.Yeltsin,
Ekaterinburg, Russia;
E.N. Ishmet'ev – D.Sc. (Engineering),
of R&D NMSTU, Magnitogorsk, Russia;
A.S. Karandaev – Professor, D.Sc. (Engineering),
NMSTU, Magnitogorsk, Russia;
A.L. Karyakin – Senior Research Associate, D.Sc.
(Engineering), UFMU, Ekaterinburg, Russia;
G.P. Kornilov – Professor, D.Sc. (Engineering),
NMSTU, Magnitogorsk, Russia;

O.A. Kravchenko – Professor, D.Sc.
(Engineering), Tula State University, Tula,
Russia;

B.M. Loginov – Ph.D. (Engineering),
MMK PJSC, Magnitogorsk, Russia;

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

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

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

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

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

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

A.A. Radionov – Professor, D.Sc. (Engineering),
Moscow Polytech University, Moscow, Russia;

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

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

Technical Editors:

N.P. Boyarova – NMSTU, Magnitogorsk, Russia;
E.A. Khramshina – NMSTU, Magnitogorsk, Russia.

© FSBEI HE NMSTU, 2023

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

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

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

Founder – Nosov Magnitogorsk State Technical University (38, pr. Lenina, Magnitogorsk 455000, Chelyabinsk Region)
16+ in accordance with Federal Law no. 436-FZ dated 29.12.10

The publisher:

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

The editorial office:

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

The printing-office:

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

Publication date: 25.12.2023. Order 404. Circulation: 500.
Open price.

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА	4
<i>Масленников Т.К., Кулик Е.С., Жарков А.А., Фёдорова К.Г., Благодаров Д.А.</i> Влияние метода широтно-импульсной модуляции на коэффициент нелинейных искажений тока электродвигателя в авиационном электроприводе..	4
<i>Зюзев А.М., Зеленцов В.И., Ипполитов В.В., Пластун А.Т.</i> Исследование возможностей регулирования электрического тока и скорости в высокоэффективных приводах прокатных станов	12
<i>Писаревский Ю.В., Писаревский А.Ю., Тикуннов А.В., Титова Л.Н., Бурковский А.В.</i> Методика определения параметров электродвигателя винтомоторной пары беспилотного квадрокоптера	19
<i>Шахбиева К.А., Мугалимов Р.Г., Мугалимова А.Р.</i> Методика выбора основного электрооборудования для автономного транспортного средства	27
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА	38
<i>Александров Н.В., Шевцов Д.Е., Ядагев Э.Г., Дашеев Д.Е.</i> Влияние высокотемпературных сверхпроводящих токоограничивающих устройств резистивного типа на устойчивость электроэнергетических систем ..	38
<i>Корнилов Г.П., Газизова О.В., Боцкарев А.А., Шарфутдинов Д.М., Мороз А.А.</i> Разработка системы возбуждения автономного синхронного генератора малой мощности.....	46
ИНФОРМАЦИОННОЕ, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ	53
<i>Соловьев А.Э., Кравченко О.А.</i> Использование математической модели обобщенной трехступенной электрической машины	53
ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА, АВТОМАТИКА И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ	60
<i>Самохин Д.В.</i> Методика автоматизированной оценки эффективности применения адаптивных комплексов энергосбережения на предприятиях..	60
<i>Логинов Б.М.</i> Оценка временных задержек при обмене информацией в структурах цифровых двойников электромеханических и гидравлических систем ..	67
МОНИТОРИНГ, КОНТРОЛЬ И ДИАГНОСТИКА ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ.....	76
<i>Бершадский И.А., Гладков А.Ю., Згарбул А.В., Шлепнёв С.В., Мых А.Д.</i> Метод идентификации последовательного дугового пробоя на основе дискретного вейвлет-алгоритма	76
СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	82

CONTENT

THEORY AND PRACTICE OF AUTOMATED ELECTRIC DRIVE.....	4
<i>Maslennikov T.K., Kulik E.S., Zharkov A.A., Fedorova K.G., Blagodarov D.A.</i> Influence of the PWM Strategy on Total Harmonic Distortion of Electric Motor Current in an Aircraft Electric Drive	4
<i>Zyuzev A.M., Zelentsov V.I., Ippolitov V.V., Plastun A.T.</i> Possibilities of Regulating Electric Current and Speed in High-Efficiency Rolling Mill Drives	12
<i>Pisarevskiy Yu.V., Pisarevskiy A.Yu., Tikunov A.V., Titova L.N., Burkovskiy A.V.</i> Methodology for Determining the Electric Motor Parameters of an Unmanned Quadcopter Propeller Pair.....	19
<i>Shakhbieva K.A., Mugalimov R.G., Mugalimova A.R.</i> Methodology for Selection of Main Electrical Equipment for an Autonomous Vehicle.....	27
ELECTRICAL ENGINEERING	38
<i>Aleksandrov N.V., Shevtsov D.E., Yadagaev E.G., Dasheev D.E.</i> Resistive Type HTS FCL Influence on Power System Stability.....	38
<i>Kornilov G.P., Gazizova O.V., Bochkarev A.A., Sharafutdinov D.M., Moroz A.A.</i> Development of Excitation System for a Low-Power Autonomous Synchronous Generator	46
TECHNICAL SYSTEMS DATAWARE AND SOFTWARE	53
<i>Solovyev A.Je., Kravchenko O.A.</i> Using a Mathematical Model of a Generalized Three-Stage Electric Machine.....	53
POWER ELECTRONICS, AUTOMATION AND CONTROL SYSTEMS.....	60
<i>Samokhin D.V.</i> Methodology for Automated Assessment of Adaptive Energy Saving Complex Effectiveness at Enterprises.....	60
<i>Loginov B.M.</i> Time Lag Assessment during Information Interchange within the Digital Twins Structures of Electromechanical and Hydraulic Systems	67
MONITORING, DIAGNOSTICS AND CONTROL OF ELECTRIC EQUIPMENT	76
<i>Bershadsky I.A., Gladkov A.J., Zgarbul A.V., Shlepnev S.V., Myh A.D.</i> Method of Series arc Fault Detection Using Discrete Wavelet Transform Algorithm.....	76
INFORMATION ABOUT THE AUTHORS.....	82

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

УДК 621.331

[https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-4\(61\)-4-11](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-4(61)-4-11)

Масленников Т.К., Кулик Е.С., Жарков А.А., Фёдорова К.Г., Благодаров Д.А.

Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва

ВЛИЯНИЕ МЕТОДА ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИИ НА КОЭФФИЦИЕНТ НЕЛИНЕЙНЫХ ИСКАЖЕНИЙ ТОКА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ В АВИАЦИОННОМ ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ

В представленной статье рассматривается влияние метода широтно-импульсной модуляции (ШИМ) на коэффициент нелинейных искажений токов, также известный как индекс суммарных гармонических искажений (THD_i) электродвигателя, для авиационного синхронного электропривода с возбуждением от постоянных магнитов. Особенностью авиационного тягового привода является большая частота первой гармоники тока двигателя. Это связано с тем, что от авиадвигателей требуются большие скорости вращения для обеспечения необходимой тяги для полета. Помимо этого, проектировщики электрических двигателей для минимизации тока электродвигателя при необходимом крутящем моменте проектируют электродвигатели с большим числом пар полюсов, что приводит к маленькому соотношению частоты ШИМ к частоте первой гармоники тока. Исследование направлено на нахождение оптимального метода ШИМ с точки зрения индекса суммарных гармонических искажений тока двигателя и потерь в инверторе с использованием математической модели электропривода. Рассматриваются векторная ШИМ с привязкой к отрицательной шине звена постоянного тока, векторная ШИМ с переменной привязкой и ШИМ методом мгновенных фазных потенциалов. Также затрагивается влияние применяемого метода ШИМ на пульсации крутящего момента. В качестве автономного инвертора напряжения применяется двухуровневый трехфазный инвертор на базе SiC MOSFET. Инверторы на базе SiC MOSFET позволяют получить большую удельную мощность по сравнению с инверторами на базе Si IGBT, что актуально для рассматриваемого применения. Результаты моделирования показали, что метод векторной ШИМ с привязкой к отрицательной шине позволяет получить наименьший индекс суммарных гармонических искажений при условии равных коммутационных потерь для всех рассматриваемых методов ШИМ.

Ключевые слова: широтно-импульсная модуляция, индекс суммарных гармонических искажений, автономный инвертор напряжения, синхронный электропривод, SiC MOSFET

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы электрический привод (ЭП) все чаще применяется в летательных аппаратах в качестве тягового привода [1, 2]. Переход на электрическую тягу имеет ряд преимуществ: электрический привод имеет лучший КПД и удельную мощность [3] по сравнению с двигателями внутреннего сгорания (ДВС) или турбореактивными двигателями (ТРД), электрическая тяга экологичнее, что актуально на фоне ужесточения требований к выбросам CO_2 , электропривод значительно тише двигателей на жидком топливе. Основным недостатком применения ЭП является низкая удельная энергоемкость энергоносителя, в данном случае аккумуляторных батарей по сравнению с жидкостным топливом. Так, удельная энергоемкость дизельного топлива составляет около 20 МДж/кг, тогда как литий-ионный аккумулятор всего 0,6 МДж/кг. Из-за этого применение электрической тяги в дальней авиации является проблематичным: масса АКБ превышает критическое значение, когда вся полезная мощность будет тратиться на перевозку самого АКБ. Однако актуально применение в малой авиации: самолеты малой грузоподъемности, беспилотные летательные аппараты.

Перспективные применения тягового ЭП в летательных аппаратах можно отнести к двум группам. Первое – это тяговый привод воздушного винта, когда электропривод непосредственно приводит в движение летательный аппарат. Данное применение перспективно для летательных аппаратов с малой взлетной мас-

сой. Второе – использовать электропривод в качестве стартер-генератора авиационного двигателя (ДВС или ТРД). В данном применении электродвигатель, управляемый от инвертора напряжения, в стартерном режиме раскручивает тяговый ТРД до оборотов розжига, или в режиме холодной прокрутки. Как только ТРД начинает самостоятельную работу, электродвигатель из двигательного режима переходит в генераторный и с использованием полупроводникового преобразователя формируется бортовая сеть постоянного и/или переменного тока.

В качестве электродвигателя для описанных применений используется синхронный двигатель с возбуждением от постоянных магнитов (СДПМ), так как данный тип двигателя обладает наилучшим КПД по сравнению с другими типами электродвигателей – не требует дополнительной энергии на возбуждение. Для управления СДПМ применяется автономный инвертор напряжения (АИН). АИН может строиться по многоуровневой топологии, которая позволяет улучшить КПД инвертора за счет уменьшения коммутационных потерь и улучшить гармонический состав выходного тока за счет формы выходного напряжения, которая приближена к синусоидальной [4, 5]. Однако практического применения многоуровневого инвертора в авиационных судах мало. К тому же многоуровневые инверторы требуют большего количества силовых компонентов, драйверов транзисторов, дополнительных алгоритмов и аппаратных средств выравнивания напряжений звена постоянного тока (ЗПТ), что потенциально снижает надежность системы.

АИН может быть на базе Si IGBT- или SiC MOSFET-транзисторов. Мировые исследования пока-

зывают, что инверторы из MOSFET-транзисторов на карбиде кремния имеют большую удельную мощность по сравнению с инверторами на IGBT-транзисторах [3]. Топология трехфазного двухуровневого инвертора на базе трех полумостов широко применяется в различных сферах и крайне хорошо изучена, проста и надежна. Основной проблемой применения ШИМ является наличие высших гармоник в токе, которые дополнительно нагревают обмотки статора и вызывают пульсации крутящего момента. Таким образом, актуальным объектом исследования является двухуровневый АИН на базе SiC MOSFET.

Существует несколько подходов к улучшению гармонического состава токов. Один из них – установка синусного фильтра между инвертором и двигателем [6], другой – применение определенного метода ШИМ. При использовании синусного фильтра увеличивается масса и габариты электропривода, а также стоимость. Использование специальных методов ШИМ может уменьшить THD_i и размеры фильтра. При управлении инвертором методы ШИМ оказывают определенное влияние на THD_i токов [7, 8].

В научной литературе приводится множество сравнений типов ШИМ для двухуровневого инвертора между собой, однако сравниваются они, как правило, по одному показателю. Так, в статье [9] приводится сравнение DPWM с CPWM с точки зрения THD_i и потерь в инверторе. Сравнение производится при низких частотах тока. В [10] сравниваются различные методы ШИМ, в том числе и методы, направленные на улучшение гармонического состава выходного напряжения, однако моделирование производилось для низкой частоты тока (50 Гц) и сравнительная оценка проводилась только по показателю THD_i . В [11, 12] сравниваются методы ШИМ с точки зрения потерь в инверторе и для низких частот тока.

Существуют специальные алгоритмы ШИМ с избирательным подавлением гармоник, в англоязычной литературе именуемые Selective harmonic elimination PWM [13–15]. Основной задачей данных методов ШИМ является исключение определенных гармоник в спектре выходного напряжения инвертора или тока нагрузки и применяются они, когда количество переключений транзистора на периоде переключений достаточно мало. Основная идея заключается в том, чтобы для определенной частоты выходного напряжения иметь фиксированное число переключения транзисторов, кратное периоду первой гармоники. Таким образом, исключаются ситуации, когда на полупериод первой гармоники не укладывается целое число периодов ШИМ, что приводит к возникновению высших гармоник. Углы коммутаций транзисторов рассчитываются отдельно и заносятся как табличные функции в микроконтроллер.

Существует ряд проблем с реализацией и применением данного метода применительно к тяговому авиационному инвертору:

- в микроконтроллерах, предназначенных для управления инверторами, существует специальная периферия по реализации ШИМ, которая на аппаратном уровне реализует «мертвое время» и не задействует вычислительные мощности. При реализации ШИМ с избирательным подавлением гармоник непосредственно

программа будет управлять состоянием затворов транзисторов, к тому же будет необходима программная реализация «мертвого времени». Это приводит к повышенным требованиям к вычислительным мощностям микроконтроллера и снижает надежность системы за счет применения программного «мертвого времени»;

- метод подразумевает применение определенных паттернов коммутации транзисторов для выходной частоты и соответствующего ей выходного напряжения (коэффициента модуляции). Метод хорошо применим для скалярной системы управления, где каждой выходной частоте соответствует определенное выходное напряжение, однако в замкнутых системах управления амплитуда выходного напряжения никак не связана с выходной частотой. Таким образом, появляется бесконечное число паттернов коммутации. К тому же в этом случае нужно учесть изменение напряжения ЗПТ, от которого также зависит коэффициент модуляции и, соответственно, углы коммутации. Таким образом, методы ШИМ с избирательным подавлением гармоник не подходят для рассматриваемого применения.

Целью исследования является комплексное сравнение работы методов ШИМ на высоких частотах тока с точки зрения потерь в инверторе и THD_i тока. Анализируются три метода: векторная ШИМ с привязкой к отрицательной шине (в англ. литературе NCDPWM), векторная ШИМ с переменной привязкой (в англ. литературе DPWM) и ШИМ методом мгновенных фазных потенциалов (в англ. литературе CPWM). Для анализа разработана математическая модель синхронного электропривода с возбуждением от постоянных магнитов с векторной системой управления для тягового винта беспилотного летательного аппарата. Результаты исследования также применимы для различных электроприводов, к примеру станочных, где требуется большая частота вращения электродвигателя.

ШИМ МГНОВЕННЫХ ФАЗНЫХ ПОТЕНЦИАЛОВ

В методе CPWM обычно используется инъекция напряжения нулевой последовательности, что позволяет полностью использовать доступное напряжение звена постоянного тока [16,17]. Потенциалы для каждой фазы определяются формулой

$$\left. \begin{aligned} \varphi_a &= U_m \cos \theta; \\ \varphi_b &= U_m \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right); \\ \varphi_c &= U_m \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right). \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где φ_a , φ_b , φ_c – потенциалы фаз a , b , и c соответственно; U_m – амплитуда вектора заданного напряжения; θ – угол вектора заданного напряжения.

Результатирующие потенциалы фаз со смещением определяются как

$$\left. \begin{aligned} \varphi'_a &= \varphi_a + \Delta\varphi; \\ \varphi'_b &= \varphi_b + \Delta\varphi; \\ \varphi'_c &= \varphi_c + \Delta\varphi. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Разность потенциалов между фазами сохраняется, а полученные потенциалы должны соответствовать условию

$$\varphi'_a, \varphi'_b, \varphi'_c \in [\varphi_N, \varphi_P], \quad (3)$$

где φ_P, φ_N – потенциалы положительной и отрицательной шины.

Система уравнений, используемая для расчета смещения потенциалов:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_{\min} &= \min(\varphi_a, \varphi_b, \varphi_c); \\ \varphi_{\max} &= \max(\varphi_a, \varphi_b, \varphi_c); \\ \Delta\varphi &= \frac{U_{DC}}{2} - \left(\frac{\varphi_{\max} - \varphi_{\min}}{2} \right) - \varphi_{\min}. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Таким образом, фазные потенциалы будут находиться между положительным и отрицательным потенциалами звена постоянного тока (рис. 1).

ВЕКТОРНАЯ ШИМ С ПЕРЕМЕННОЙ ПРИВЯЗКОЙ

В методе DPWM [18] потенциал одной из фаз привязывается к плюсу или минусу звена постоянного тока, поэтому только две из трех фаз коммутируют в течение каждого периода ШИМ. Переключение фаз осуществляется согласно состояниям инвертора, показанным на рис. 2.

Вектор напряжения раскладывается на скажканости γ_1, γ , которые рассчитываются как

$$\left. \begin{aligned} \gamma &= \frac{\sqrt{3}U_m}{U_{DC}} \sin\left(\frac{n}{3}\pi - \theta\right); \\ \gamma_1 &= \frac{\sqrt{3}U_m}{U_{DC}} \sin\left(\theta - \frac{n-1}{3}\pi\right), \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где n – число секторов (от 1 до 6); U_{DC} – напряжение ЗПТ.

Для метода ШИМ с привязкой к положительной шине (в англ. литературе PCDPWM) скажканости рассчитываются в соответствии с табл. 1, для векторной ШИМ с привязкой к отрицательной шине (в англ. литературе NCDPWM) скажканости рассчитываются в соответствии с табл. 2.

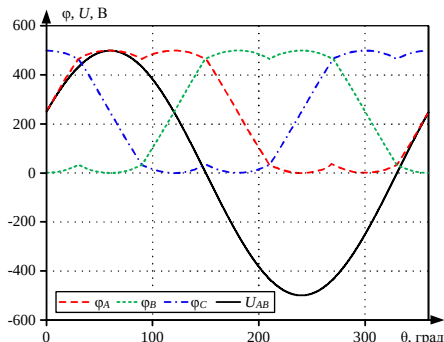


Рис. 1. ШИМ методом мгновенных фазных потенциалов

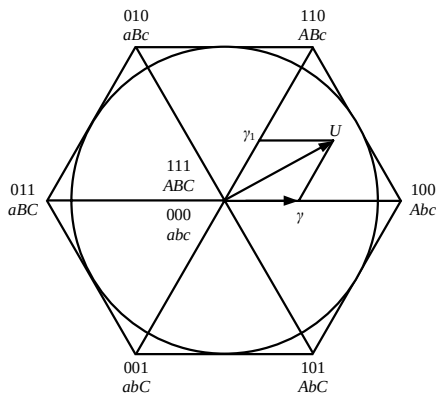


Рис. 2. Состояния двухуровневого инвертора при управлении векторной ШИМ с переменной привязкой

Таблица 1

Скажканости для векторной ШИМ с привязкой к положительной шине

Сектор	Скажканость		
	γ_A	γ_B	γ_C
1	1	$1 - \gamma$	$1 - \gamma - \gamma_1$
2	$1 - \gamma_1$	1	$1 - \gamma - \gamma_1$
3	$1 - \gamma - \gamma_1$	1	$1 - \gamma$
4	$1 - \gamma - \gamma_1$	$1 - \gamma_1$	1
5	$1 - \gamma$	$1 - \gamma - \gamma_1$	1
6	1	$1 - \gamma - \gamma_1$	$1 - \gamma_1$

Таблица 2

Скажканости для векторной ШИМ с привязкой к отрицательной шине

Сектор	Скажканость		
	γ_A	γ_B	γ_C
1	$\gamma_1 + \gamma$	γ_1	0
2	γ	$\gamma_1 + \gamma$	0
3	0	$\gamma_1 + \gamma$	γ_1
4	0	γ	$\gamma_1 + \gamma$
5	γ_1	0	$\gamma_1 + \gamma$
6	$\gamma_1 + \gamma$	0	γ

Форма полученных скажканостей для NCDPWM показана на рис. 3.

Коммутационные потери в транзисторе зависят от величины тока, протекающего через транзистор инвертора и коммутируемого напряжения. Потери на переключение можно выразить следующим образом:

$$\Delta P_{sw} = \frac{1}{6} i V_{DC} \frac{t_{sw}}{T_{PWM}}, \quad (6)$$

где i – ток фазы; t_{sw} – время включения/выключения транзистора; T_{PWM} – период ШИМ.

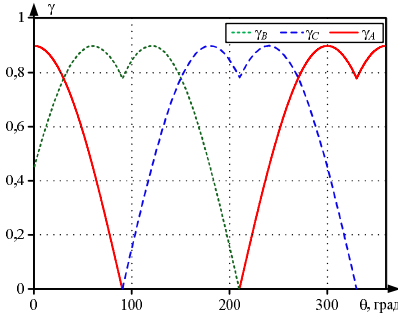


Рис. 3. Скважности для векторной ШИМ с привязкой к отрицательной шине

Потери на проводимость в диоде и транзисторе предполагаются одинаковыми и не учитываются. Коммутационные потери оцениваются по следующим уравнениям:

$$\Delta P_{sw}^P = \frac{V_{DC} t_{sw}}{6T_{PWM}} \times \left\{ \begin{aligned} & \left(\left\{ \begin{aligned} & 0, \gamma_a^P = 1 \\ & |i_a|, \gamma_a^P < 1 \end{aligned} \right\} + \left\{ \begin{aligned} & 0, \gamma_b^P = 1 \\ & |i_b|, \gamma_b^P < 1 \end{aligned} \right\} + \left\{ \begin{aligned} & 0, \gamma_c^P = 1 \\ & |i_c|, \gamma_c^P < 1 \end{aligned} \right\} \right); \end{aligned} \right. \quad (7)$$

$$\Delta P_{sw}^N = \frac{V_{DC} t_{sw}}{6T_{PWM}} \times \left\{ \begin{aligned} & \left(\left\{ \begin{aligned} & 0, \gamma_a^P = 0 \\ & |i_a|, \gamma_a^P > 0 \end{aligned} \right\} + \left\{ \begin{aligned} & 0, \gamma_b^P = 0 \\ & |i_b|, \gamma_b^P > 0 \end{aligned} \right\} + \left\{ \begin{aligned} & 0, \gamma_c^P = 0 \\ & |i_c|, \gamma_c^P > 0 \end{aligned} \right\} \right), \end{aligned} \right.$$

где ΔP_{sw}^P и ΔP_{sw}^N – расчётные коммутационные потери для векторной ШИМ с подвязкой к положительной и векторной ШИМ с подвязкой к отрицательной шине звена постоянного тока.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Математическая модель силового преобразователя, системы управления, электродвигателя, измерительной системы разработана в среде моделирования PLECS. На рис. 4 показана структурная схема электропривода с синхронным двигателем с возбуждением от постоянных магнитов, включающая двухуровневый инвертор, синхронный двигатель, систему векторного управления.

Для управления двигателем используется двухконтурная векторная система управления, внутренний контур которой – контур тока, внешний – контур скорости. Модуль ШИМ включает в себя три метода, описанные ранее. Силовой преобразователь выполнен на базе двухуровневого инвертора. Для расчета потерь в MOSFET-транзисторах используются характеристики ключей MD29HTC120P6HE, производителя Stargpower.

Моделью электродвигателя является синхронная неявнополюсная машина с возбуждением от постоянных магнитов. Технические характеристики электродвигателя представлены в табл. 3.

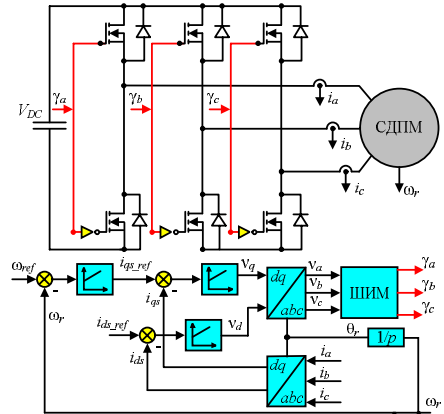


Рис. 4. Структурная схема электропривода

Таблица 3

Параметры электродвигателя

Параметр	Значение
Номинальная мощность электродвигателя, кВт	100
Напряжение ЗПТ, В	700
Номинальная скорость, об/мин	16500
Сопротивление статора, Ом	0,088
Число пар полюсов	4
Индуктивность по оси d, мГн	0,256
Индуктивность по оси q, мГн	0,256
Поток постоянных магнитов, Вб	0,0423

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Первое моделирование проводилось с целью сравнить THD_i для всех методов при одинаковой частоте ШИМ, которая равнялась 20 кГц. Частота тока составляла 1 кГц, момент нагрузки 40 Нм·с.

Форма фазных токов и электромагнитного момента для СРWM метода показана на рис. 5. THD_i составил 2,97 %, коммутационные потери на инвертор 403 Вт. Потери на проводимость не рассматриваются, так как метод ШИМ не влияет на их уровень.

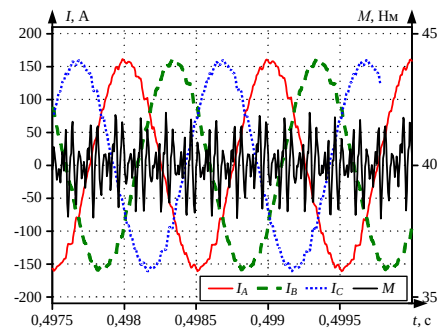


Рис. 5. Фазные токи и момент при СРWM с частотой 20 кГц

Форма фазных токов и электромагнитного момента:
– для NCDPWM показана на **рис. 6**, THD_i составляет 3,54 %, коммутационные потери на инвертор 262 Вт;

– для DPWM показана на **рис. 7**, THD_i составляет 4,13 %, коммутационные потери на инвертор 228 Вт.

Таким образом, лучший THD_i получается с ШИМ методом фазных потенциалов, но с наибольшими коммутационными потерями.

Однако метод ШИМ также должен обеспечивать минимально возможные потери в инверторе. Для этого частота ШИМ для методов CPWM и NCDPWM снижалась до такого уровня, чтобы исследуемые методы были эквивалентны по коммутационным потерям. Частота ШИМ для CPWM составила 11,5 кГц, для NCDPWM – 17,5 кГц.

В результате форма фазных токов и электромагнитного момента:

– для NCDPWM показана на **рис. 8**, THD_i составляет 4,02 %, коммутационные потери на инвертор 227 Вт;

– для CPWM показана на **рис. 9**, THD_i составляет 5,95 %, коммутационные потери на инвертор 226 Вт.

Итоговые результаты моделирования сведены в **табл. 4** (коммутационные потери) и **табл. 5** (THD_i тока двигателя).

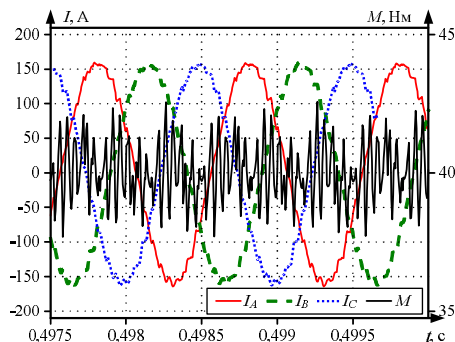


Рис. 6. Фазные токи и момент при NCDPWM с частотой 20 кГц

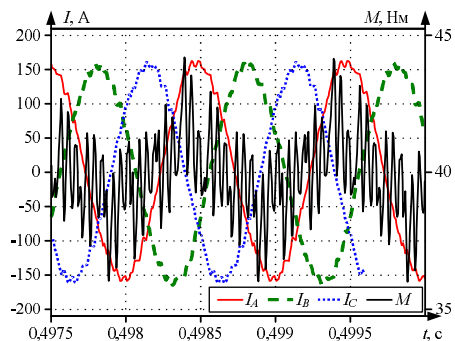


Рис. 7. Фазные токи и момент при DPWM с частотой 20 кГц

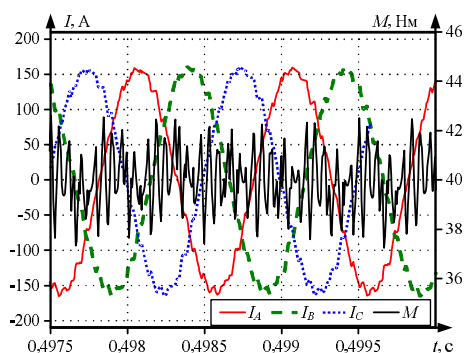


Рис. 8. Фазные токи и момент при NCDPWM с частотой 17,5 кГц

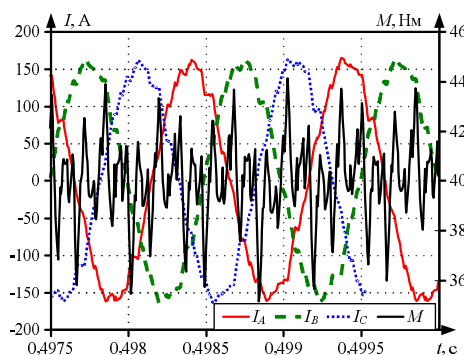


Рис. 9. Фазные токи и момент при CPWM с частотой 11,5 кГц

Таблица 4

Коммутационные потери

Метод	Коммутационные потери, Вт		
	$f_{\text{ШИМ}} = 20 \text{ кГц}$	$f_{\text{ШИМ}} = 17,5 \text{ кГц}$	$f_{\text{ШИМ}} = 11,5 \text{ кГц}$
ШИМ			
CPWM	403	-	226
NCPWM	262	227	-
DPWM	228	-	-

Таблица 5

THD_i тока двигателя

Метод	THD_i		
	$f_{\text{ШИМ}} = 20 \text{ кГц}$	$f_{\text{ШИМ}} = 17,5 \text{ кГц}$	$f_{\text{ШИМ}} = 11,5 \text{ кГц}$
ШИМ			
CPWM	2,97	-	5,95
NCDPWM	3,54	4,02	-
DPWM	4,13	-	-

На основании полученных результатов наименьший THD_i при одинаковых потерях в силовом преобразователе соответствует ШИМ с привязкой к отрицательной шине ЗПТ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье приведен анализ влияния метода ШИМ в трехфазном двухуровневом автономном инверторе напряжения при малом отношении частоты ШИМ и первой гармоники выходного напряжения. Примене-

ние векторной ШИМ с переменной привязкой приво-
дит к большему THD_i в токе и большим пульсациям
крутящего момента, чем при применении векторной
ШИМ с привязкой к отрицательной шине ЗПТ при
одинаковой частоте коммутации транзисторов. ШИМ
методом фазных потенциалов имеет лучшие результа-
ты. Однако при одинаковых потерях в силовом преоб-
разователе векторная ШИМ с привязкой к отрицатель-
ной шине имеет наименьший THD_i в фазных токах и
меньшие пульсации момента, тогда как ШИМ методом
мгновенных фазных потенциалов соответствуют
наибольшая амплитуда пульсаций момента и больший
 THD_i тока.

Для проверки адекватности математической моде-
ли и результатов исследования в дальнейшем будут
проведены испытания на макете преобразователя, а
результаты будут представлены в последующих науч-
ных публикациях.

**Работа выполнена в рамках стратегического
проекта НИУ «МЭИ» «Климатическая трансфор-
мация энергетической отрасли» федеральной про-
граммы «Приоритет 2030» – одной из мер государ-
ственной поддержки вузов нацпроекта «Наука и
университеты».**

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Adu-Gyamfi B.A., Good C. Electric aviation: A review of concepts and enabling technologies // Transportation Engineering. 2022. Vol. 9. 100134. doi: 10.1016/j.treng.2022.100134
2. Staack I., Sobron A., Krus P. The potential of full-electric aircraft for civil transportation: from the Breguet range equation to operational aspects // CEAS Aeronaut Journal. 2021. No. 12. Pp. 803-819. doi: 10.1007/s13272-021-00530-w
3. Farrakhov D., Barabanov K. Novel modular design of gear-less electric drive for propeller of an all-electric aircraft // International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS). IEEE, 2020. Pp. 1-5. doi: 10.1109/ICOECS50468.2020.9278467
4. Panda A., Dyanamina G., Singh R.K. MATLAB Simulation of Space Vector Pulse Width Modulation for 3-level NPC Inverter and 2-level Inverter // International Conference on Sustainable Energy and Future Electric Transportation (SEFET). IEEE, 2021. Pp. 1-5. doi: 10.1109/SeFet48154.2021.9375668
5. Comparison between 2-level and 3-level grid connected inverters implemented using SRF PLL technique / K.V. Krishna, H. M. Suryawanshi, A. B. Shitole, T. Ajmal // International Conference on Energy, Power and Environment: Towards Sustainable Growth (ICEPE). IEEE, 2015. Pp. 1-6. doi: 10.1109/EPETSG.2015.7510080
6. Rahmani S., Hamadi A., Al-Haddad K. A new combination of Shunt Hybrid Power Filter and Thyristor Controlled Reactor for harmonics and reactive power compensation // IEEE Electrical Power & Energy Conference (EPEC). IEEE, 2009. Pp. 1-6. doi: 10.1109/EPEC.2009.5420375
7. Performance Evaluation of Multi-Modulation Single-Carrier PWM Methods for Motor Drive Applications / P.M. Lingom, J. Song-Manguelle, R. Unruh, J.M. Nyobe-Yome, M.L. Dombia // IEEE 14th International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS). IEEE, 2023. Pp. 1-6. doi: 10.1109/PEDS57185.2023.10246565
8. Pratheesh K.J., Jagadanand G., Ramchand R. An improved space vector PWM method for a three-level inverter with reduced THD // 9th International Conference on Compatibility and Power Electronics (CPE), IEEE, 2015. Pp. 167-172. doi: 10.1109/CPE.2015.7231067
9. Zu G., Zhu X., Yang S. Using DPWM method to improve system efficiency of the machine drive system // 22nd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). IEEE, 2019. Pp. 1-4. doi: 10.1109/ICEMS.2019.8922289
10. Mahbub M., Hossain M.A. Design, Simulation and Comparison of Three-phase Symmetrical Hybrid Sinusoidal PWM fed Inverter with Different PWM Techniques // 2nd International Conference on Robotics, Electrical and Signal Processing Techniques (ICREST). IEEE, 2021. Pp. 1-5. doi: 10.1109/ICREST51555.2021.9331086
11. Zou Y., Damzyn J., Kuruppu S. Comparison of SiC MOSFET Thermal Performance Under Different PWM Strategies // IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). IEEE, 2023. Pp. 173-180. doi: 10.1109/APEC43580.2023.10131177
12. Mattoo B.A., Bhat A.H. Comparative Analysis of Various PWM Techniques for Voltage Source Inverter // 1st International Conference on Sustainable Technology for Power and Energy Systems (STPES). IEEE, 2022. Pp. 1-6. doi: 10.1109/STPES54845.2022.10006650
13. Dahidah M.S.A., Konstantinou G., Agelidis V.G. A Review of Multilevel Selective Harmonic Elimination PWM: Formulations, Solving Algorithms, Implementation and Applications // IEEE Transactions on Power Electronics. 2015. No. 8(30). Pp. 4091-4106. doi: 10.1109/TPEL.2014.2355226
14. Karnavar P.H., Jisha V.R. Harmonic Reduction and Power Factor Improvement of BLDC Motor Drive System Using a Selective Harmonic Elimination PWM Based Controller // International Conference on Power, Instrumentation, Control and Computing (PICC). IEEE, 2020. Pp. 1-5. doi: 10.1109/PICC51425.2020.9362432
15. Rai N., Chakravorty S. A Review on the Generalized Formulations for Selective Harmonic Elimination (SHE-PWM) strategy // IEEE First International Conference on Smart Technologies for Power, Energy and Control (STPEC). IEEE, 2020. Pp. 1-6. doi: 10.1109/STPEC49749.2020.9297733
16. Analysis of the influence of the switching strategy on the IGBTs temperature in AC drives / M. Ilyin, M. Bobrov, V. Lapshina, F. Briz and A. Anuchin // 57th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON). IEEE, 2016. Pp. 1-6. doi: 10.1109/RTUCON.2016.7763115
17. Шрейнер П.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты. Екатеринбург: УПО РАН, 2000. С. 383-386.
18. Liu F., Xin K., Liu Y. An adaptive Discontinuous Pulse Width Modulation (DPWM) method for three phase inverter // IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). IEEE, 2017. Pp. 1467-1472. doi: 10.1109/APEC.2017.7930892

Поступила в редакцию 13 сентября 2023 г.

Принята к печати 24 ноября 2023 г.

INFORMATION IN ENGLISH

INFLUENCE OF THE PWM STRATEGY ON TOTAL HARMONIC DISTORTION OF ELECTRIC MOTOR CURRENT IN AN AIRCRAFT ELECTRIC DRIVE

Timofey K. Maslennikov

Engineer, Department of Automated Electric Drive, National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow, Russia, maslennikov.tim20138@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0001-1041-5555>

Egor S. Kulik

Ph.D. (Engineering), Teaching Assistant, Department of Automated Electric Drive, National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow, Russia, kulikegorka@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3345-0174>

Alexander A. Zharkov

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Department of Automated Electric Drive, National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow, Russia, ZharkovAA@mpei.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5628-8101>

Kseniya G. Fedorova

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Department of Automated Electric Drive, National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow, Russia, FedorovaXC@mpei.ru

Dmitry A. Blagodarov

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Department of Automated Electric Drive, National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow, Russia, BlagodarovDA@mpei.ru, <https://orcid.org/0009-0001-1267-6644>

This article examines the influence of the pulse-width modulation technique on the total harmonic distortion of electric motor currents for an aviation synchronous electric drive with excitation from permanent magnets. The feature of the aircraft traction drive is the high frequency of the first harmonic of the electric motor current. This is due to the fact that aircraft engines require high rotation speeds to provide the necessary torque for flight. In addition, to minimize the motor current at the required torque, electric motor designers design electric motors with a large number of pole pairs, which leads to a small ratio of the PWM frequency to the first harmonic frequency of the current. The study is aimed at finding the optimal PWM technique in terms of nonlinear distortion coefficient of the motor current and losses in the inverter using a mathematical model of the electric drive. CPWM, DPWM and NCDPWM are considered. The influence of the applied PWM technique on torque ripple is also considered. A two-level three-phase inverter based on SiC MOSFET is used as an autonomous voltage inverter. An inverter based on SiC MOSFET has higher power density as compared to inverters based on Si IGBT, which is important for the application in question. The simulation results showed that the NCDPWM technique makes it possible to obtain the lowest THD, provided that the switching losses are equal for all PWM technique under consideration.

Keywords: pulse-width modulation, total harmonic distortion, voltage source inverter, permanent magnet synchronous motor, SiCMOSFET

REFERENCES

1. Adu-Gyamfi B.A., Good C. Electric aviation: A review of concepts and enabling technologies. *Transportation Engineering*, 2022, vol. 9, 100134. doi: 10.1016/j.treng.2022.100134
2. Staack I., Sobron A., Krus P. The potential of full-electric aircraft for civil transportation: from the Breguet range equation to operational aspects. *CEAS Aeronaut Journal*, 2021, no. 12, pp. 803-819. doi: 10.1007/s13272-021-00530-w
3. Farrakhov D., Barabanov K. Novel modular design of gearless electric drive for propeller of an all-electric aircraft. *International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS)*. IEEE, 2020, pp. 1-5. doi: 10.1109/ICOECS50468.2020.9278467
4. Panda A., Dyanamina G., Singh R.K. MATLAB Simulation of Space Vector Pulse Width Modulation for 3-level NPC Inverter and 2-level Inverter. *International Conference on Sustainable Energy and Future Electric Transportation (SEFET)*. IEEE, 2021, pp. 1-5. doi: 10.1109/SeFet48154.2021.9375668
5. Krishna K.V., Suryawanshi H.M., Shitole A.B., Ajmal T. Comparison between 2-level and 3-level grid connected inverters implemented using SRF PLL technique. *International Conference on Energy, Power and Environment: Towards Sustainable Growth (ICEPE)*. IEEE, 2015, pp. 1-6. doi: 10.1109/EPETSG.2015.7510080
6. Rahmani S., Hamadi A., Al-Haddad K. A new combination of Shunt Hybrid Power Filter and Thyristor Controlled Reactor for harmonics and reactive power compensation. *IEEE Electrical Power & Energy Conference (EPEC)*. IEEE, 2009, pp. 1-6. doi: 10.1109/EPEC.2009.5420375
7. Lingom P. M., Song-Manguelle J., Unruh R., Nyobe-Yome J.M., Dombia M.L. Performance Evaluation of Multi-Modulation Single-Carrier PWM Methods for Motor Drive Applications. *IEEE 14th International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS)*. IEEE, 2023, pp. 1-6. doi: 10.1109/PEDS57185.2023.10246565
8. Pratheesh K.J., Jagadanand G., Ramchand R. An improved space vector PWM method for a three-level inverter with reduced THD. *9th International Conference on Compatibility and Power Electronics (CPE)*, IEEE, 2015, pp. 167-172. doi: 10.1109/CPE.2015.7231067
9. Zu G., Zhu X., Yang S. Using DPWM method to improve system efficiency of the machine drive system. *22nd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*. IEEE, 2019, pp. 1-4. doi: 10.1109/ICEMS.2019.8922289
10. Mahbub M., Hossain M.A. Design, Simulation and Comparison of Three-phase Symmetrical Hybrid Sinusoidal PWM fed Inverter with Different PWM Techniques. *2nd International Conference on Robotics, Electrical and Signal Processing Techniques (ICREST)*. IEEE, 2021, pp. 1-5. doi: 10.1109/ICREST51555.2021.9331086
11. Zou Y., Damzyn J., Kuruppu S. Comparison of SiC MOSFET Thermal Performance Under Different PWM

- Strategies. IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). IEEE, 2023, pp. 173-180, doi: 10.1109/APEC43580.2023.10131177
12. Mattoo B.A., Bhat A. H. Comparative Analysis of Various PWM Techniques for Voltage Source Inverter. 1st International Conference on Sustainable Technology for Power and Energy Systems (STPES). IEEE, 2022, pp. 1-6. doi: 10.1109/STPES54845.2022.10006650
13. Dahidah M.S.A., Konstantinou G., Agelidis V.G. A Review of Multilevel Selective Harmonic Elimination PWM: Formulations, Solving Algorithms, Implementation and Applications. IEEE Transactions on Power Electronics. 2015, no. 8(30), pp. 4091-4106. doi: 10.1109/TPEL.2014.2355226
14. Karnavar P.H., Jisha V.R. Harmonic Reduction and Power Factor Improvement of BLDC Motor Drive System Using a Selective Harmonic Elimination PWM Based Controller. International Conference on Power, Instrumentation, Control and Computing (PICC). IEEE, 2020, pp. 1-5. doi: 10.1109/PICC51425.2020.9362432
15. Rai N., Chakravorty S. A Review on the Generalized Formulations for Selective Harmonic Elimination (SHE-PWM) strategy. IEEE First International Conference on Smart Technologies for Power, Energy and Control (STPEC). IEEE, 2020, pp. 1-6. doi: 10.1109/STPEC49749.2020.9297733
16. Ilyin M., Bobrov M., Lapshina V., Briz F., Anuchin A. Analysis of the influence of the switching strategy on the IGBTs temperature in AC drives. 57th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCon). IEEE, 2016, pp. 1-6. doi: 10.1109/RTUCon.2016.7763115
17. Shreiner R.T. *Matematicheskoe modelirovanie elektroprivodov peremennogo toka s poluprovodnikovymi preodrazovatelyami chastoty* [Mathematical modeling of AC electric drives with semiconductor frequency converters]. Yekaterinburg, URO RAS Publ., 2000, pp. 383-386. (In Russian)
18. Liu F., Xin K., Liu Y. An adaptive Discontinuous Pulse Width Modulation (DPWM) method for three phase inverter. IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). IEEE, 2017, pp. 1467-1472. doi: 10.1109/APEC.2017.7930892

Влияние метода широтно-импульсной модуляции на коэффициент нелинейных искажений тока электродвигателя в авиационном электроприводе / Т.К. Масленников, Е.С. Кулик, А.А. Жарков, К.Г. Фёдорова, Д.А. Благодаров // Электротехнические системы и комплексы. 2023. № 4(61). С. 4-11. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-4\(61\)-4-11](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-4(61)-4-11)

Maslennikov T.K., Kulik E.S., Zharkov A.A., Fedorova K.G., Blagodarov D.A. Influence of the PWM Strategy on Total Harmonic Distortion of Electric Motor Current in an Aircraft Electric Drive. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2023, no. 4(61), pp. 4-11. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-4\(61\)-4-11](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-4(61)-4-11)

Зюев А.М.¹, Зеленцов В.И.², Ипполитов В.В.², Пластун А.Т.¹

¹ Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург

² Российский государственный профессионально-педагогический университет, Екатеринбург

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ РЕГУЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА И СКОРОСТИ В ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ ПРИВОДАХ ПРОКАТНЫХ СТАНОВ

В работе выполнен анализ качества регулирования координат (тока, момента, скорости) в мощных тиристорных электроприводах постоянного тока (мощностью более 2000 кВт), выполненных с использованием эквивалентных 12-пульсных тиристорных преобразователей при параллельном включении вентильных секций через токоограничивающие дроссели и трехобмоточного силового трансформатора. Рассматриваемый тип электропривода широко используется в металлургической и горной промышленности для главных приводов катков станов горячей и холодной прокатки, трубных станов и шахтных подъемников. Рассмотрены варианты с индивидуальными регуляторами тока для каждой вентильной секции и регулятором общего тока вентильных секций. Для анализа вариантов в статье приведены расчетные схемы систем автоматического управления тиристорными электроприводами с одним и двумя регуляторами тока. На основе расчетных схем разработаны структурные схемы систем автоматического регулирования скорости (САР), даны математическое описание и модели, необходимые для проведения экспериментов. В отличие от традиционной двухконтурной САР скорости для рассматриваемых схем характерны перекрестные связи, обусловленные взаимовлиянием вентильных секций. Перекрестные связи могут существенно влиять на качество регулирования тока и скорости электроприводов. В варианте с индивидуальными регуляторами тока взаимное влияние вентильных секций (перекрестных связей) обуславливает снижение качества регулирования тока и скорости. Моделирование в среде MATLAB/Simulink показало, что в этом варианте быстродействие в токе снижается в 2-3 раза по сравнению с традиционной САР. Такое снижение быстродействия контуров регулирования тока приводит к снижению в 1,5-2 раза быстродействия САР скорости. В варианте с общим регулятором тока исключается взаимное влияние вентильных секций (влияние перекрестных связей). Вследствие чего возможно достижение предельного быстродействия, характерного для традиционной САР скорости.

Ключевые слова: управление электрическими переменными, регулирование электрического тока, силовые преобразователи переменного тока в постоянный ток, электрохимические системы, приводы с регулируемой скоростью, электрические машины постоянного тока, автоматизация производства

ВВЕДЕНИЕ

Опыт наладки мощных тиристорных электроприводов с использованием эквивалентных 12-пульсных тиристорных преобразователей с параллельным включением реверсивных вентильных секций через токоограничивающие реакторы, запитанных от трехобмоточного силового трансформатора (рис. 1), на станах холодной прокатки, трубных станах, показал, что в ряде случаев не удается достигнуть требуемого быстродействия САР тока (момента) и скорости [1, 2]. На рис. 1: TV – трехобмоточный трансформатор, вторичные обмотки соединены соответственно в звезду и треугольник; VS₁, VS₂ – реверсивные вентильные секции; LR₁, LR₂ – уравнивательные реакторы, включенные последовательно с вентильными секциями; M – двигатель постоянного тока; LR – дроссель, включенный последовательно с якорем двигателя [3, 4].

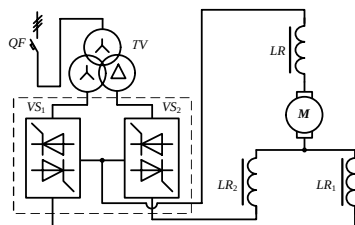


Рис. 1. Принципиальная схема силовой части тиристорного электропривода

АНАЛИЗ ВАРИАНТОВ САР СКОРОСТИ

В отечественной практике широкое распространение получили тиристорные преобразователи, в которых силовая часть выполнена на отечественном оборудовании, а система управления – на зарубежном, например, с использованием модуля управления Sinamics SM фирмы Siemens [5, 6]. Такие модули обладают достаточно большими функциональными возможностями. Для управления вентильными секциями возможны варианты использования отдельных регуляторов тока для каждой вентильной секции или общего регулятора тока для двух вентильных секций [7, 8]:

1. Для анализа варианта САР скорости с двумя регуляторами тока использована линейная модель тиристорного преобразователя без учета его дискретности. На рис. 2 приведена расчетная схема САР скорости с двумя регуляторами тока: Ed₁, Ed₂ – ЭДС первой и второй вентильных секций; CS₁, CS₂ – датчики тока вентильных секций; CR₁, CR₂ – регуляторы токов вентильных секций; SC – регулятор скорости; i₁, i₂ – токи вентильных секций; i_a – ток якоря двигателя; i_s – задание тока; Ω_d – скорость двигателя; Ω_s – задание скорости двигателя; R_r – активное сопротивление фазы трансформатора, приведенное к вторичной обмотке; R_x – фиктивное сопротивление, обусловленное процессом коммутации вентилей; R_r – активное сопротивление уравнивательного реактора вентильной секции; R_d – активное сопротивление якоря двигателя; L_r – индуктивность уравнивательного реактора вентильной секции; L_d – индуктивность якоря двигателя; E_d – ЭДС якоря двигателя [8, 9].

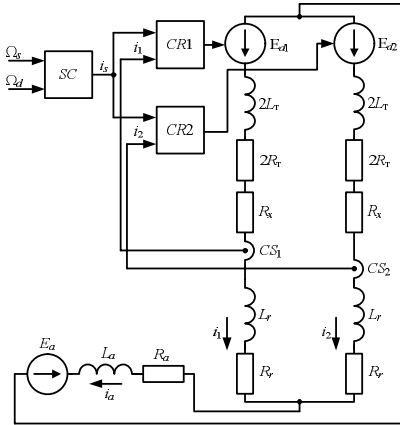


Рис. 2. Расчетная схема системы автоматического регулирования скорости с двумя регуляторами тока

На основании расчетной схемы составлены уравнения Кирхгофа для якорной цепи двигателя:

$$E_{d1} = i_1 (2R_T + R_x + R_r + R_a) + \frac{di_1}{dt} (2L_T + L_r + L_a) + i_2 R_a + \frac{di_2}{dt} L_a + E_a; \quad (1)$$

$$E_{d2} = i_2 (2R_T + R_x + R_r + R_a) + \frac{di_2}{dt} (2L_T + L_r + L_a) + i_1 R_a + \frac{di_1}{dt} L_a + E_a; \quad (2)$$

$$i_a = i_1 + i_2. \quad (3)$$

Обозначив $2R_T + R_x + R_r + R_a = R_{ac}$ – сопротивление якорной цепи двигателя, $2L_T + L_r + L_a = L_{ac}$ – индуктивность якорной цепи двигателя, $L_{ac}/R_{ac} = T_{ac}$ – постоянная времени якорной цепи двигателя, $L_a/R_a = T_a$ – постоянная времени якоря двигателя, запишем уравнения (1), (2) в операторной форме [9, 10]:

$$E_{d1} = i_1 R_{ac} (1 + T_{ac} p) + i_2 R_a (1 + T_a p) + E_a; \quad (4)$$

$$E_{d2} = i_2 R_{ac} (1 + T_{ac} p) + i_1 R_a (1 + T_a p) + E_a. \quad (5)$$

На основе расчетной схемы на рис. 2 и уравнений (4), (5) составлена структурная схема САР скорости с двумя регуляторами тока вентильных секций (рис. 3).

На рис. 3: $W_{CR1}(p)$, $W_{CR2}(p)$ – передаточные функции регуляторов тока CR1 и CR2; $W_{SC}(p)$ – передаточная функция регулятора скорости; K_{TC} – коэффициент усиления вентильной секции тиристорного преобразователя. T_j – механическая постоянная электропривода; T_μ – некомпенсируемая малая постоянная времени контура регулирования тока, характеризующая его полосу пропускания.

Параметры и переменные на структурной схеме представлены в относительных единицах. В качестве базовых величин приняты номинальные параметры двигателя: I_N – номинальный ток, Ω_N – номинальная скорость, Φ_N – номинальный поток двигателя, E_N – номинальная ЭДС, $R_b = E_N/I_N$ – базовое сопротивление.

На структурной схеме представлены два одинаковых контура регулирования токов вентильных секций, регулятор скорости, звено $1/T_j p$, характеризующее механическую инерцию привода, учтена внутренняя обратная связь по ЭДС двигателя. В отличие от традиционной двухконтурной САР скорости для рассматриваемой схемы характерны перекрестные связи через звенья $R_a (1 + T_a p)$, которые оказывают влияние на качество регулирования токов вентильных секций и, в целом, на качество регулирования скорости электропривода.

2. Для анализа варианта САР скорости с общим регулятором тока также использована линейная модель тиристорного преобразователя без учета его дискретности [10, 11]. На рис. 4 приведена расчетная схема САР скорости с общим регулятором суммарного тока двух вентильных секций.

На рис. 4 обозначение и значение элементов соответствуют описанию рис. 2 с учетом корректировки количества регуляторов тока.

На основе расчетной схемы на рис. 4 и уравнений (4), (5) составлена структурная схема САР скорости с общим регулятором суммарного тока вентильных секций (рис. 5).

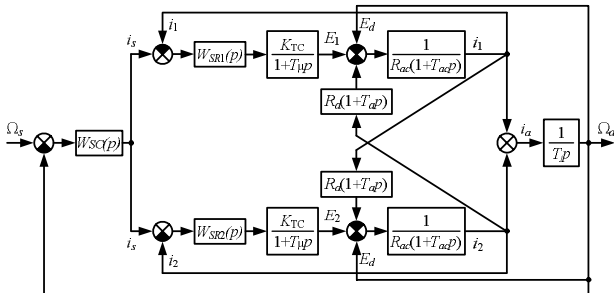


Рис. 3. Структурная схема системы автоматического регулирования скорости

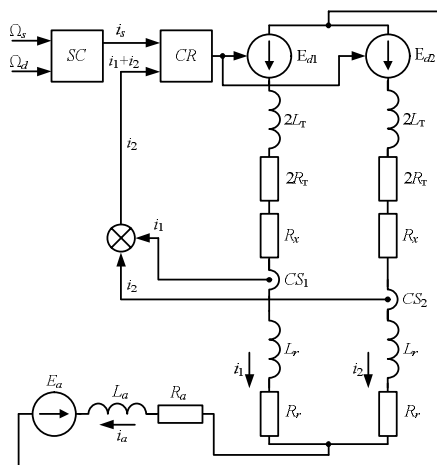


Рис. 4. Расчетная схема системы автоматического регулирования скорости с общим регулятором суммарного тока

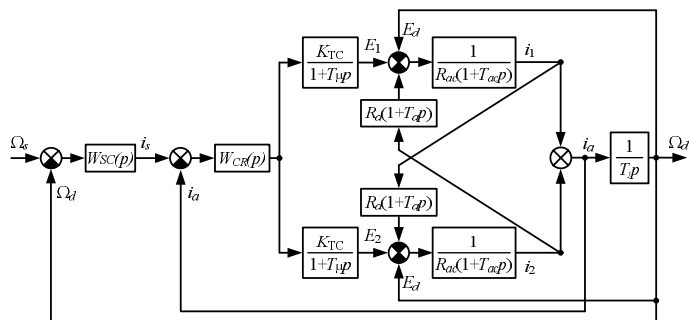


Рис. 5. Структурная схема системы автоматического регулирования скорости

На рис. 5 обозначение, назначение элементов и характеристика схемы соответствует описанию рис. 3 с учетом корректировки количества регуляторов тока – он здесь общий для двух вентильных секций [10, 11].

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ САР СКОРОСТИ

Для анализа влияния перекрестных связей на качество регулирования тока и скорости выполнено моделирование рассматриваемых САР скорости с двумя и одним регуляторами тока в среде MATLAB-Simulink. В процессе моделирования использовались параметры главного электропривода прошивного стана трубопрокатного агрегата, которые характерны для мощных электроприводов и других прокатных станов. В состав электропривода входят: двигатель постоянного тока с параметрами: $U_N = 750$ В, $I_N = 1500$ А, сопротивление якоря $R_a = 0,039$ Ом, индуктивность якоря $L_a = 4,627$ мГн; уравнительные реакторы с параметрами: сопротивление реактора $R_r = 0,002$ Ом, индуктивность реактора $L_r = 1,877$ мГн; трехобмоточный трансформатор ТРЗСП-4000/6 УХЛЗ с параметрами: номинальная мощность $S_N = 4000$ кВА, номинальное напря-

жение первичной обмотки $U_{N1} = 6$ кВ, номинальное напряжение вторичных обмоток $U_{N2} = 667$ В, напряжение короткого замыкания $U_{sh} = 4\%$, потери короткого замыкания $P_{sh} = 17,5$ кВт, приведенное ко вторичной обмотке активное сопротивление фазы трансформатора $R_r = 0,001$ Ом, приведенное ко вторичной обмотке индуктивное сопротивление фазы трансформатора $X_r = 0,009$ Ом, индуктивность фазы трансформатора $L_r = 0,28$ мГн, фиктивное сопротивление вентильной секции, обусловленное коммутацией вентилей $R_v = 0,0085$ Ом.

В процессе моделирования рассматриваемых САР скорости с двумя и одним (общим) регуляторами тока принята настройка контуров регулирования тока вентильных секций по «техническому оптимуму» с некомпенсируемой малой постоянной времени, определяющей полосу пропускания контуров тока, $T_\mu = 0,005$ с. Такая величина T_μ обеспечивает надежную работу тиристорного преобразователя и позволяет при анализе не учитывать дискретные свойства преобразователя. Принята линейная модель вентильной секции с передаточной функцией [12, 13]:

$$W_{TC} = \frac{K_{TC}}{1 + T_{\mu} p}. \quad (6)$$

1. В варианте САР скорости с двумя регуляторами тока, с учетом вышеизложенного, передаточная функция регуляторов тока при моделировании принята

$$W_{CR} = \frac{R_{ac}(1 + T_{ac} p)}{K_{TC} \cdot 2T_{\mu} p}. \quad (7)$$

На рис. 6 приведена осциллограмма переходного процесса в токе при ступенчатом изменении задания тока при раздельной работе вентильных секций без учета влияния перекрестных связей (автономная работа вентильной секции). Такая работа характерна для режима наладки контуров регулирования тока вентильных секций.

Как следует из осциллограммы, частота среза контуров тока составляет $\omega_s = 100$ рад/с.

При совместной работе вентильных секций за счет влияния перекрестных связей быстродействие контуров регулирования тока снижается в 2-3 раза, что иллюстрируется осциллограммой на рис. 7.

Указанное снижение быстродействия контуров регулирования тока приводит к необходимости снижения быстродействия САР скорости, настроенной в соответствии с общеизвестным «симметричным оптимумом».

Неучет влияния перекрестных связей приводит к значительному снижению запасов устойчивости САР скорости и повышенной колебательности в скорости (рис. 8).

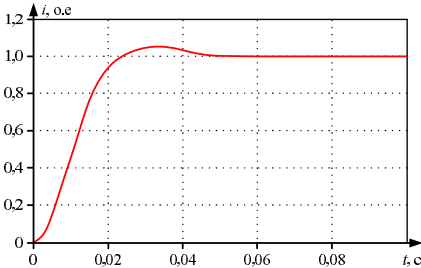


Рис. 6. Осциллограмма переходного процесса в токе при раздельной работе вентильных секций без учета влияния перекрестных связей

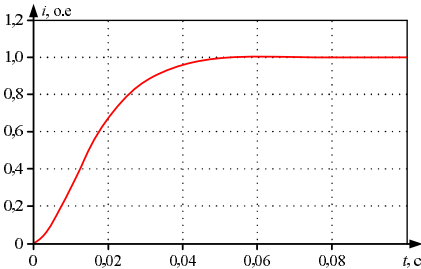


Рис. 7. Осциллограмма переходного процесса в токе при совместной работе вентильных секций с учетом влияния перекрестных связей

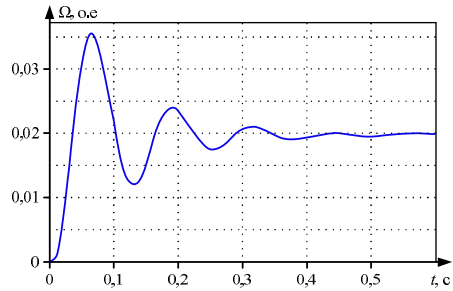


Рис. 8. Осциллограмма переходного процесса по скорости без учета влияния перекрестных связей

Для сохранения запасов устойчивости САР скорости и получения процессов, близких к «симметричному оптимуму», необходимо снизить частоту среза САР скорости в 1,5–2 раза с $\omega_s = 50$ рад/с до $\omega_s = (30-20)$ рад/с. На рис. 9 приведена осциллограмма переходного процесса в скорости (ступенчатое изменение задания скорости) при снижении частоты среза САР в 1,5 раза, $\omega_s = 30$ рад/с. В этом случае передаточная функция регулятора скорости характеризуется выражением [14, 15]

$$W_{SC} = \frac{T_j}{6T_{\mu}} \frac{1 + 12T_{\mu} p}{12T_{\mu} p}. \quad (8)$$

Как видно из осциллограммы, переходный процесс близок к «симметричному оптимуму», хотя немного повышена колебательность.

2. В варианте САР скорости с общим регулятором тока, с учетом вышеизложенного и при одинаковых параметрах вентильных секций, передаточная функция регулятора тока, обеспечивающая настройку контура регулирования тока по «техническому оптимуму», характеризуется выражением

$$W_{CR} = \frac{(R_{ac} + R_a)}{2K_{TC}} \frac{\left(1 + \frac{L_{ac} + L_a}{R_{ac} + R_a} p\right)}{2T_{\mu} p}. \quad (9)$$

САР скорости настраивается в соответствии с общеизвестным «симметричным оптимумом» и регулятором скорости с передаточной функцией, соответствующей этому оптимуму:

$$W_{SC} = \frac{T_j}{4T_{\mu}} \frac{1 + 8T_{\mu} p}{8T_{\mu} p}. \quad (10)$$

На рис. 10 приведена осциллограмма переходного процесса по скорости при ступенчатом изменении задания скорости в САР с общим регулятором тока при передаточной функции регулятора скорости (10). Частота среза САР скорости составляет с $\omega_s = 50$ рад/с.

Как видно из осциллограммы, переходный процесс близок к «симметричному оптимуму» [15].

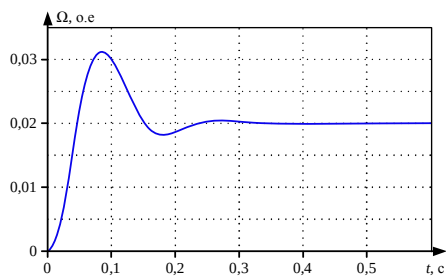


Рис. 9. Осциллограмма переходного процесса по скорости при снижении частоты среза

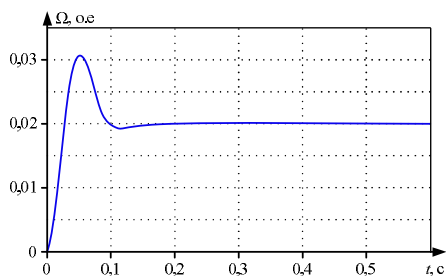


Рис. 10. Осциллограмма переходного процесса по скорости с общим регулятором тока

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как показали результаты анализа и моделирования, для мощных тиристорных электроприводов постоянного тока, выполненных с использованием эквивалентных 12-пульсных тиристорных преобразователей при параллельном включении вентильных секций через токоограничивающие дроссели и трехобмоточный силовой трансформатор, при использовании САР скорости с общим регулятором тока, перекрестные связи не оказывают влияния на динамические характеристики контуров регулирования тока и скорости.

В то же время при использовании варианта САР скорости с двумя регуляторами тока, перекрестные связи контуров регулирования токов вентильных секций приводят к снижению быстродействия САР скорости, что может быть крайне нежелательно для электроприводов станов холодной прокатки, трубных станов.

Для повышения быстродействия САР скорости рассматриваемого класса электроприводов рекомендуется использовать общий регулятор суммарного тока вентильных секций. В этом случае исключается

Поступила в редакцию 19 октября 2023 г.

взаимное влияние вентильных секций и возможно достижение предельного быстродействия САР скорости.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Новиков В.А., Савва С.В., Татаринцев Н.И. Электропривод в современных технологиях: учебник для студентов вузов. М.: Академия, 2014. 400 с.
- Евзеров И.Х., Горобец А.С., Мошкович Б.И. Комплексные тиристорные электроприводы: справочник / под ред. В.М. Перельмутера. М.: Энергоатомиздат, 1988. 319 с.
- Зимин Е.Н., Кацевич В.Л., Козырев С.К. Электроприводы постоянного тока с вентильными преобразователями. М.: Энергоиздат, 1981. 192 с.
- Мощные управляемые выпрямители для электроприводов постоянного тока / Левитан И.И., Элькин А.Г., Жемеров Г.Г., Аптер Е.М. М.: Энергия, 1975. 208 с.
- Храмшин В.Р. Разработка и внедрение автоматизированных электроприводов и систем регулирования технологических параметров широкополосного стана горячей прокатки // Вестник ИГЭУ. 2012. № 6. С. 100-104.
- Храмшин В.Р. Разработка электротехнических систем непрерывной группы стана горячей прокатки при расширении сортамента полос: дис... д-ра техн. наук; Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова. Магнитогорск, 2013. 393 с.
- Колганов А.Р., Лебедев С.К., Ханаев А.В. Математические основы теории автоматического управления: учебник. Иваново: Изд-во Ивановского государственного энергетического университета, 2010. 340 с.
- Плотников Ю.В., Поляков В.Н. Системы управления электроприводами постоянного тока (преобразователь Sinamics DCM): учебно-методическое пособие. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2017. 96 с.
- Терехов В.М., Осипов О.И. Системы управления электроприводов: учебник. М.: Академия, 2005. 304 с.
- Шрейнер Р.Т. Системы подчиненного регулирования электроприводов: учебное пособие. Екатеринбург: Издательство ГОУ ВО «Рос. гос. проф.-пед. ун-т», 2008. 279 с.
- Терехов В.М. Элементы автоматизированного электропривода: учебник для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1987. 221 с.
- Герман-Галкин С.Г. Виртуальные лаборатории полупроводниковых систем в среде Matlab-Simulink. Санкт-Петербург: Лань, 2013. 448 с.
- Моделирование электротехнических комплексов металлургических предприятий: учебное пособие / Корнилов Г.П., Николаев А.А., Храмшин Т.Р., Музыков А.А. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2012. 237 с.
- Богрий В.С., Русский А.А. Математическое моделирование тиристорных преобразователей. М.: Энергия, 1972. 184 с.
- Терехин В.Б. Моделирование систем электропривода в Simulink. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. 320 с.

Принята к печати 10 ноября 2023 г.

INFORMATION IN ENGLISH

POSSIBILITIES OF REGULATING ELECTRIC CURRENT AND SPEED IN HIGH-EFFICIENCY ROLLING MILL DRIVES

Anatoliy M. Zyuzev

D.Sc. (Engineering), Associate Professor, Professor, Department of Electric Drive and Automation of Industrial Installations, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia, a.m.zyuzev@urfu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2233-2730>

Valery I. Zelentsov

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Department of Electrification and Transport, Russian State Vocational Pedagogical University, Yekaterinburg, Russia, v.zelentsov@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0009-9102-6321>

Vladimir V. Ippolotov

Assistant Professor, Department of Electrification and Transport, Russian State Vocational Pedagogical University, Yekaterinburg, Russia, suchi6624@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0002-2445-1490>

Anatoliy T. Plastun

D.Sc. (Engineering), Professor, Department of Electrical Engineering, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia, a.t.plastun@urfu.ru

The paper analyzes the quality of current, moment and speed adjustment in high-power DC thyristor electric drives (with a capacity of more than 2000 kW), that is made with 12-pulse thyristor converters (in which valve sections have parallel connection through current-limiting inductors) and a three-winding power transformer. This type of electric drive is widely used in the metallurgical and mining industries for the main drives of hot and cold rolling mill stands, pipe mills and mine lifts. The article researches cases when individual current regulators are used for each valve section and while using one total current regulator for all valve sections. To analyze the cases, the article presents design models for thyristor electric drives automatic control systems with one and two current regulators. Based on them, the article provides automatic control drives block schemes and gives mathematical descriptions and possible models required for further experiments. In contrast to the traditional two-circuit automatic control speed drive, the schemes under consideration are characterized by having cross-links due to the mutual influence of the valve sections. Cross-links can significantly affect the quality of current regulation and electric drives speed. In the model with individual current regulators, the mutual influence of valve sections (cross-links) causes a decrease in the quality of current and speed regulation. The MATLAB /Simulink modeling showed that in this case, the current speed is reduced by 2-3 times as compared to traditional automatic control drives. Such decrease in speed in the current control circuits leads to a 1.5-2 times drop for the automatic control drive speed. In case of using one general current regulator, the mutual influence of the valve sections (cross-links) is eliminated. As a result, there is a possibility to achieve the maximum speed characteristics, normally demonstrated in traditional automatic control drives.

Keywords: control of electric variables, regulation of electric current, alternating current to direct current power converters, electromechanical systems, variable speed drives, DC electric machines, production automation

REFERENCES

- Novikov V.A., Savva S.V., Tatarintsev N.I. *Elektroprivod v sovremennykh tekhnologiyakh* [Electric drive in modern technologies]. Moscow, Akademiya Publ., 2014. 400 p. (In Russian)
- Evzerov I.H., Gorobets A.S., Moshkovich B.I. *Komplektnye tiristornye elektroprivody: spravochnik* [reference book "Complete thyristor electric drives"]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1988. 319 p. (In Russian)
- Zimin E.N., Katsevich V.L., Kozyrev S.K. *Elektroprivody postoyannogo toka s ventilynymi preobrazovatelyami* [DC electric drives with valve converters]. Moscow, Energoizdat Publ., 1981. 192 p. (In Russian)
- Levitan I.I., Elkin A.G., Zhemerov G.G., Apter E.M. *Moshchnye upravlyаемые выпрямители для электроприводов postoyannogo toka* [Powerful controlled rectifiers for DC electric drives]. Moscow, Energiya Publ., 1975. 208 p. (In Russian)
- Khramshin V.R. Developing and Implementation of Automated Electric Drive and Systems of Controlling the Process Parameters of Wide-Strip Hot Rolling Mill. *Vestnik IGEU* [Vestnik IGEU], 2012, no. 6, pp.100-104. (In Russian)
- Khramshin V.R. *Razrabotka elektrotekhnicheskikh sistem nepreryvnoy gruppy stana goryachey proklatki pri rasshirenii sortamenta polos. Dokt. Diss.* [Development of electrotechnical systems of continuous hot rolling mill group when expanding assortment of bands. Dokt. Diss.]. Magnitogorsk, Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2013. 360 p. (In Russian)
- Kolganov A.R., Lebedev S.K., Khanaev A.V. *Matematicheskie osnovy teorii avtomaticheskogo upravleniya: uchebnik* [Mathematical foundations of the theory of automatic control]. Ivanovo, Publishing house of Ivanovo State Energy University, 2010. 340 p. (In Russian)
- Plotnikov Yu.V., Polyakov V.N. *Sistemy upravleniya elektroprivodami postoyannogo toka (preobrazovatel Sinamics DCM): uchebno-metodicheskoe posobie* [Control systems for DC electric drives (Sinamics DCM converter)]. Yekaterinburg, Publishing House of the Ural University, 2017. 96 p. (In Russian)
- Terekhov V.M., Osipov O.I. *Sistemy upravleniya elektroprivodov: uchebnik* [Electric drive control systems: textbook]. Moscow, Akademiya Publ., 2005. 304 p. (In Russian)
- Schreiner R.T. *Sistemy podchinnennogo regulirovaniya elektroprivodov: uchebnoe posobie* [Systems of subordinate regulation of electric drives]. Yekaterinburg, Publishing house of GOU VPO "Russian State Professional Pedagogical University", 2008. 279 p. (In Russian)
- Terekhov V.M. *Elementy avtomatizirivannogo elektroprivoda: uchebnik dlya vuzov* [Elements of automated electric drive].

- Moscow, Energoatomizdat Publ., 1987. 221 p. (In Russian)
12. German-Galkin S.G. *Virtualnye laboratorii poluprovodnikovyykh sistem v srede Matlab-Simulink* [Virtual laboratories of semi-conductor systems in the Matlab-Simulink environment]. St. Petersburg, Publishing House "Lan", 2013. 448 p. (In Russian)
13. Kornilov G.P., Nikolaev A.A., Khramshin T.R., Murzikov A.A. *Modelirovanie elektrotekhnicheskikh kompleksov metallurgicheskikh predpriyatiy: uchebnoe posobie* [Modeling of electrotechnical complexes of metallurgical enterprises]. Magnitogorsk, Publishing House of Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2012. 237 p. (In Russian)
14. Bogriy V.S., Russian A.A. *Matematicheskoe modelirovanie tiristornyykh preobrazovateley* [Mathematical modeling of thyristor converters]. Moscow, Energiya Publ., 1972. 184 p. (In Russian)
15. Terekhin V.B. *Modelirovanie sistem elektropriroda v Simulink* [Modeling of electric drive systems in Simulink]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publishing House, 2008. 320 p. (In Russian)

Исследование возможностей регулирования электрического тока и скорости в высокоэффективных приводах прокатных станов / А.М. Зюзов, В.И. Зеленцов, В.В. Ипполитов, А.Т. Пластун // Электротехнические системы и комплексы. 2023. № 4(61). С. 12-18. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-4\(61\)-12-18](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-4(61)-12-18)

Zyuzev A.M., Zelentsov V.I., Ippolitov V.V., Plastun A.T. Possibilities of Regulating Electric Current and Speed in High-Efficiency Rolling Mill Drives. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2023, no. 4(61), pp. 12-18. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-4\(61\)-12-18](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-4(61)-12-18)

Писаревский Ю.В., Писаревский А.Ю., Тикунов А.В., Титова Л.Н., Бурковский А.В.

Воронежский государственный технический университет

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ВИНТОМОТОРНОЙ ПАРЫ БЕСПИЛОТНОГО КВАДРОКОПТЕРА

В настоящее время для решения различных задач все чаще используют беспилотные летательные аппараты. Анализ информации показывает, что в нашей стране в области разработки и производства данных аппаратов имеется ряд проблем. Одной из самых главных проблем является то, что отдельные элементы беспилотных аппаратов в нашей стране до недавнего времени не производились, а ввозились из-за рубежа, но в связи с внешними санкциями возникла необходимость в сжатые сроки организовать производство этих компонентов на российских предприятиях. Однако для этого необходимо иметь методики, позволяющие осуществлять проектирование отдельных узлов с учетом назначения беспилотного летательного аппарата. Вопрос разработки требований и критериев выбора элементов аппарата в зависимости от его назначения на сегодняшний день является актуальной задачей, так как это позволит проектировать максимально эффективные летательные аппараты. С целью оптимального подбора винта и электрического двигателя для винтомоторной группы беспилотного летательного аппарата необходимо знать особенности и закономерности рабочих процессов, в связи с этим нами предлагается методика определения параметров электродвигателя винтомоторной группы беспилотного квадрокоптера, основанная на принципах классической механики. В ходе исследований был проведен анализ влияния на летно-технические характеристики беспилотного летательного аппарата параметров электрического двигателя с учетом назначения и особенностей эксплуатации квадрокоптера. В статье также приведены результаты экспериментальных исследований, позволяющие подтвердить адекватность предлагаемой методики подбора параметров электродвигателя для винтомоторной пары.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, квадрокоптер, летно-технические характеристики, сила тяги, винтомоторная группа, электрический двигатель

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия во всем мире возрос интерес к беспилотному транспорту [1]. О беспилотных системах человечество мечтало давно, но реализовать эту идею стало возможно только благодаря достижениям в области микроэлектроники, робототехники, искусственного интеллекта, технологии накопления электрической энергии, электромеханики.

Вопрос развития беспилотной авиации в нашей стране является стратегически важной задачей, что подтверждается принятой летом 2023 года Правительством РФ стратегией развития беспилотной авиации до 2035 года.

Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) – это, по сути, роботы, запрограммированные на решение различных задач: транспортировка грузов, мониторинг ситуаций, фото- и видеосъемка, а также они могут решать такие задачи, при выполнении которых есть опасность для жизни и здоровья человека: разведка очагов возгорания, мест радиационного заражения и т.п. [2-8].

Все существующие беспилотные летательные аппараты принято классифицировать по различным признакам, например по массе аппарата, но наибольший интерес имеет классификация по конструкции: БПЛА самолетного (планерного) и вертолетного (мультироторные или квадрокоптеры) типов [9, 10].

До недавнего времени большинство БПЛА мультироторного типа, которые использовались на территории нашей страны, либо ввозились из-за рубежа в готовом виде, либо собирались из зарубежных комплектующих, но в сложившейся экономической и политической ситуации весьма актуален вопрос развития

производства квадрокоптеров и их комплектующих в нашей стране на основе российских разработок.

За последние годы в области проектирования БПЛА и их отдельных узлов в нашей стране посвящено множество научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ [11-15], в том числе по тематике электрических двигателей для БПЛА [16-18].

В связи с вышеизложенным в Воронежском государственном техническом университете проводятся научно-исследовательские работы по выявлению зависимостей летно-технических характеристик БПЛА от параметров его структурных составляющих.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

При проектировании летательного аппарата любого принципа полета возникает крайне важный вопрос подбора силовой установки, которая смогла бы обеспечить расчетные значения летно-технических характеристик (ЛТХ) для беспилотных летательных аппаратов этот процесс также актуален.

При разработке БПЛА вертолетного типа, таких как мультикоптеры и, в частности, квадрокоптеры в качестве силовой установки, в подавляющем числе случаев назначаются винтомоторные группы (ВМГ) на базе электрических двигателей. Причем эта тенденция сохраняется для коптеров со взлетной массой до 50 кг и более [19-23].

Требуемые ЛТХ БПЛА напрямую зависят от его назначения. Если рассматривать мультироторные БПЛА, то здесь следует выделить три основных типа квадрокоптеров:

– для мониторинга ситуации (ситуация на дорогах, соблюдение правил пожарной безопасности и т.п.) – для таких аппаратов характерно преобладание режима «зависания» над точкой, когда двигатель в составе

винтомоторной группы (ВМГ) должен обеспечить тягу, примерно равную весу мультикоптера (квадрокоптера) с учётом числа винтомоторных групп, а режим работы электродвигателя должен соответствовать продолжительному режиму работы S1;

– для аэрофотосъемки и выполнения различных работ (кадастровые измерения, сельскохозяйственные работы, отслеживание объектов и т.п.) – для этого класса аппаратов режим полёта с максимальным КПД винтомоторной группы (если аппарат однорежимный или близкий к нему, то двигатели должны обеспечивать тягу в 2–3 раза большую, чем вес летательного аппарата, а режим работы электродвигателя должен соответствовать продолжительному режиму работы S1; если аппарат многорежимный, то двигатели должны обеспечивать тягу в 8–10 раз большую, чем вес летательного аппарата, а режим работы электродвигателя должен соответствовать повторно- кратковременному режиму работы S3);

– для спортивного и военного назначения – для этих аппаратов возможны режимы, характерные для двух предыдущих типов, но здесь характерен форсированный режим полёта с максимальной тягой ВМГ (для двигателя режим работы S3). Однако следует заметить, что слишком большое отношение тяги к весу (более 10) усложняет управление летательным аппаратом за счёт требований высокой скорости реакции на его маневрирования.

Параметры электрического двигателя ВМГ непосредственно связаны с назначением летательного аппарата, а также с его грузоподъемностью, маневренностью, длительностью полёта. Очевидно, что для таких летательных аппаратов, как квадрокоптеры, требуется комплексная оптимизация параметров, позволяющая получить требуемые полётные характеристики. Другими словами, нельзя по отдельности оптимизировать винты, электродвигатели, аккумуляторы, систему управления и конструкцию [19].

Как уже выше говорилось, сегодня требуется разработка летательного аппарата на основе отечественных комплектующих, причем в предельно сжатые сроки. В связи с этим необходимо рационально подходить к процессу проектирования летательного аппарата с учётом того, что некоторые комплектующие ещё не освоены производством. На первом этапе наиболее важно правильно установить направления оптимизации и основные связи между параметрами силовой установки и системы управления, которые могут быть положены в основу комплексной оптимизации [20–23].

В настоящее время разработано и исследовано большое количество воздушных винтов, которые успешно используются в мультикоптерах различного назначения и вопросы их разработки и оптимизации не являются приоритетными. Ключевой задачей является получение тяговых характеристик винтов, то есть зависимости силы тяги (F_T) от частоты вращения винта (n). Пример таких характеристик приведён в табл. 1.

Для решения задачи подбора винтов для проектируемого БПЛА необходимо иметь четкое теоретическое обоснование, наиболее простой путь решения этой проблемы – использовать методы классической механики.

Таблица 1
Тяговая характеристика винтомоторной пары на основе электродвигателя 3115 и винта 12"×4,0" CF Dualblade

Дроссельная заслонка, %	Напряжение, В	Ток, А	Частота вращения, об/мин	Тяга, г	Входная мощность, Вт,	Эффективность, г/Вт
30	24	1,4	3626	350	33,60	10,42
40	24	4,2	5324	780	100,80	7,74
50	24	7,0	6326	1140	168,00	6,79
60	24	12,4	7643	1680	297,60	5,65
70	23,9	19,1	8762	2220	456,49	4,86
80	23,9	28,2	9892	2850	673,98	4,23
90	23,8	41,0	11046	3600	975,80	3,69
100	23,8	48,3	11581	4020	1149,54	3,5

Известно, что особенности режимов работы винта квадрокоптера определяются его движением с малой относительной поступью винта или вообще нулевой поступью (статическая тяга), характерной для режима зависания. Воздушный винт должен быть в состоянии воспринять всю мощность двигателя, кроме этого он должен работать с максимальным КПД в основном (номинальном) режиме полета летательного аппарата.

Относительная поступь винта равна

$$P = \frac{W_{вп}}{nD_{вт}}, \quad (1)$$

где $W_{вп}$ – скорость набегающего потока воздуха, м/с; n – число оборотов винта, об/с; $D_{вт}$ – диаметр винта, м.

Согласно [1], КПД винта достигает максимума, когда относительная поступь винта равна 0,75 от относительного шага $\lambda_n = h_{вт} / D_{вт}$, где $h_{вт}$ – шаг винта. Для винта самолёта, имеющего заметную поступь винта, данные соотношения позволяют определить номинальный режим работы двигателя. Однако в нашем случае относительная поступь винта либо очень мала, либо в режиме зависания дрона равна нулю. В этом случае в соответствии с уравнением (1) КПД винта становится равным нулю. Очевидно, что такой подход к определению КПД винта в нашем случае применять нельзя. Винт совершает полезную работу по перемещению воздушной массы и удержанию летательного аппарата в режиме зависания за счёт создаваемого тягового усилия. Воспользуемся понятием количества движения и найдём изменение импульса воздуха при увеличении его скорости от 0 до V , которое равно

$$\Delta mV = \rho S V^2 \Delta t, \quad (2)$$

где m – масса воздуха, кг; V – скорость воздуха, м/с; ρ – плотность воздуха, кг/м³; S – площадь, ометаемая винтом, м²; t – время действия силы, с.

С другой стороны, это изменение импульса создаётся силой тяги F_T , действующей на воздух со стороны винта, которая согласно третьему закону Ньютона равна силе, действующей на винт со стороны воздуха и равна силе тяжести летательного аппарата, приходящейся на одну винтомоторную группу, поскольку он находится в равновесии:

$$F_T = \frac{\Delta m V}{\Delta t}; \quad (3)$$

$$F_T = \frac{\rho S V^2 \Delta t}{\Delta t}; \quad (4)$$

$$F_T = \rho S V^2 = \frac{M_{\text{ЛА}} g}{K_{\text{ВМГ}}}, \quad (5)$$

где $M_{\text{ЛА}}$ – масса летательного аппарата, кг; $K_{\text{ВМГ}}$ – число винтомоторных групп; g – ускорение свободного падения ($9,81 \text{ м/с}^2$).

Мощность, развиваемая винтом равна кинетической энергии воздуха в единицу времени или работе, совершаемой винтом:

$$N \Delta t = \frac{\Delta m V^2}{2}; \quad (6)$$

$$N \Delta t = \frac{\rho S V^2 \Delta t V}{2}; \quad (7)$$

$$N = \frac{\rho V^3 S}{2}. \quad (8)$$

Целесообразно записать формулы (5) и (8) через относительный шаг винта λ_H , величину площади, ометаемой винтом $S = \pi D_{\text{ВТ}}^2 / 4$, и скорость потока воздуха, направленную от винта вниз

$$V = h_{\text{ВТ}} n, \quad (9)$$

где $h_{\text{ВТ}}$ – шаг винта, м; n – число оборотов каждого винта, об/с.

На основании вышеизложенного получаем следующие уравнения:

$$F_T = \left(\rho \frac{\pi}{4} \lambda_H^2 \right) n^2 D_{\text{ВТ}}^4 = C_F n^2 D_{\text{ВТ}}^4; \quad (10)$$

$$N = \left(\rho \frac{\pi}{8} \lambda_H^3 \right) n^3 D_{\text{ВТ}}^5 = C_N n^3 D_{\text{ВТ}}^5. \quad (11)$$

Уравнения (10) и (11) позволяют получить зависимость мощности винта от силы тяги $N = f(F_T)$:

$$N = \frac{C_N}{\sqrt{C_F}} \cdot \frac{1}{D_{\text{ВТ}}} \sqrt{F_T^3}. \quad (12)$$

Из уравнения (12) следует вывод, что с увеличением диаметра винта потребляемая мощность двигателя для сохранения заданной силы тяги должна уменьшаться. Применительно к процессу проектирования мультикоптеров полученные уравнения позволяют рассчитывать в заданном диапазоне тяговых усилий потребляемую мощность каждого винта из группы выбранных и определить наиболее эффективный для данного электродвигателя.

Однако следует учитывать тот факт, что выбирая винты большего диаметра, необходимо учитывать ограничения, которые накладываются задаваемыми габаритами летательного аппарата. Необходимо учитывать, что расстояние между винтами должно быть того же порядка, что и диаметр винтов, для того чтобы избежать взаимодействия вихвреней воздушных по-

токов соседних винтов. Таким образом, во многих случаях такое техническое решение может оказаться неприемлемым.

Если по каким-то причинам невозможно применять винты большего диаметра, то существует другой путь – это увеличение частоты вращения винта, то есть увеличение частоты вращения электрического двигателя. При этом критическим фактором является скорость обтекания законцовок лопастей, то есть в случае ее приближения к скорости звука (330 м/с) явления, связанные со сжимаемостью воздуха, приводят к оставке роста тяги при увеличении мощности, потребляемой винтом (так называемый эффект «запирания»). Кроме этого, значительно увеличивается шумность винта, что является негативным фактором. Поэтому в настоящее время рекомендуется для воздушных винтов фиксированного шага не превышать скорость обтекания законцовок лопастей на уровне 220 м/с . Ограничение скорости обтекания законцовок лопастей также накладывает ограничения на диаметр винта, его угловую скорость и скорость полёта летательного аппарата.

Очевидно, ВМГ с винтом фиксированного шага имеет только один режим полёта, который можно назвать оптимальным и при котором ВМГ имеет максимальный КПД. Поэтому так важно знать назначение летательного аппарата, чтобы правильно спроектировать электродвигатель, который должен обеспечить либо один – основной режим полёта, либо многорежимный полёт на разных скоростях при условии энергичного маневрирования. Очевидно, что при таких условиях приходится жертвовать эффективностью работы винта, но получить широкий диапазон полётных режимов. В любом случае в техническом задании на разработку электродвигателя должны быть указаны режимы работы, соответствующим назначению мультикоптера, которые описаны выше.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Рассмотрим в качестве прототипа квадрокоптер, собранный из китайских комплектующих на раме из углепластика. Вес летательного аппарата 1388 г . Дрон имеет четыре ВМГ с винтами $7'' \times 3,7'' \times 3$ и двигателями Brother Hobby. Вес полезного груза составляет 2000 г . Экспериментальная тяговая характеристика квадрокоптера представлена в **табл. 2**. При проведении экспериментов частота вращения была ограничена, так как возникла опасность выхода из строя электродвигателя при повышении частоты вращения.

Тяговая характеристика винта снималась при напряжении аккумуляторной батареи $U_{\text{СР}} = 22,2 \text{ В}$. Параметры батареи: $6500 \text{ мА} \cdot \text{ч}$, токоотдача 60С , вес 839 г . Максимальная тяга $4,2 \text{ кг}$ (дрессельная заслонка 100%).

Данные, представленные в **табл. 2**, позволяют получить уравнение аппроксимации экспериментально снятой тяговой характеристики винта $7'' \times 3,7'' \times 3$ с электрическим двигателем Brother Hobby:

$$F_T = 6,938 \cdot 10^{-6} \Omega^{1,6}, \quad (13)$$

где F_T – сила тяги винта, кг; Ω – частота вращения винта, рад/с.

Таблица 2

Тяговая характеристика квадрокоптера

Частота вращения винтов, об/мин	Частота вращения винтов, рад/с	Тяга винтов дрона, кг	Потребляемый ток, А	Потребляемая мощность, Вт	Тяга одного винта, кг	Мощность, потребляемая двигателем, Вт	Ток, потребляемый двигателем, А
5958	624	1,0	9,05	200,90	0,250	50,23	2,26
8359	875	1,5	15,9	354,10	0,375	88,53	3,99
10303	1079	2,0	23,7	526,10	0,500	131,5	5,93
11377	1191	2,5	33,7	747,03	0,625	186,7	8,41
12527	1312	3,0	44,5	987,90	0,750	246,9	11,13
14500	1518	3,5	59,9	1329,8	0,875	332,4	14,98

Из уравнения (13) можно определить частоту вращения винта, соответствующую максимальной тяге силовой установки дрона массой 4,2 кг. В этом случае каждая ВМГ создаёт тягу $F_T = 1,05$ кг при частоте вращения $\Omega = 1727,71$ рад/с.

Мощность, потребляемая электродвигателем, определяется уравнением аппроксимации:

$$P_1 = 1,679 \cdot 10^{-6} \Omega^{2,6}; \quad (14)$$

$$P_1 = 1,679 \cdot 10^{-6} \cdot 1727,71^{2,6} = 431 \text{ Вт.}$$

Данные уравнения дают возможность получить расчётные значения частоты вращения и мощности электродвигателя, соответствующие условию предельной тяги летательного аппарата (4,2 кг) и не доводить ситуацию при измерениях до аварийной.

При расчётом значении мощности, потребляемой электродвигателем, 431 Вт и среднем напряжении 22,2 В ток аккумуляторной батареи равен 77,7 А. При этом каждый электродвигатель потребляет ток 19,42 А, а плотность тока в проводниках составляет 22,5 А/мм². Полученное значение плотности тока вызывает рост температуры со скоростью 2,53 °С/с. При классе изоляции «В» температура обмоток машины достигает предельного допустимого уровня через 32–45 секунд. При классе изоляции «С» это время возрастает до 71–90 секунд, однако средняя температура машины уже достаточно велика и достигает 150 °С, что может вызвать тепловое повреждение постоянных магнитов.

Полученные данные показывают, что наличие тяговой характеристики винта позволяет определить мощность и тягу ВМГ в различных режимах, поэтому выполнять расчёт по вышепредставленным формулам нет необходимости. Проблема заключается в отсутствии нужных экспериментальных данных, а данные производителей винтов необходимо проверять [20].

В любом случае требуется испытательный стенд для снятия тяговых характеристик винтов. Проиллюстрируем это на конкретном примере представленного дрона – прототипа. Необходимые параметры двигателя, которые соответствуют тяговой характеристике винта 7" (177,8 мм) × 3,7" (93,98 мм) × 3, представлены в табл. 3. Конфигурация магнитной системы машины 12N14P.

Таблица 3

Характеристики электродвигателя Brother Hobby с винтом 7"×3,7"×3 при максимальной нагрузке

Масса машины m , г	Размер активной части машины $\varnothing \times L$, мм	Объём активной части машины $V \cdot 10^{-6}$, м ³	Максимальная тяга одной ВМГ F_T , кг	Максимальная мощность, потребляемая двигателем, $P_{\max}$, Вт	Частота вращения при максимальной тяге n , об/мин	Ток при максимальной тяге $I_{\max}$, А	Удельная мощность машины, кВт/кг
46,24	35×12	10,9	1,05	431	16906	19,42	9

Соотношение размеров активной части $\lambda = L/D = 0,34$. Удельная мощность машины 9 кВт/кг определена при максимальной мощности машины.

Экспериментальные данные показывают, что рассматриваемый дрон весом 1,388 кг (без полезной нагрузки) имеет тягу каждой ВМГ, равную 0,347 кг, и, соответственно, кратность максимальной тяги $k_T = 1,05 / 0,347 = 3$, что обеспечивает летательному аппарату приемлемую динамику полёта. Добавка веса полезного груза ухудшает динамику полёта БПЛА. При $k_T = 2$ вес полезной нагрузки должен составлять 1,75 кг, а если взять с запасом, то 1,50 кг.

Увеличение веса полезной нагрузки выше 1,75 кг для данного прототипа требует замены винтов или двигателей. Увеличение веса полезной нагрузки до 2,0 кг увеличивает полный вес дрона до 3,388 кг. При этом кратность максимальной тяги уменьшается до значения 1,05.

Допустим, что потребовалось увеличить вес полезной нагрузки до 3 кг, тогда вес дрона станет равным 4388 г. Тяга винтов в режиме зависания должна соответствовать 4500 г с коэффициентом запаса 1,026. Это значит, что каждая ВМГ в режиме зависания должна создавать тягу $F_{T1} = 4,5/4 = 1,125$ кг. Для обеспечения полётного режима сила тяги ВМГ должна быть выше примерно в 2–3 раза, по сравнению с силой тяги в режиме зависания, поэтому сила тяги должна быть равна $F_{T2} = 1,125 \cdot 2,67 = 3,0$ кг. В соответствии с уравнением (13) величине тяги винта соответствует частота вращения 3336 рад/с (31873 об/мин). В свою очередь, полученная частота вращения позволяет определить мощность машины в соответствии с уравнением (14), которая равна 2429 Вт.

Далее, используя данные табл. 3, находим массу двигателя в соответствии с его удельной мощностью p :

$$m_{\text{эд}} = \frac{P_1 \eta}{p}, \quad (15)$$

где P_1 – мощность, потребляемая электродвигателем, Вт; η – КПД электродвигателя, о.е.

Объём электродвигателя $V_{эд}$ определяем через его массу $m_{эд}$ и среднюю плотность материалов ρ , как у электродвигателя прототипа (табл. 4):

$$V_{эд} = \frac{m_{эд}}{\rho}. \quad (16)$$

Уравнение (15) позволяет определить размер активной части электродвигателя, его диаметр D и длину L :

$$D = \sqrt[3]{\frac{4V_{эд}}{\pi\lambda}}; \quad (17)$$

$$L = \lambda D, \quad (18)$$

где λ – соотношение размеров диаметра D и длины L активной части машины (см. табл. 3).

Полученные расчётные значения величин сведены в табл. 4. Масса электродвигателя и габаритные размеры определены из условия, что удельные энергетические показатели машин примерно соответствуют машине Brother Hobby, а максимальная тяга винта 3,0 кг. Габаритные размеры машин нормализованы в соответствии с рядом размеров R40.

Данные табл. 4 подтверждают сделанные выше выводы, что потребляемая мощность будет тем меньше, чем больше диаметр винта и меньше его шаг. Однако винт 7×3,7×3 самый лёгкий, имеет наименьший момент инерции, но при заданных условиях будет самым шумным и потребляет самую большую мощность 2429 Вт, что существенно снижает полётное время.

Очевидно, что мы находимся только в начале пути по созданию оптимального летательного аппарата, однако сейчас важно выбрать правильную стратегию проектирования электродвигателя для БПЛА. На наш взгляд, наиболее правильным является следующий порядок разработки:

- определяем назначение летательного аппарата (однорежимный или многорежимный);
- определяем вес и габариты летательного аппарата (задача несколько упрощается благодаря большому количеству уже разработанных дронов, которые можно принять в качестве прототипа);
- определяем необходимую тягу винтов в режиме зависания летательного аппарата и, соответственно, тягу одной винтомоторной группы (ВМГ);
- задаём кратность максимальной силы тяги (в соответствии с назначением);
- определяем диаметр винтов в соответствии с габаритами летательного аппарата;
- определяем частоту вращения винта при ограничении скорости обтекания воздухом законцовок лопастей (рекомендуемое значение 220 м/с);
- выбираем винт, а лучше несколько винтов с различным шагом и снимаем их тяговые характеристики для выполнения более полной оптимизации;
- формируем условия технического задания на разработку электродвигателя.

Применительно к варианту, рассмотренному выше, техническое задание на проектирование будет иметь вид, представленный в табл. 5.

Таблица 4

Расчетные характеристики винтов и электродвигателей

Винт, дюймы	Тяга, кг	Частота вращения, об/мин	Скорость законцовок лопастей, м/с	Мощность, Вт	Момент, Н·м	Масса ЭД, г	Габарит активной части $\varnothing D \times L$, мм
7×3,7×3	1,12 3,0	17150 31873	158 296	474 2429	0,27 0,58	270	Ø63×21
8×4,5×2	1,12 3,0	11190 17990	104 167	306 1252	0,26 0,67	54,4	Ø36×13
9×4,5×2	1,13 3,0	10630 17080	127 204	221 824	0,2 0,46	35,8	Ø32×11
10×5×2	1,12 3,0	7236 11620	96 154	244 844	0,32 0,69	37,0	Ø32×11
12×4×2	1,13 3,0	6382 10150	102 162	163,5 689	0,25 0,65	30,0	Ø30×11

Таблица 5

Вариант технического задания

Наименование и обозначение	Размерность	Численное значение величины
Константа скорости KV	–	773
Габаритные размеры, не более	мм	Ø35×20
Напряжение питания U_n	В	24
Максимальная потребляемая мощность P_{max}	Вт	450
Частота вращения при максимальной мощности n_m	об/мин	17000
Максимальный ток I_{max}	А	20
ESC 6S, А	–	50
Номинальная мощность $P_{\text{н}}$	Вт	70
Частота вращения при номинальной мощности n_n	об/мин	8000
Удельная мощность при максимальной нагрузке p	кВт/кг	9,0
Время работы при максимальной мощности t_p	с	60
Температура обмотки θ , не выше	°C	100

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

- при увеличении диаметра винта квадрокоптера целесообразно использовать электродвигатель меньшей номинальной мощности. Но необходимо определить предел соотношения диаметра винта и номинальной мощности двигателя или критерий (границы минимума и максимума);
- для электродвигателя определенной мощности существует диапазон диаметров винтов, при использовании которых винтомоторная пара будет иметь оптимальные параметры.

В заключение необходимо отметить, что мы находимся только в начале пути по созданию оптимального летательного аппарата, однако сейчас важно выбрать правильную стратегию проектирования.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания (проект № FZGM-2023-0011).

Список источников

1. Prospects of the development of unmanned aerial vehicles (UAVs) / R. Shokirov, N. Abdujabarov, T. Jonibek, K. Saytov, S. Bobomurodov // Technical science and innovation. 2020. No. 3(2020). doi: 10.51346/tstu-01.20.3-77-0069
2. Аллилуева Н. Перспективы развития беспилотных летательных аппаратов // Технологии защиты. 2015. №6. URL: <http://www.tzmagazine.ru/jpage.php?uid1=1348&uid2=1474&uid3=1479> (дата обращения: 24.11.2023)
3. Просвирина Н.В. Анализ и перспективы развития беспилотных летательных аппаратов // Московский экономический журнал. 2021. №10. С. 560-563.
4. Андреев Н.А. Перспективы применения беспилотного транспорта в России // Отходы и ресурсы. 2023. № 1(10). doi: 10.15862/42ECOR123
5. Вытовтов А.В., Калач А.В., Разиньков С.Ю. Современные беспилотные летательные аппараты // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2015. № 4. С. 70-74.
6. Легконогох Д.С., Крылов А.А., Иванов М.С. Современное состояние и перспективы развития силовых установок беспилотных летательных аппаратов // Военная мысль. 2019. №4. С. 57-72.
7. Development and prospect of unmanned aerial vehicle technologies for agricultural production management / Y. Huang, S.J. Thomson, W.C. Hoffmann, Y. Lan, B.K. Fritz // International Journal of Agricultural and Biological Engineering. 2013. Vol. 6, No. 3. Pp. 1-10.
8. Агеева Е.Г., Евсеев О.В. Перспективы применения БПЛА как средства доставки грузов // Современные проблемы управления внешнеэкономической деятельностью: материалы международной научной конференции. М.: Всероссийская академия внешней торговли Министерства экономического развития РФ, 2018. С. 161-167.
9. Классификация беспилотных летательных аппаратов / С.И. Безруков, В.Ю. Гумелёв, А.В. Пархоменко, Д.А. Филиппов // Оригинальные исследования (ОРИС). 2020. №4. С. 66-81.
10. Романов И.В. Виды беспилотных летательных аппаратов. Создание опытного образца // Юный ученый. 2023. №3 (66). С. 396-398.
11. Свердлов С.З. Оптимальный вертикальный подъем электрического мультикоптера // Инженерный журнал: наука и инновации. 2016. №11. С. 1-15. doi: 10.18698/2308-6033-2016-11-1551

12. Легконогох Д.С. Экспериментальные исследования характеристик электрических силовых установок для легких БЛА // Вестник УГАТУ. 2022. №22. С. 81-91.
13. Тарасюк Е.Н. Проектирование модели квадрокоптера, расчет параметров лопасти винта // Сборник конкурсных научных работ студентов и магистрантов. Брест: БрГТУ, 2022. Ч.1. С. 158-162.
14. Афанасьев А.Ю., Петров А.А., Зайнуллин А.А. Авиационные электрические двигатели для беспилотных летательных аппаратов с повышенными энергетическими характеристиками // Статьи и материалы XI Общероссийской молодежной научно-технической конференции «Молодежь. Техника. Космос». СПб.: БГТУ «Военмех», 2019. №58. С. 11-18.
15. Зиненков Ю.В., Луковников А.В., Слишко М.Б. Методика формирования технического облика и оценки эффективности силовой установки высотного беспилотного летательного аппарата // Полет. 2016. № 2-3. С. 66-80.
16. Уразбахтин Р.Р. Двигатели для беспилотных летательных аппаратов // Международный научно-исследовательский журнал. 2017. №02 (56). Ч. 3. С. 142-144.
17. Моделирование электродвигателя с постоянными магнитами для беспилотного летательного аппарата / А.Г. Лютаревич, С.Ю. Долингер, Е.А. Вяткина, В.В. Тевс // Динамика систем, механизмов и машин. 2017. №3. С. 63-68. doi: 10.25206/2310-9793-2017-5-3-63-68.
18. Варкентин В.В., Согрин А.И., Федоров В.Б. Проектирование конструкции активной части электрической машины тягового двигателя для беспилотных летательных аппаратов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». 2022. Т. 22, № 2. С. 5-19. doi: 10.14529/engin220201
19. Joshi D., Deb D., Muyeen S.M. Comprehensive Review on Electric Propulsion System of Unmanned Aerial Vehicles // Frontiers in Energy Research. 2022. Vol. 10. doi:10.3389/fenrg.2022.752012
20. Арумания Ю. Винты для мультироторных систем. URL: <https://radiocopter.ru/vinty-dlya-quadrokoptera-vsyo-chno-nuzhno-znat> (дата обращения: 24.11.2023)
21. Герасимов О.В., Крицкий Б.С. Расчет воздушного винта беспилотного летательного аппарата с учетом числа Рейнольдса и степени редукции // Научный вестник МГТУ ГА. 2014. №200. С. 79-85.
22. Нейдорф Р.А., Сигида Ю.Л. Компьютерное моделирование воздушного винта при исследовании его тягово-мощностных характеристик // Вестник ТГТУ. 2014. Т. 20. № 4. С. 713-719.
23. Kustec D. Understanding Quadcopter Motor and Propeller Rotation. URL: <https://dronenodes.com/quadcopter-motor-propeller-rotation/> (дата обращения: 24.11.2023)

Поступила в редакцию 14 сентября 2023 г.

Принята к печати 05 ноября 2023 г.

INFORMATION IN ENGLISH

METHODOLOGY FOR DETERMINING THE ELECTRIC MOTOR PARAMETERS OF AN UNMANNED QUADCOPTER PROPELLER PAIR

Yuri V. Pisarevskiy

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Department of Electromechanical Systems and Electric Power Supply, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia, 2732558@mail.ru

Alexander Yu. Pisarevskiy

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Department of Electromechanical Systems and Electric Power Supply, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia, 2732558@mail.ru

Aleksey V. Tikunov

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Department of Electromechanical Systems and Electric Power Supply, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia, Tikunov_a@list.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9443-0508>

Larisa N. Titova

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Department of Electromechanical Systems and Electric Power Supply, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia, tn64@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8461-0591>

Aleksandr V. Burkovskiy

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Dean, Faculty of Power and Control Systems, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia, bav@vorstu.ru

Currently, unmanned aerial vehicles are increasingly used to solve various problems. Analysis of the information shows that in our country there are a number of problems in the development and production of these devices. One of the most important problems is that until recently certain elements of drones were not produced in our country, but were imported from abroad, but due to external sanctions, there was a need to quickly organize the production of these components at Russian enterprises. However, for this, it is necessary to have techniques that allow the design of individual components taking into account the purpose of the unmanned aerial vehicle. Considering the fact that all components of an unmanned aerial vehicle are interconnected and mutually influence each other, as well as the flight performance characteristics of the device as a whole, the issue of developing requirements and criteria for selecting elements of the device depending on its purpose is an urgent task of the day. In order to optimally select a propeller and an electric motor for the propeller-motor group of an unmanned aerial vehicle, it is important to know the features and patterns of the processes of their mutual influence; in this regard, we propose a method for determining the electric motor parameters of the propeller-motor group of an unmanned quadcopter based on the basic principles of classical mechanics. During the research, an analysis was carried out of the electric motor parameters influence on the flight performance characteristics of an unmanned aerial vehicle, taking into account the purpose and operating characteristics of the quadcopter. The article also presents the results of experimental studies aimed at confirming the correctness of the proposed method for selecting an electric motor for a propeller pair.

Keywords: unmanned aerial vehicle, quadcopter, flight performance, thrust force, propeller group, electric motor

REFERENCES

- Shokirov R., Abdujabarov N., Jonibek T., Saytov K., Bobomurodov S. Prospects of the development of unmanned aerial vehicles (UAVs). Technical science and innovation. 2020, no. 3(2020). doi: 10.51346/tstu-01.20.3-77-0069
- Alliluyeva N. Prospects for the development of unmanned aerial vehicles. *Tekhnologii zashchity* [Protection Technologies], 2015, no. 6. URL: <http://www.tzmagazine.ru/jpage.php?uid1=1348&uid2=1474&uid3=1479> (accessed 24 November 2023) (In Russian)
- Prosvirina N.V. Analysis and prospects for the development of unmanned aerial vehicles. *Moskovskiy ekonomicheskij zhurnal* [Moscow Economic Journal], 2021, no. 10, pp. 560-563. (In Russian)
- Andreev N.A. Prospects for the use of unmanned vehicles in Russia. *Obtody i resursy* [Russian Journal of Resources, Conservation and Recycling], 2023, no. 1(10). doi: 10.15862/42ECOR123 (In Russian)
- Vytovtov A.V., Kalach A.V., Razinkov S.Yu. Modern unmanned aerial vehicles. *Vestnik BGUTU im. V.G. Shukhova* [Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov], 2015, no. 4, pp. 70-74. (In Russian)
- Legkonogikh D.S., Krylov A.A., Ivanov M.S. Current state and prospects for the development of power plants for unmanned aerial vehicles. *Voennaya mysl* [Military Thought], 2019, no. 4, pp. 57-72. (In Russian)
- Huang Y., Thomson S.J., Hoffmann W.C., Lan Y., Fritz B.K. Development and prospect of unmanned aerial vehicle technologies for agricultural production management. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2013, vol. 6, no. 3, pp. 1-10.
- Ageeva E.G., Evseev O.V. Prospects for the use of UAVs as a means of delivering goods. *Sovremennyye problemy upravleniya vneshneekonomicheskoy deyatel'nostyu: materialy mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii* [Proceedings of the international scientific conference "Modern problems of managing foreign economic activity"]. Moscow, All-Russian Academy of Foreign Trade of the Ministry of Economic Development of the Russian Federation Publ., 2018, pp. 161-167. (In Russian)
- Bezrukov S.I., Gumelev V.Yu., Parkhomenko A.V., Filippov D.A. Classification of unmanned aerial vehicles. *Originalnye issledovaniya (ORIS)* [Original research (ORIS)], 2020, no. 4, pp. 66-81. (In Russian)
- Romanov I.V. Types of unmanned aerial vehicles. Creation of a prototype. *Yunyi uchenyi* [Young scientist], 2023, no. 3(66), pp. 396-398.
- Sverdlov S.Z. Optimal vertical lift of an electric multicopter. *Inzhenernyi zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering journal: science and innovation], 2016, no. 11, pp. 1-15. doi: 10.18698/2308-6033-2016-11-1551 (In Russian)
- Legkonogikh D.S. Experimental studies of the characteristics of electrical power plants for light UAVs. *Vestnik UGATU* [Vestnik USATU], 2022, no. 22, pp. 81-91. (In Russian)
- Tarasjuk E. N. Design of a quadcopter model, calculation of propeller blade parameters. *Sbornik konkursnykh nauchnykh rabot studentov i magistrantov* [Collection of competitive scientific works of students and undergraduates]. Brest, BrSTU Publ., 2022, part 1, pp. 158-162. (In Russian)
- Afanasyev A.Yu., Petrov A.A., Zainulin A.A. Aviation electric engines for unmanned aerial vehicles with increased energy characteristics. *Statyi i materialy XI Obshcherossiyskoy molodezhnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Molodezh, Tekhnika. Kosmos"* [Articles and materials of the XI All-Russian youth scientific and technical conference "Youth. Technique. Space"]. Saint Petersburg, BGUTU "Voenmekh" Publ., 2019, no. 58, pp. 11-18. (In Russian)
- Zinenkov Yu.V., Lukovnikov A.V., Slinko M.B. Methodology for forming the technical appearance and assessing the efficiency of the power plant of a high-altitude unmanned aerial vehicle. *Polyet* [Flight], 2016, no. 2-3, pp. 66-80. (In Russian)
- Urazbakhitin R.R. Engines for unmanned aerial vehicles. *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skiy zhurnal* [International Research Journal], 2017, no. 02 (56), part 3, pp. 142-144. (In Russian)
- Lyutarevich A.G., Dolinger S.Yu., Vyatkina E.A., Tevs V.V. Modeling of an electric motor with permanent magnets for an unmanned aerial vehicle. *Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin* [Dynamics of systems, mechanisms and machines],

- 2017, no. 3, pp. 63-68. doi: 10.25206/2310-9793-2017-5-3-63-68 (In Russian)
18. Varkentin V.V., Sogrin A.I., Fedorov V.B. Structure design of the active part of the electric machine of the traction motor of unmanned aerial vehicles. *Vestnik YuUrGU. Seriya «Mashinostroenie»* [Bulletin of the South Ural State University. Series "Mechanical engineering industry" Bulletin of the South Ural State University. Series "Mechanical engineering industry"], 2022, vol. 22, no. 2, pp. 5–19. doi:10.14529/engin220201 (In Russian)
19. Joshi D., Deb D., Muyeen S.M. Comprehensive Review on Electric Propulsion System of Unmanned Aerial Vehicles. *Frontiers in Energy Research*. 2022, vol. 10. doi:10.3389/fenrg.2022.752012
20. Arzumanyan Yu. Screws for multi-rotor systems. URL: <https://radiocopter.ru/vinty-dlya-kvadrokoptera-vsoycho-nuzhno-znat> (accessed 29 September 2023) (In Russian)
21. Gerasimov O.V., Kritsky B.S. Calculation of propeller UAV based Reynolds number and degree of reduction. *Nauchnyi vestnik MGTU GA* [Civil Aviation High Technologies], 2014, no. 200, pp. 79-85. (In Russian)
22. Neydorf R.A., Sigida Yu.L. Computer Simulation of Air-screw in the Study of its Traction Power Capacity. *Vestnik TGTU* [Transactions of the TSTU], 2014, vol. 20, no. 4, pp. 713-719. (In Russian)
23. Kustec D. Understanding Quadcopter Motor and Propeller Rotation. URL: <https://dronenodes.com/quadcopter-motor-propeller-rotation/> (accessed 29 September 2023)

Методика определения параметров электродвигателя винтомоторной пары беспилотного квадрокоптера / Ю.В. Писаревский, А.Ю. Писаревский, А.В. Тикун, Л.Н. Титова, А.В. Бурковский // Электротехнические системы и комплексы. 2023. № 4(61). С. 19-26. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-4\(61\)-19-26](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-4(61)-19-26)

Pisarevskiy Yu.V., Pisarevskiy A.Yu., Tikunov A.V. Titova L.N., Burkovskiy A.V. Methodology for Determining the Electric Motor Parameters of an Unmanned Quadcopter Propeller Pair. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2023, no. 4(61), pp. 19-26. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-4\(61\)-19-26](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-4(61)-19-26)

Шахбиева К.А., Мугалимов Р.Г., Мугалимова А.Р.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

МЕТОДИКА ВЫБОРА ОСНОВНОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ АВТОНОМНОГО ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА

В статье выполнен анализ известных методик выбора основного электрооборудования для автономных транспортных средств. Показано, что известные методики обладают определенными недостатками: обоснование мощности электродвигателя автономного транспортного средства базируется на известной мощности двигателя внутреннего сгорания для аналогичного транспортного средства, что является не вполне корректным. Показано, что выбор мощности электродвигателя должен быть основан на известных методиках, разработанных в теории электропривода. Анализ опубликованных методик проектирования электрооборудования автономных транспортных средств показывает, что они ориентированы на проектирование легковых автомобилей. Проанализированы технические характеристики электрооборудования транспортных средств от производителей Mazda, Peugeot, SsangYong, Toyota, Mercedes. На основе известного тестового цикла движения легковых автомобилей выполнен расчет мощности электродвигателя и средней энергии аккумуляторной батареи аналитическим методом и методом моделирования в программном продукте MATLAB Simulink при заданных средних скоростях движения и заданном пробеге. Получены уравнения для предварительной оценки мощности тягового электродвигателя и энергоемкости аккумуляторной батареи для автономного наземного легкового транспортного средства в функции скорости движения. Показано, что известные методики не учитывают влияние таких параметров, как скорость ветра, качество дорожного покрытия, масса перевозимого полезного груза, угол подъема дорожного полотна, а также изменение КПД электродвигателя от коэффициента загрузки. Исследована чувствительность перечисленных параметров на приращение мощности, преодолеваемой электродвигателем. Предложена усовершенствованная методика выбора основного электрооборудования для автономного транспортного средства с учетом дополнительных факторов, влияющих на мощность тягового электродвигателя и энергоемкость аккумуляторной батареи. Полученные результаты могут быть рекомендованы для выбора основного электрооборудования автономного электрического наземного легкового транспортного средства.

Ключевые слова: электромобиль, тяговый электродвигатель, цикл движения, аккумуляторная батарея, методика расчета, имитационная и математические модели

ВВЕДЕНИЕ

Современные тенденции в транспортной инфраструктуре проявляются в том, что все большее количество транспортных средств переходит на использование электрической тяги. Такие автомобили оборудованы вместо двигателя внутреннего сгорания (ДВС) тяговым электродвигателем (ЭД), а в качестве источника энергии используется электричество. Основными преимуществами такого транспортного средства (ТС) перед транспортом с ДВС являются более высокая производительность и экологичность. Однако больший интерес представляет автономный электрический транспорт, который получает питание от аккумуляторных батарей (АКБ) без использования контактной сети. Исследования показали, что наиболее перспективными являются литий-ионные АКБ, которые обладают высокой энергоемкостью и энергоплотностью, большим сроком службы и низким процентом саморазряда, а также они экологичны [1]. Емкость АКБ формируется параллельно-последовательным соединением аккумуляторов с учётом номинальных напряжения и тока электродвигателя. В практике проектирования автономных электроприводов наблюдается тренд увеличения номинального напряжения двигателя при одновременном повышении частоты тока и качества электроизоляционных материалов. Это позволяет уменьшить массогабаритные размеры двигателя и аккумуляторной батареи.

Основной проблемой проектирования электромобилей является выбор тягового электродвигателя и

аккумуляторной батареи. Высокая стоимость и низкие эксплуатационные характеристики АКБ долгое время являлись сдерживающими факторами, препятствующими широкому распространению автономных электротранспортных средств. Однако с усовершенствованием технологии аккумуляторных батарей, увеличением энергоемкости и снижением затрат на производство основные автопроизводители начали активное внедрение нового поколения электромобилей. Это привело к повышению спроса на современное электрооборудование, обеспечивающее как быстрый заряд аккумуляторных батарей, так и преобразование электрической энергии, запасенной в батарее, для нужд электрооборудования. В связи с высоким уровнем развития электроники появляются новые электронные компоненты и новые возможности по созданию силового электрооборудования с улучшенными характеристиками. Поэтому актуальной проблемой является совершенствование методики выбора основного электрооборудования – тягового электродвигателя и аккумуляторной батареи для автономного транспортного средства.

Использование транспортных средств на электрической тяге может стать эффективным решением в различных сферах производственного процесса, например в таких, как горнодобывающая промышленность. Разработка месторождений полезных ископаемых открытым способом имеет неоспоримые преимущества: возможность эффективно извлекать полезные ископаемые из глубин земли, экономия времени и ресурсов при добыче, возможность проводить комплексные исследования геологического строения месторождения, а также минимизация воздействия на

окружающую среду. Однако с увеличением глубины карьера гигиенические условия труда значительно ухудшаются. Загазованность рабочего пространства карьера нередко становится причиной остановки работ в карьере и простоя оборудования. Технологический автотранспорт с двигателями внутреннего сгорания является одним из основных загрязнителей атмосферы карьера. Использование транспорта с электрическими двигателями является перспективным направлением в борьбе с сокращением загазованности карьерного пространства.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ПРОБЛЕМА

Основным электрооборудованием, определяющим технические характеристики автономного электро-транспортного средства, являются тяговый двигатель и аккумуляторная батарея. Это электрооборудование, как правило, должно быть рассчитано на основе скоростной и нагрузочной диаграмм автономного ТС и электропривода. В данной работе рассматривается методика расчета основного электрооборудования на примере наземного транспортного средства – легкового электромобиля.

Практика расчета мощности электродвигателя для автомобиля часто основана на выборе мощности электродвигателя исходя из мощности двигателя внутреннего сгорания аналогичного транспортного средства, а энергоемкость аккумуляторной батареи выбирается с учетом средних скорости движения и пути пробега автомобиля. Такой подход к выбору электрооборудования является предварительным и научно необоснованным. Поэтому на практике приходится корректировать выбранные мощность двигателя и энергоемкость аккумуляторной батареи. Одной из причин являются различия механических и скоростных характеристик ДВС и электродвигателей. При таком подходе не учитываются кинематические схемы ДВС и электрического двигателя. Моменты инерции этих двигателей и номинальные КПД существенно отличаются друг от друга, их динамические характеристики не аналогичны, кроме того КПД двигателей зависит от скорости вращения выходного вала и технологической нагрузки. Следует отметить также, что сила качения движению транспортного средства зависит от давления воздуха в колесах, качества дорожного покрытия, силы и направления ветра. Мощность электродвигателя зависит от угла подъема (спуска) дорожного полотна.

В данной работе решается задача совершенствования методики выбора мощности электродвигателя и энергоемкости аккумуляторной батареи с учетом массогабаритных показателей транспортного средства, его пути и скоростных режимов движения без учета вышеперечисленных факторов, влияющих на мощность двигателя и энергоемкость аккумуляторной батареи. Задача решается методами, основанными на теории электропривода. Мощность тягового электродвигателя и энергоемкость аккумуляторной батареи транспортного средства рассчитываются аналитически и методом математического моделирования в среде MATLAB для различных режимов движения электромобиля.

АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД РАСЧЕТА МОЩНОСТИ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДВИГАТЕЛЯ И ЭНЕРГОЕМКОСТИ АККУМУЛЯТОРНОЙ БАТАРЕИ ДЛЯ АВТОНОМНОГО ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА

Анализ основного электрооборудования автономных транспортных средств показывает, что в качестве тягового электропривода используются двигатели переменного тока (асинхронные, синхронные двигатели с классическим возбуждением и с возбуждением от постоянных магнитов) [2].

Далее приведены основные формулы, на которых базируется аналитический метод расчета мощности тягового электрического двигателя.

Номинальная мощность электродвигателя для электромобиля определяется по условию [3]:

$$P_{дв.н} \geq \frac{P_T}{k_{пер} \eta_n \eta_d}, \quad (1)$$

где P_T – требуемая на ободе колеса мощность, Вт; η_n , η_d – значения КПД элементов механической передачи и электродвигателя; $k_{пер}$ – перегрузочный коэффициент электродвигателя.

Требуемая мощность P_T рассчитывается по формуле:

$$P_T = F_T V_n, \quad (2)$$

где F_T – тяговое усилие на ободе колеса, Н; V_n – скорость пуска, которая принимается равной средней скорости движения автомобиля в городской среде, м/с.

Требуемая сила тяги электропривода определяется по формуле:

$$F_T = (1 + \gamma) m a_n + W_0, \quad (3)$$

где $(1 + \gamma) = 1,03...1,07$ – коэффициент инерции, приведенный к валу электродвигателя [4]; m – масса электромобиля, кг; a_n – пусковое ускорение транспортного средства, м/с²; W_0 – основные силы сопротивления движению транспортного средства, Н.

Величина пускового ускорения транспортного средства является функцией начальной и конечной скорости и времени:

$$a_n = \frac{V_{кон} - V_{нач}}{t_{кон} - t_{нач}}, \quad (4)$$

где $V_{кон}$, $V_{нач}$ и $t_{кон}$, $t_{нач}$ – конечные и начальные скорости и время соответственно, м/с и с соответственно.

Величина основного сопротивления движению W_0 для легкового транспорта является суммой:

$$W_0 = W_k + W_{аэр}, \quad (5)$$

где W_k – сила качения, Н; $W_{аэр}$ – сила аэродинамического сопротивления, Н.

Сила качения определяется уравнением:

$$W_k = mg f_y, \quad (6)$$

где $g = 9,81$ – ускорение свободного падения, м/с²; f_y – коэффициент удельного сопротивления качению, который зависит от типа дорожного покрытия и скорости автомобиля и определяется по формуле [5]:

$$f_y = f_0 \left(1 + \frac{V_n^2}{20000} \right). \quad (7)$$

Коэффициент сопротивления качению при относительно малой скорости движения f_0 по асфальтобетонному покрытию в расчетах принимается в диапазоне от 0,01 до 0,02.

Сила аэродинамического сопротивления определяется произведением:

$$W_{\text{аэр}} = S a_0 V_n^2, \quad (8)$$

где S – площадь миделевого сечения, м^2 ; a_0 – коэффициент обтекаемости транспортного средства.

Коэффициент обтекаемости для легковых автомобилей принимается равным $a_0 = 0,3 \text{ Н} \cdot \text{с}^2/\text{м}^4$ [6].

Площадь миделевого сечения определяется по формуле [7]:

$$S = aBH, \quad (9)$$

где a – коэффициент использования площади Миделя, принимаемый из диапазона 0,75-0,9; B , H – средние ширина и высота транспортного средства соответственно, м .

При известных аналогах транспортных средств определяются их средние массогабаритные размеры. Средняя масса транспортного средства определяется отношением

$$m = \sum \frac{m_i}{n_i}, \quad (10)$$

где m_i – масса i -го транспортного средства, кг ; n_i – число транспортных средств.

Для установившегося режима движения транспортного средства энергоёмкость аккумуляторной батареи определяется уравнением:

$$E = k_3 \cdot \frac{P_{\text{дв.н}}}{3600} \cdot \frac{\Pi}{V_n}, \quad (11)$$

где E – энергоёмкость аккумуляторной батареи, $\text{кВт} \cdot \text{ч}$; Π – путь, пройденный транспортным средством за время t , м ; k_3 – коэффициент запаса энергоёмкости АКБ.

В данной работе по уравнениям (1)-(11) выполнены расчеты мощности тягового двигателя и энергоёмкости аккумуляторной батареи для транспортного средства [8-12] со средними массогабаритными и энергетическими характеристиками, представленными в табл. 1 и 2, движущегося с постоянной средней скоростью 40 км/ч (11,1 м/с) по асфальтобетонному покрытию, продолжительность движения – 7,6 ч , протяженность пути – 300 км , коэффициент запаса энергоёмкости АКБ – 1,2.

Средняя мощность электродвигателей и энергоёмкость аккумуляторной батареи сравнимых автомобилей составляют $P_{\text{ср}} = 127 \text{ кВт}$ и $E_{\text{ср}} = 57 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$.

В табл. 3 приведены результаты расчета мощности тягового электродвигателя и параметров, определяющих мощность.

Таблица 1
Массогабаритные характеристики автомобилей

Параметры	Марка автомобиля				
	Mazda MX-30	Peugeot e-Rifter	SsangYong Korando e-motion	Toyota bZ4X	Mercedes EQA 250
Длина, мм	4395	4403	4465	4690	4463
Ширина, мм	1795	1848	1870	1860	1834
Высота, мм	1570	1874	1645	1651	1620
Диаметр колес, мм	567	552	521	577	567
Масса, кг	1645	1690	1840	1970	1965

Таблица 2
Энергетические характеристики автомобилей

Параметры	Марка автомобиля				
	Mazda MX-30	Peugeot e-Rifter	SsangYong Korando e-motion	Toyota bZ4X	Mercedes EQA 250
Мощность, кВт	100	107	140	150	140
Энергоёмкость, кВт·ч	35,5	50	61,5	71,4	66,5

Таблица 3
Результаты расчетов мощности тягового электродвигателя

Параметр	Вычисленное значение
Средняя масса m , кг	1822
Средняя высота H , м	1,672
Средняя ширина B , м	1,841
Коэффициент удельного сопротивления качению f_v , о.е.	0,0151
Сила качения W_k , Н	269,89
Сила аэродинамического сопротивления $W_{\text{аэр}}$, Н	91,0
Величина основного сопротивления движению W_0 , Н	387,89
Величина пускового ускорения $a_{\text{п}}$, м/с^2	3,09
Тяговое усилие на обод колеса $F_{\text{т}}$, Н	6299,37
Требуемая мощность на обод колеса $P_{\text{т}}$, кВт	69,92
Номинальная мощность тягового электродвигателя $P_{\text{дв.н}}$, кВт	25,83
Энергоёмкость аккумуляторной батареи E , кВт·ч	235,3

В расчете не учтено влияние таких факторов, как скорость ветра, качество дорожного покрытия, масса перевозимого полезного груза, угол подъема дорожного полотна, а также изменение КПД электродвигателя от коэффициента загрузки.

Проверим справедливость этих расчетов для скоростного режима транспортного средства в соответствии с рекомендуемым всемирным тестовым циклом движения легковых автомобилей $V(t)$, приведенным на рис. 1 [13].

Проверка аналитически рассчитанной мощности электродвигателя по уравнениям (1)-(11) с помощью тестового цикла движения транспортного средства позволяет оценить мощность электродвигателя при работе в динамическом режиме.

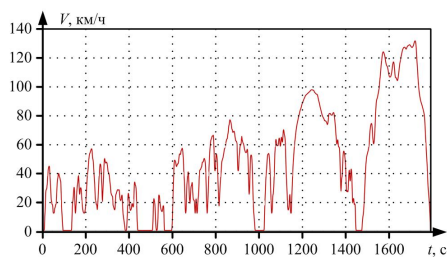


Рис. 1. Всемирный тестовый цикл движения для легковых автомобилей

Моделирование работы тягового электропривода в динамическом режиме осуществляется в среде MATLAB. Моделирование производится при тех же исходных параметрах и условиях, использованных в аналитическом методе расчета.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА В СРЕДЕ MATLAB

Моделирование мощности тягового двигателя, работающего в динамическом режиме, близком к реальному, позволяет оценить правильность аналитического расчета мощности двигателя. При моделировании приняты следующие основные условия и ограничения: вентиляция электродвигателя независимая, температурный коэффициент K_θ и коэффициент теплоотдачи K_β принимаются равными 1; коэффициент неравномерности распределения нагрузки между двигателями K_n принимается равным 1, как для одного эквивалентного двигателя; коэффициент запаса по мощности K_γ принимается равным коэффициенту перегрузки $k_{пер} = 3$. Моделирование осуществляется для диапазона средней скорости движения от 20 до 140 км/ч с шагом 10 км/ч; движение транспортного средства осуществляется по горизонтальной поверхности с асфальтобетонным покрытием. При моделировании используется всемирный тестовый цикл движения транспортного средства, представленный на рис. 1.

Для исследования цикла движения легкового электромобиля разработана модель в среде MATLAB. Для удобства представления этой модели она разделена на фрагменты, определяющие рассчитываемые параметры: ускорения, требуемой силы тяги и электрической мощности (рис. 2), основного сопротивления движению (рис. 3), среднеквадратичной мощности (рис. 4), среднеквадратичного вращающего момента (рис. 5) и энергии аккумуляторной батареи (рис. 6) тягового электродвигателя.

Моделирование осуществляется для транспортного средства, имеющего средние массогабаритные показатели, приведенные в табл. 3.

Для определения требуемой механической мощности P_t необходимо знать значение действующей силы тяги F_t , которая, кроме заданной скорости и массы, зависит от величины ускорения. Эта величина определяется как производная от скорости, м/с²:

$$a_n = \frac{dV(t)}{dt}. \quad (12)$$

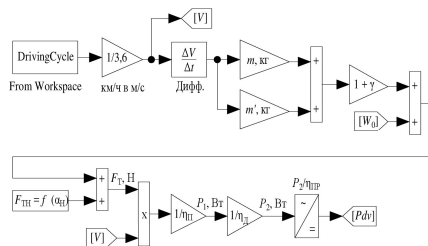


Рис. 2. Расчёт ускорения, требуемой силы тяги и электрической мощности

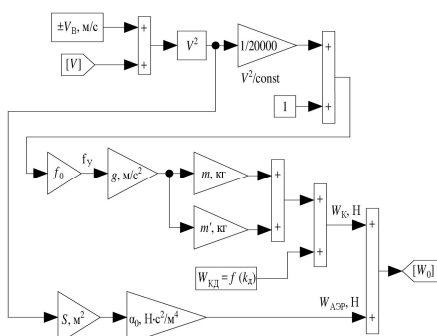


Рис. 3. Расчёт основного сопротивления движению

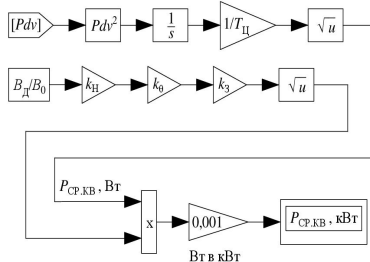


Рис. 4. Моделирование среднеквадратичной мощности двигателя

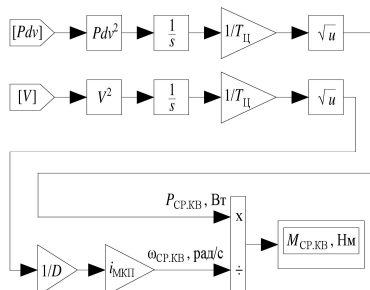


Рис. 5. Моделирование вращающего среднеквадратичного момента двигателя

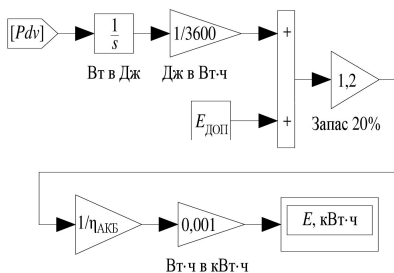


Рис. 6. Моделирование энергии аккумуляторной батареи

Модель на рис. 2 реализует формулы (2), (3) и (11). С помощью блока From Workspace происходит считывание значений скорости в км/ч, затем переводятся в м/с. Ускорение является результатом дифференцирования. На рис. 2: m и m' – соответственно масса транспортного средства и полезного груза, кг; $1 + \gamma$ – коэффициент инерции, приведенный к валу электродвигателя; F_T – необходимое тяговое усилие; W_0 – основное сопротивление движению.

С учетом КПД передачи η_p , КПД электродвигателя η_d и КПД преобразователя $\eta_{пр}$ формируется электрическая мощность тягового двигателя.

Модель на рис. 3 реализует формулы (5)–(8). Ветвь с блоками f_0 , g , m и m' моделирует формулу (6), то есть силу качения W_k . Блок $W_{кл} = f(k_d)$ моделирует зависимость силы качения от коэффициента давления в шинах. Ветвь с блоками S и a_0 моделирует формулу (8), то есть аэродинамическое сопротивление $W_{аэр}$. Результатом суммирования силы качения и силы аэродинамического сопротивления является основное сопротивление движению W_0 .

В отличие от аналитического метода, подбор двигателя по мощности и его проверка в данной методике осуществляется расчетом среднеквадратичной мощности [14]. Условием проверки выбранного двигателя является уравнение:

$$P_{дв.н} \geq P_{ср.кв} \sqrt{k_p K_n K_0 K_3}, \quad (13)$$

где $P_{ср.кв}$ – среднеквадратичное значение мощности, Вт; k_p – коэффициент теплоотдачи, зависящий от типа вентиляции (независимая или самовентиляция); K_n – коэффициент неравномерности распределения нагрузки между двигателями; K_0 – температурный коэффициент; K_3 – коэффициент запаса по мощности.

Среднеквадратичное значение мощности вычисляется по формуле:

$$P_{ср.кв} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n P_i^2 \Delta t_i}{T}}, \quad (14)$$

или

$$P_{ср.кв} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (P(t))^2 dt}, \quad (15)$$

где T – время цикла, с.

Моделирование среднеквадратичной мощности двигателя приведено на рис. 4.

Зная среднеквадратичную линейную скорость движения автомобиля $V_{ср}$ и диаметр колес D , вычисляется среднеквадратичная угловая скорость колес автомобиля:

$$\omega_{ср} = \frac{V_{ср}}{D}. \quad (16)$$

При моделировании диаметр колеса транспортного средства принимается равным 0,557 м, как среднее D , из табл. 1.

Передаточное число механической коробки передачи на третьей ступени принято равным $i_{мнк} = 7,54$ [15].

Приведенная к валу двигателя среднеквадратичная угловая скорость определяется по формуле:

$$\omega_{ср.дв} = \omega_{ср} i_{мнк}. \quad (17)$$

Среднеквадратичный момент вычисляется известным отношением:

$$M_{ср.кв} = \frac{P_{ср.кв}}{\omega_{ср.дв}}. \quad (18)$$

Моделирование среднеквадратичного вращающего момента двигателя приведено на рис. 5.

Энергия, необходимая для обеспечения движения по заданному циклу (см. рис. 1), рассчитывается по формуле:

$$E = N_{ц} k_3 \left(\int_0^T \frac{P_{дв}(t)}{\eta_{дв}} dt + E_{доп} \right) \frac{1}{\eta_{акб}}, \quad (19)$$

где $N_{ц}$ – число циклов движения, определяемое отношением $T/t_{ц}$; $t_{ц}$ определяется для заданной средней скорости движения транспортного средства по диаграмме (см. рис. 1); k_3 – коэффициент запаса, равный 1,2; $\eta_{акб}$ – КПД аккумуляторной батареи; $P_{дв}$ – мощность двигателя, кВт; T – время цикла, с; $E_{доп}$ – энергия, потребляемая дополнительным оборудованием электроавтомобиля, кВт·ч (табл. 4) [2].

Модель расчёта предварительной энергоёмкости тягового аккумуляторной батареи представлена на рис. 6.

С применением разработанных моделей выполнены исследования зависимостей мощности электродвигателя P и энергии аккумуляторной батареи E от скорости движения автомобиля в диапазоне от 20 до 140 км/ч. Полученные результаты исследования представлены на рис. 7 и в табл. 5.

Зависимости, представленные на рис. 7, описываются уравнениями вида:

$$P(V_{ср}) = 0,0195V_{ср}^2 - 0,306V_{ср} + 6,1; \quad (20)$$

$$E(V_{ср}) = 0,011V_{ср}^2 + 4,834V_{ср} + 24,84. \quad (21)$$

Таблица 4
Потребление энергии дополнительным оборудованием электроавтомобиля

Наименование	Время работы, ч	Потребляемая энергия, Вт·ч
Фары ближнего света	1	168
Приборы	1	24
Габаритные фонари	2	192
Прочие наружные фонари	1	48
Обогреватель салона, климат-контроль	0,5	90
Гидроусилитель руля	1	60
Насос тормозной системы	1	60
Электродвигатель дворников	0,05	3,6
Итого		645,6

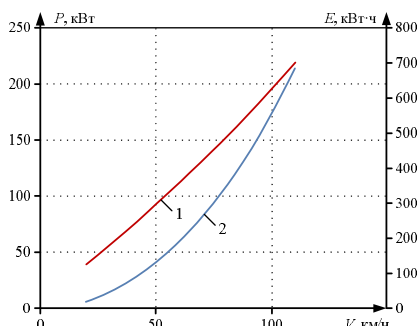


Рис. 7. Зависимости мощности двигателя (1) и энергии АКБ (2) от скорости движения транспортного средства

Полученные уравнения (20) и (21) позволяют оценивать мощность и энергоёмкость аккумуляторной батареи при движении транспортного средства со средней скоростью в диапазоне от 30 до 110 км/ч. Так как зависимости на рис. 7 описываются уравнениями второго порядка, то погрешности составляют:

- при расчете мощности от 1,5 до 4,5%;
- при расчете энергоёмкости аккумуляторной батареи от 0,5 до 1,5%.

Величина p , кВт/кг, как отношение мощности тягового электродвигателя $P(V_{cp})$, кВт, к массе транспортного средства m , кг, определяется по формуле:

$$p = \frac{P(V_{cp})}{m}. \quad (22)$$

Величина e , кВт·ч/кг, как отношение энергоёмкости аккумуляторной батареи $E(V_{cp})$, кВт·ч, к массе транспортного средства m , кг, определяется по формуле:

$$e = \frac{E(V_{cp})}{m}. \quad (23)$$

Отношения (22) и (23) зависят от скорости движения транспортного средства. При изменении скорости в диапазоне от 20 до 110 км/ч отношение мощности к массе автомобиля изменяется: в диапазоне скоростей от 40 до 60 км/ч – в 2,4 раза; в диапазоне скоростей от 60 до 90 км/ч – в 2,3 раза; в диапазоне скоростей от 90 до 110 км/ч – в 1,5 раза. Отношение энергоёмкости АКБ к массе аналогично изменяется: в диапазоне скоростей от 40 до 60 км/ч – в 1,5 раза; в диапазоне скоростей от 60 до 90 км/ч – в 1,6 раза; в диапазоне скоростей от 90 до 110 км/ч – в 1,3 раза.

В аналитическом методе при расчете мощности электрического двигателя транспортного средства и энергоёмкости аккумуляторной батареи не учитываются влияние таких параметров, как скорость ветра V_w , качество дорожного покрытия, от которого зависит коэффициент сопротивления качению f_0 , масса перевозимого полезного груза m' , угол наклона дорожного полотна H , а также изменение КПД электродвигателя от коэффициента загрузки $\beta = P_i / P_{дв.н.}$.

С целью совершенствования методики расчета мощности электродвигателя и энергоёмкости аккумуляторной батареи для автономного транспортного средства необходимо учесть влияние вышеперечисленных факторов.

Для учета влияния этих параметров на дополнительную статическую мощность, преодолеваемую электродвигателем (приращение мощности ΔP_0), и энергоёмкость аккумуляторной батареи ΔE легкового автономного транспортного средства необходимо определить зависимости: $\Delta P, \Delta E = f(\Delta V_a)$; $\Delta P, \Delta E = f(\beta)$; $\Delta P, \Delta E = f(\Delta f_0)$; $\Delta P, \Delta E = f(\Delta m')$; $\Delta P, \Delta E = f(\Delta H)$.

Таблица 5

Результаты исследования

V_{cp} , км/ч	V_{cp} , м/с	N_a	Π , км	T , ч	a_n , м/с ²	F_t , Н	W_k , Н	$W_{азр}$, Н	W_0 , Н	P_t , кВт	$P_{дв.н.}$, кВт	$M_{ср.кв.}$, Нм	E , кВт·ч	p , кВт/кг	e , кВт·ч/кг
20	5,56	135	300	15	1,36	3385,62	265,28	19,44	284,72	18,81	6,947	92,37	125,8	0,004	0,069
30	8,33	45	300	10	2,03	4860,50	265,79	43,75	309,54	40,50	14,96	132,62	180,3	0,008	0,099
40	11,11	27	300	7,5	2,71	6394,03	266,51	77,78	344,28	71,04	26,24	177,20	237,4	0,014	0,130
50	13,89	17	300	6	3,39	8010,08	267,42	121,53	388,95	111,25	41,09	218,55	296,6	0,023	0,163
60	16,67	12	300	5	4,07	9656,03	268,55	175,00	443,55	160,93	59,44	263,46	357,4	0,033	0,196
70	19,44	9	300	4,3	4,74	11370,57	269,88	238,19	508,07	221,09	81,66	310,24	420,7	0,045	0,231
80	22,22	6	300	3,75	5,42	13146,27	271,41	311,11	582,52	292,14	107,9	358,69	486,3	0,059	0,267
90	25,00	5	300	3,3	6,10	14988,72	273,15	393,75	666,90	374,72	138,4	408,96	554,4	0,076	0,304
100	27,78	4	300	3	6,78	16911,05	275,09	486,11	761,20	469,75	173,5	461,41	625,4	0,095	0,343
110	30,56	3	300	2,7	7,45	18918,04	277,23	588,19	865,43	578,05	213,5	516,17	699,5	0,117	0,384

Для количественной оценки приращений статической мощности, преодолеваемой электродвигателем, и дополнительной энергоемкости аккумуляторной батареи в данном исследовании используются экспериментальные данные:

- расчетные значения мощности и энергоемкости АКБ без учета влияния исследуемых параметров;
- изменение коэффициента сопротивления качению f_0 от типа дорожного покрытия (табл. 6) [5];
- зависимость КПД электродвигателя переменного тока от коэффициента загрузки β , (рис. 8) [16];
- скорость встречного ветра V_n изменяется в диапазоне от 0 до 20 м/с с шагом 5 м/с для скоростей движения транспортного средства от 40 до 80 км/ч с шагом 20 км/ч;
- масса перевозимого полезного груза изменяется в зависимости от числа пассажиров (при средней массе одного пассажира 70 кг) и средней массы багажа (30 кг на одного пассажира);
- угол наклона (подъема) дорожного полотна изменяется в диапазоне от 0 до 20%.

Моделирование приращений мощности электродвигателя и энергоемкости аккумуляторной батареи осуществляется при следующих допущениях:

- ветер встречный (попутный и боковой ветер в расчетах не учитываются);
- дорожное покрытие – сухое;
- не учитывается КПД электрической машины и преобразователя (инвертора) при рекуперации энергии при движении транспортного средства под уклон;
- за номинальную мощность электродвигателя принята мощность 108 кВт для средней скорости движения транспортного средства 80 км/ч.

Таблица 6
Зависимость коэффициента сопротивления качению от типа дорожного покрытия

Тип	Коэффициент сопротивления качению
Асфальтобетонная и цементобетонная дорога	0,015–0,02
Булыжная дорога	0,025–0,03
Грунтовая дорога	0,05–0,15
Песок	0,1–0,2
Снег	0,1–0,3

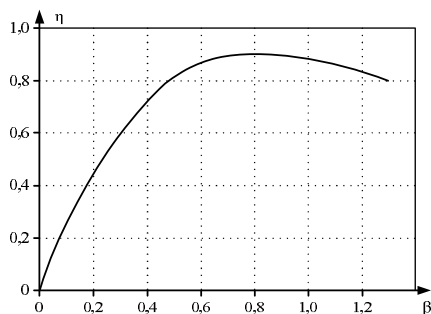


Рис. 8. Зависимость КПД от коэффициента загрузки

С помощью модели в MATLAB получены зависимости $\Delta P, \Delta E = f(\Delta V_n)$ (рис. 9); $\Delta P, \Delta E = f(\beta)$ (рис. 10); $\Delta P, \Delta E = f(\Delta f_0)$ (рис. 11); $\Delta P, \Delta E = f(\Delta m)$ (рис. 12); $\Delta P, \Delta E = f(\Delta H)$ (рис. 13) с учетом перечисленных условий и допущений.

Из анализа полученных зависимостей ΔP_c и ΔE от перечисленных факторов можно сделать следующие выводы:

1. Из рис. 9 следует, что зависимости $\Delta P_c = f(\Delta V_n)$ и $\Delta E = f(\Delta V_n)$ нелинейные. При движении транспортного средства со средней скоростью до 40 км/ч при увеличении скорости ветра до 15 м/с приращение мощности электродвигателя не превышает 1 кВт, что составляет около 0,9% от номинальной мощности рассчитанного электродвигателя; при скорости движения ТС 60 км/ч при той же скорости ветра приращение мощности электродвигателя не превышает 2,1 кВт, что составляет около 2% от номинальной мощности; при скорости движения ТС 80 км/ч при той же скорости ветра приращение мощности электродвигателя не превышает 3,7 кВт, что составляет около 4% от номинальной мощности.

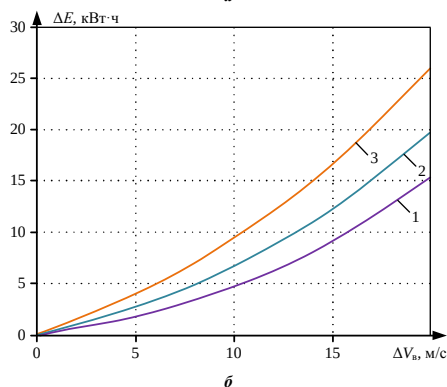
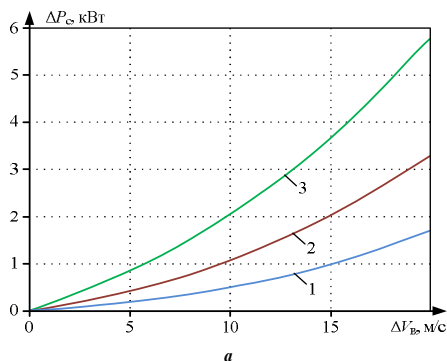


Рис. 9. Зависимости $\Delta P_c = f(\Delta V_n)$ (а) и $\Delta E = f(\Delta V_n)$ (б) при: 1 – $V=40$ км/ч, 2 – $V=60$ км/ч, 3 – $V=80$ км/ч

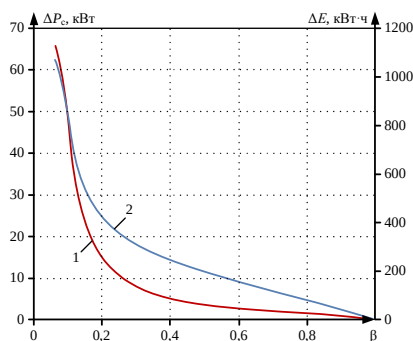


Рис. 10. Зависимости $\Delta P_c = f(\beta)$ (1) и $\Delta E = f(\beta)$ (2)

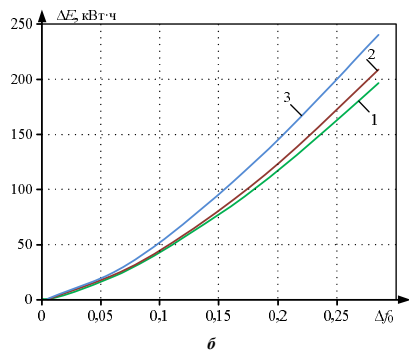
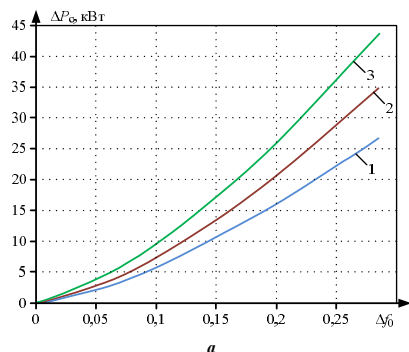


Рис. 11. Зависимости $\Delta P_c = f(\Delta f_0)$ (а) и $\Delta E = f(\Delta f_0)$ (б) при: 1 – $V=40$ км/ч, 2 – $V=60$ км/ч, 3 – $V=80$ км/ч

2. Анализ зависимости $\Delta P_c = f(\beta)$ (см. рис. 10) показывает, что уменьшение коэффициента загрузки β ведет к снижению КПД электродвигателя, а следовательно, к увеличению потребляемой мощности двигателя от источника питания. Например, при коэффициенте загрузки $\beta = 0,5$ увеличение потребляемой мощности составляет около 12 кВт, то есть 10-11% от номинальной мощности двигателя. Эта мощность увеличивает нагрев электродвигателя, увеличивает нагрузку на систему охлаждения и в конечном итоге требует увеличения емкости аккумуляторной батареи.

3. Анализ зависимости $\Delta P_c = f(\Delta f_0)$ (см. рис. 11) показывает, что увеличение коэффициента сопротивления качению f_0 , зависящего от качества дорожного покрытия, существенно влияет на требуемую мощность электродвигателя. Эта зависимость нелинейная. Например, при переходе с асфальтобетонного покрытия на грунтовое приращение требуемой мощности электродвигателя составляет около 5 кВт для скорости движения ТС 40 км/ч и около 6 кВт для скорости движения ТС 60 км/ч, то есть 4,6 и 5,5% соответственно.

4. Из анализа зависимости приращения мощности электродвигателя $\Delta P_c = f(\Delta m')$ от массы перевозимого полезного груза m' (см. рис. 12) следует, что зависимость практически линейная. Например, при перевозке трех пассажиров общей массой 300 кг приращение требуемой мощности электродвигателя составляет около 4 кВт для скорости движения ТС 40 км/ч, около 9 кВт для скорости ТС 60 км/ч и около 17 кВт при скорости ТС 80 км/ч, то есть 3,7, 8,3 и 15,8% соответственно.

5. Анализ зависимости приращения мощности электродвигателя $\Delta P_c = f(\Delta H)$ от угла подъема дорожного полотна (см. рис. 13) показывает, что движение ТС на подъем увеличивает мощность двигателя. Например, при подъеме дорожного полотна 10% дополнительная требуемая мощность двигателя увеличивается на 2 кВт для скорости движения ТС 40 км/ч, на 3 кВт для скорости движения ТС 60 км/ч и на 4 кВт для скорости движения ТС 80 км/ч, то есть на 1,9, 2,7 и 3,7% соответственно.

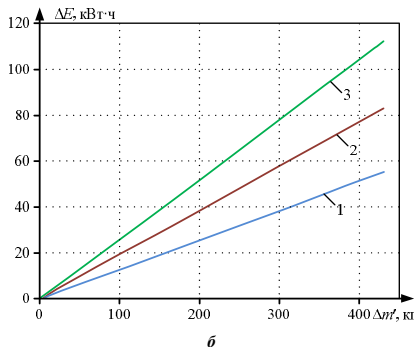
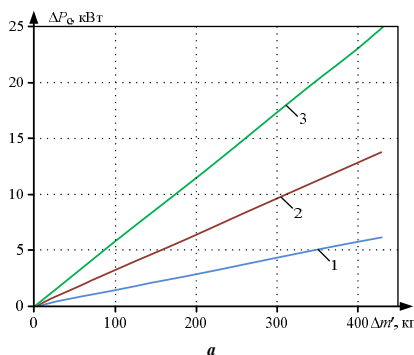


Рис. 12. Зависимости $\Delta P_c = f(\Delta m')$ (а) и $\Delta E = f(\Delta m')$ (б) при: 1 – $V=40$ км/ч, 2 – $V=60$ км/ч, 3 – $V=80$ км/ч

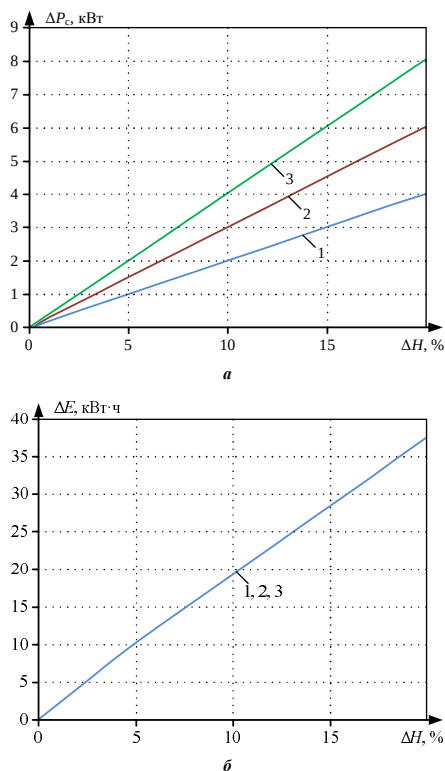


Рис. 13. Зависимости $\Delta P_{ср}=f(\Delta H)$ (а) и $\Delta E=f(\Delta H)$ (б) при: 1 – $V=40$ км/ч, 2 – $V=60$ км/ч, 3 – $V=80$ км/ч

Сравнительный анализ приращений мощности в функции от исследуемых аргументов показывает, что максимальную чувствительность на приращение дополнительной статической мощности $\Delta P_{ср}$, преодолеваемую электродвигателем, а следовательно, на энергоёмкость аккумуляторной батареи, имеют:

- коэффициент загрузки β , определяющий КПД электродвигателя (до $0,11P_{дв.н}$ при $\beta=0,5$);
- масса перевозимого полезного груза m' (до $0,15P_{дв.н}$ при $m'=300$ кг);
- коэффициент сопротивления качению f_0 (до $0,055P_{дв.н}$ при движении со скоростью 60 км/ч по грунтовой дороге);
- скорость ветра V_B (до $0,04P_{дв.н}$ при $V_B=15$ м/с);
- угол подъёма дорожного полотна (до $0,037P_{дв.н}$ при подъёме 10%).

При расчете мощности тягового электродвигателя с учетом влияния таких факторов, как скорость ветра, качество дорожного покрытия, масса перевозимого полезного груза, угол подъёма дорожного полотна, а также изменение КПД электродвигателя от коэффициента загрузки, возможно утверждать, что мощность двигателя, рассчитанную без учета этих факторов, необходимо увеличивать на 25-30%. Следовательно, мощность двигателя, рассчитанную без учета перечисленных факто-

ров, следует умножить на коэффициент 1,25-1,3, то есть $P_{дв.н} = (1,25 \div 1,3) \cdot P_{ср.кв.}$. Для примера, приведенного в данной работе, мощность двигателя должна удовлетворять условию: $P_{дв.н} \geq (1,25 \div 1,3) \cdot 107,9 \approx 135$ кВт.

Мощность, рассчитанная по предложенной методике, отличается от средней мощности электродвигателей производителей электромобилей, представленных в табл. 2, не более 6%, что допустимо для предварительного выбора мощности тягового электродвигателя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проанализированы известные методики расчета мощности тягового электродвигателя и энергоёмкости аккумуляторной батареи для автономного наземного транспортного средства. Показано, что на практике применяются аналитические методы и метод математического моделирования, например в среде MATLAB с учетом всемирного тестового цикла движения для легковых автомобилей.

2. Аналитический расчет мощности тягового двигателя и энергоёмкости аккумуляторной батареи, а также моделирование этих параметров в среде MATLAB без учета влияния некоторых внешних факторов позволяют констатировать, что полученные результаты отличаются от 1,5 до 8% в зависимости от средней скорости движения транспортного средства, что приемлемо для предварительной оценки характеристик главного электрооборудования автономного наземного транспортного средства.

3. Исследованием показано, что мощность тягового электродвигателя и энергоёмкость аккумуляторной батареи являются нелинейными функциями от скорости движения транспортного средства. Получены математические модели, описывающие эти зависимости. Они могут использоваться для предварительного расчета мощности тягового электродвигателя и энергоёмкости аккумуляторной батареи для легкового транспортного средства массой от 1500 до 2000 кг.

4. Известные методики расчета мощности электрического двигателя транспортного средства и энергоёмкости аккумуляторной батареи не учитывают влияние таких параметров, как скорость ветра, качество дорожного покрытия, от которого зависит коэффициент сопротивления качению, масса перевозимого полезного груза, угол наклона/подъёма дорожного полотна, а также изменение КПД электродвигателя от коэффициента загрузки.

5. Предложена совершенствованная методика расчета мощности тягового электродвигателя и энергоёмкости аккумуляторной батареи для автономного наземного транспортного средства. Методика основана на теории электропривода и учитывает массогабаритные размеры, всемирный тестовый цикл движения для легковых автомобилей и влияние внешних факторов. В данной работе методика реализована в виде аналитического расчета и моделирования в среде MATLAB.

6. Определена чувствительность факторов (скорость ветра, коэффициент сопротивления качению, масса перевозимого полезного груза, угол наклона/подъёма дорожного полотна и коэффициента загрузки) на приращение дополнительной статической мощности, прикладываемой к валу электродвигателя, и

приращение энергоемкости аккумуляторной батареи. Максимальной чувствительностью обладают такие параметры, как коэффициент загрузки β , масса перевозимого полезного груза m' и коэффициент сопротивления качению f_0 .

7. Результаты исследований могут быть использованы для предварительного и проверочного расчетов мощности тягового электродвигателя и энергоемкости аккумуляторной батареи для наземного автономного транспортного средства.

Список источников

1. Мугалимов Р.Г., Шахбиева К.А. Обзор и сравнительный анализ аккумуляторных батарей для современного электротранспорта // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: тезисы докладов 81-й международной научно-технической конференции. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2023. Т. 1. С. 320.
2. Брызгалова Д.А., Королев В.В., Филатов А.А. Система электроснабжения электромобиля // Автомобиле- и тракторостроение в России: приоритеты развития и подготовка кадров: материалы международной научно-технической конференции ААИ, посвященной 145-летию МГТУ «МАМИ». М., 2010. URL: <https://tktu.ru/media/uploads/2021/11/09/5.pdf> (дата обращения: 30.11.2023)
3. Бирюков В.В. Конструкция и расчёт электрического оборудования электроподвижного состава: учебник. Новосибирск: НГТУ, 2018. 328 с.
4. Основы расчетов движения автомобилей по дорогам. URL: https://road-project.okis.ru/file/road-project/LecturesOsnovyTema_2.pdf (дата обращения: 30.11.2023).
5. Кравец В.Н. Теория автомобиля: учебник. Нижний Новгород: НГТУ им. П.Е. Алексеева, 2013. 412 с.
6. Определение фактора объектности автомобиля. URL: <https://vikidalka.ru/2-61736.html> (дата обращения: 14.11.2023).

7. Определение параметров автомобиля при подготовке исходных данных. URL: <https://lektsii.org/15-67426.html> (дата обращения: 14.11.2023).
8. Mazda MX-30. Технические характеристики. URL: https://auto.ru/catalog/cars/mazda/mx_30/22420939/22420986/specifications/ (дата обращения: 15.11.2023).
9. Peugeot e-rifter. Технические характеристики. URL: <https://auto.ru/catalog/cars/peugeot/rifter/21484864/21484949/specifications/> (дата обращения: 15.11.2023).
10. SsangYong Korando e-motion. Технические характеристики. URL: https://auto.ru/catalog/cars/ssang_yong/korando/22551799/22552030/specifications/ (дата обращения: 15.11.2023).
11. Toyota bZ4X. Технические характеристики. URL: <https://auto.ru/catalog/cars/toyota/bz4x/23265833/23265890/specifications/> (дата обращения: 15.11.2023).
12. Mercedes EQA 250. Технические характеристики. URL: <https://auto.ru/electro/cars/mercedes/eqa/22729023-22729070/22729124/> - (дата обращения: 15.11.2023).
13. Worldwide Harmonised Light Vehicles Test Procedure URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Worldwide_Harmonised_Light_Vehicles_Test_Procedure (дата обращения: 14.11.2023).
14. Основы электрического транспорта: методические указания к выполнению курсовой работы для бакалавров техники и технологии / Штанг А.А., Шуров Н.И., Пентелев В.И., Сизганова Е.Ю., Прокушев Ю. Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2008. 90 с.
15. Передаточное число коробки передач. URL: <https://armand-auto.ru/peredatocnoye-cisla-kpp-cto-takoe-peredatocnoe-cislo/> (дата обращения: 14.11.2023).
16. Исследование коэффициента мощности систем электроснабжения промышленного предприятия. URL: <https://studfile.net/preview/4242061/page:14/#42> (дата обращения: 15.11.2023)

Поступила в редакцию 20 сентября 2023 г.

Принята к печати 14 ноября 2023 г.

INFORMATION IN ENGLISH

METHODOLOGY FOR SELECTION OF MAIN ELECTRICAL EQUIPMENT FOR AN AUTONOMOUS VEHICLE

Karina A. Shakhbieva

Postgraduate Student, Department of Industrial Power Supply, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, karina.shakhbieva@mail.ru

Rif G. Mugalimov

D.Sc. (Engineering), Associate Professor, Professor, Department of Industrial Power Supply, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, energoberegienie@rambler.ru

Alia R. Mugalimova

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Department of Mining Machines and Transportation Technological Complexes, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, energoberegienie@rambler.ru

In the proposed work, an analysis of known methods for selecting basic electrical equipment for autonomous vehicles is performed. It is shown that the known methods have certain disadvantages: the justification for the power of the electric motor of an autonomous vehicle is based on the known power of the internal combustion engine for a similar vehicle, which is not entirely correct. It is shown that the choice of electric motor power should be based on well-known techniques developed in the theory of electric drives. The analysis of published methods for designing electrical equipment for autonomous vehicles shows that they are focused on the design of passenger cars. The

technical characteristics of electrical equipment of vehicles from such manufacturers as Mazda, Peugeot, SsangYong, Toyota, Mercedes are analyzed. Based on the well-known test cycle of passenger cars, the power of the electric motor and the average energy of the battery were calculated using the analytical method and the modeling method in the MATLAB Simulink software product at given average speeds and given mileage. Equations are obtained for a preliminary assessment of the traction electric motor power and the energy intensity of the battery for an autonomous ground passenger vehicle as a function of speed. It is shown that the known methods do not take into account the

influence of such parameters as wind speed, quality of the road surface, the mass of the transported payload, the angle of the road surface elevation, as well as changes in the efficiency of the electric motor depending on the load factor. The sensitivity of the listed parameters to the power increment overcome by the electric motor has been studied. An improved method for selecting the main electrical equipment for an autonomous vehicle is proposed, taking into account additional factors affecting the power of the traction motor and the energy intensity of the battery. The results obtained can be recommended for choosing the main electrical equipment of an autonomous electric ground passenger vehicle.

Keywords: electric vehicle, traction electric motor, motion cycle, battery, calculation method, simulation and mathematical models

REFERENCES

- Mugalimov R.G., Shakhbieva K.A. Review and comparative analysis of rechargeable batteries for modern electric transport. *Aktualnye problemy sovremennoy nauki, tekhniki i obrazovaniya: tezisy dokladov 81-y mezhduzrochnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Abstracts of reports of the 81st international scientific and technical conference "Current problems of modern science, technology and education"]. Magnitogorsk, NMSTU Publ., 2023, vol. 1, pp. 320. (In Russian)
- Bryzgalova D.A., Korolev V.V., Filatov A.A. Electric vehicle power supply system. *Materials of the international scientific and technical conference of the AAI "Automobile and tractor manufacturing in Russia: development priorities and personnel training", dedicated to the 145th anniversary of MSTU "MAMI"* [Materials of the AAI International Scientific and Technical conference dedicated to the 145th anniversary of MSTU "MAMI" "Automobile and tractor construction in Russia: development priorities and personnel training"]. Moscow, 2010. Available at: <https://tktts.ru/media/uploads/2021/11/09/5.pdf> (accessed 30 November 2023) (In Russian)
- Biryukov V.V. *Konstruktsiya i raschet elektricheskogo oborudovaniya elektropodvizhnogo sostava: uchebnik* [Design and calculation of electrical equipment of electric rolling stock]. Novosibirsk, NSTU Publishing House, 2018, 328 p. (In Russian)
- Fundamentals of calculations of vehicle traffic on roads. Available at: https://road-project.okis.ru/file/road-project/LecturesOsnovy/Tema_2.pdf (accessed 30 November 2023). (In Russian)
- Kravets V.N. *Teoriya avtomobilya: uchebnik*. [Car theory: textbook]. Nizhny Novgorod, Publishing house of NSTU named after R.E. Alekseev, 2013, 412 p. (In Russian)
- Determination of the streamlining factor of a car. Available at: <https://vikidalka.ru/2-61736.html> (accessed 14 November 2023). (In Russian)
- Determination of vehicle parameters when preparing initial data. Available at: <https://leksi.org/15-67426.html> (accessed 14 August 2023). (In Russian)
- Mazda MX-30. Technical characteristics. Available at: https://auto.ru/catalog/cars/mazda/mx_30/22420939/22420986/specifications/. (accessed 15 November 2023). (In Russian)
- Peugeot e-rifter. Technical characteristics. Available at: <https://auto.ru/catalog/cars/peugeot/rifter/21484864/21484949/specifications/>. (accessed 15 November 2023). (In Russian)
- SsangYong Korando e-motion. Technical characteristics. Available at: https://auto.ru/catalog/cars/ssang_yong/korando/22551799/22552030/specifications/. (accessed 15 November 2023). (In Russian)
- Toyota bZ4X. Technical characteristics. Available at: <https://auto.ru/catalog/cars/toyota/bz4x/23265833/23265890/specifications/>. (accessed 15 November 2023). (In Russian)
- Mercedes EQA 250. Technical characteristics. Available at: <https://auto.ru/electro/cars/mercedes/eqa/22729023-22729070/22729124/>. (accessed 15 November 2023). (In Russian)
- Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Worldwide_Harmonised_Light_Vehicles_Test_Procedure. (accessed 14 November 2023). (In Russian)
- Shtang A.A., Shchurov N.I., Pantelev V.I., Sizganova E.Yu., Prokushev Yu. *Osnovy elektricheskogo transporta* [Fundamentals of electric transport]. Krasnoyarsk, Siberian Federal University Publ., 2008. 90 p. (In Russian)
- Gearbox ratio. Available at: <https://armand-auto.ru/peredatocnye-cisla-kpp-cto-takoe-peredatocnoe-cislo/>. (accessed 14 November 2023)
- Study of the power factor of power supply systems of an industrial enterprise. Available at: <https://studfile.net/preview/4242061/page:14/#42>. (accessed 15 November 2023).

Шахбиева К.А., Мугалимов Р.Г., Мугалимова А.Р. Методика выбора основного электрооборудования для автономного транспортного средства // Электротехнические системы и комплексы. 2023. № 4(61). С. 27-37. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-4\(61\)-27-37](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-4(61)-27-37)

Shakhbieva K.A., Mugalimov R.G., Mugalimova A.R. Methodology for Selection of Main Electrical Equipment for an Autonomous Vehicle. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2023, no. 4(61), pp. 27-37. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-4\(61\)-27-37](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-4(61)-27-37)

¹ Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления, Улан-Удэ

² Новосибирский государственный технический университет

³ АО «Чукотэнерго», Анадырь

ВЛИЯНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ ТОКООГРАНИЧИВАЮЩИХ УСТРОЙСТВ РЕЗИСТИВНОГО ТИПА НА УСТОЙЧИВОСТЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Открытие явления высокотемпературной сверхпроводимости (ВТСП) создало возможность внедрения электротехнических устройств, обладающих уникальными характеристиками. ВТСП-провод второго поколения на основе иттриевой керамики имеет слоистую структуру, в котором сверхпроводящий слой занимает малую долю. В нагрузочном режиме ВТСП-провод обладает нулевым сопротивлением, а при возникновении сверхтоков сверхпроводящий слой переходит в нормальное состояние, в котором обладает большим сопротивлением. Ток, протекающий по проводу, вытесняется в несверхпроводящие слои (в основном медный слой), которые, в свою очередь, могут значительно ограничивать ток по причине относительно малого поперечного сечения. На основе этого созданы высокотемпературные сверхпроводящие токоограничивающие устройства (ТОУ) резистивного типа. В России и мире активно ведутся разработки ВТСП ТОУ, один из крупнейших проектов реализован в г. Москве. Представляет интерес изучение вопроса влияния ВТСП ТОУ на устойчивость электропередачи при установке ТОУ вблизи генератора. В статье рассматривается влияние ВТСП ТОУ на устойчивость на примере простейшей электропередачи генератор – шины бесконечной мощности при установке ТОУ в характерных точках электропередачи. Предложен критерий предпочтительной величины активного сопротивления из условия минимального отклонения угла ротора в начальный момент короткого замыкания. Выполнено имитационное моделирование в программно-вычислительном комплексе Matlab/Simulink. Показано положительное влияние ВТСП ТОУ на устойчивость электропередачи при возникновении коротких замыканий. Отмечена необходимость решения оптимизационных задач для подбора оптимального активного сопротивления ВТСП ТОУ, определен вектор дальнейших исследований по рассматриваемой тематике.

Ключевые слова: высокотемпературные сверхпроводящие токоограничивающие устройства, ограничение токов короткого замыкания, устойчивость электрических систем, электроэнергетические системы

ВВЕДЕНИЕ

Применение сверхпроводимости на основе высокотемпературных сверхпроводников внесено в технологический реестр по основным направлениям инновационного развития ПАО «Россети». Наиболее готовыми к коммерческому внедрению устройствами среди сверхпроводниковых устройств являются кабели и токоограничивающие устройства [1, 2]. ВТСП ТОУ обладает рядом преимуществ по сравнению с традиционным токоограничивающим устройством – реактором, такими как: отсутствие ослабления сети по пропускной способности, снижение потерь электроэнергии, снижение аperiodической составляющей токов короткого замыкания (КЗ), переходных напряжений и возможности насыщения трансформаторов тока.

АО «ОЭК» совместно с ЗАО «СуперОкс», ПАО «Россети», АО «СГО ЕЭС» внедрило и успешно провело опытную эксплуатацию ВТСП ТОУ 220 кВ на ПС 220 кВ Мневники в г. Москве, также планируется внедрение других ТОУ в энергосистему г. Москвы [3]. На рис. 1 показан общий вид, а на рис. 2 приведена схема включения ВТСП ТОУ, установленного на ПС 220 кВ Мневники в г. Москве. В табл. 1 приведены основные технические характеристики ВТСП ТОУ [3].

В работах авторов, занимавшихся внедрением ТОУ, показаны варианты установки ВТСП ТОУ [4], обозначены особенности конструкции устройства [5], приведены особенности выполнения устройств релей-

ной защиты и автоматики [6, 7], также приведены особенности реализации способов комплексов защит [8]. В [9] кратко упоминается о положительном влиянии ВТСП ТОУ на устойчивость электроэнергетических систем (ЭЭС).

Обзор отечественных публикаций показывает практически отсутствие работ по исследованию влияния ВТСП ТОУ резистивного типа на устойчивость ЭЭС. Среди иностранных публикаций можно отметить ряд работ. Например, в [10] сравниваются ВТСП ТОУ резистивного и индуктивного типа, сделан вывод о том, что с точки зрения устойчивости ТОУ резистивного типа более эффективен. В публикациях [11, 12] рассмотрены вопросы выбора места установки ВТСП ТОУ в многомашиной системе.

Таблица 1
Технические характеристики ВТСП ТОУ 220 кВ

Характеристика	Значение
Номинальное напряжение, кВ	220
Базовый уровень изоляции, кВ	950
Номинальный ток, А	1200
Ток полного перехода в резистивное состояние, А	3400
Активное сопротивление в номинальном режиме, Ом	< 0,1
Активное сопротивление при ограничении КЗ, Ом	> 40
Время перехода, мс	< 4
Тип размещения	Открытое
Климатическое исполнение	-45...+40°C
Размер 1 фазы (Д×Ш×В), мм	5500×2850×6500
Масса 1 фазы (сухая/с жидким азотом), т	16/27



Рис. 1. Вид ВТСП ТОУ, установленного на ПС 220 кВ Мневники

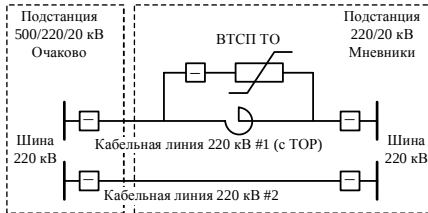


Рис. 2. Схема включения ВТСП ТОУ на ПС 220 кВ Мневники

В [13] рассмотрены оптимальное место установки ВТСП ТОУ и оптимальное сопротивление на опытной модели электропередачи напряжением 13,2 кВ. В [14] и [15] рассмотрены места установки ВТСП ТОУ на примере простейшей электропередачи и двухмашинной системы соответственно. Практически во всех работах показано положительное влияние ВТСП ТОУ, проведены моделирования, приводятся попытки определения оптимального активного сопротивления ВТСП ТОУ, однако оптимизационные задачи не решены. В [16] при попытке определения предпочтительного активного сопротивления неверно определены корни уравнения, не выполнено сравнение аналитических и программных расчетов. Кроме того, во всех вышеуказанных работах приведенные угловые характеристики мощности не в достаточной степени информативны, то есть не показано в должной степени влияние ВТСП ТОУ на угловые характеристики при различных величинах активного сопротивления ВТСП ТОУ.

Таким образом, представляет интерес исследование влияния ВТСП ТОУ на устойчивость электропередачи, в частности на динамическую устойчивость.

РЕЖИМЫ РАБОТЫ ВТСП ТОУ

ВТСП ТОУ резистивного типа по своему принципу действия является нелинейным активным сопротивлением и имеет три режима работы [3]:

1. Режим нормальной работы (НР). ВТСП ТОУ находится в сверхпроводящем состоянии.
2. Режим токоограничения (ТО). В случае превышения протекающего через ВТСП ТОУ тока пороговой величины (тока срабатывания) сопротивление устройства резко увеличивается. Переход из нормального режима в режим токоограничения происходит менее чем за 4 мс. Сопротивление продолжает возрастать в течение всего времени протекания через него тока КЗ, вплоть до достижения термической стойкости устройства или отключения КЗ.

3. Режим восстановления (РВ). После отключения КЗ сопротивление ВТСП ТОУ снижается до значения, близкого к нулю, после чего устройство переходит в нормальный режим работы. Для большинства ВТСП ТОУ время восстановления не превышает 1 мин.

На рис. 3 приведены сопротивления ТОУ в различных режимах: $R_{тс}$ – максимальное сопротивление, которое ВТСП ТОУ может развить без повреждения оборудования к моменту достижения термической стойкости (на момент достижения $R_{тс}$ ВТСП ТОУ уже должно быть отключено от сети), $R_{восст}$ – сопротивление, при котором возможно восстановление до $R_{норм}$ без отключения ВТСП ТОУ от сети. На рис. 4 показаны результаты испытания ВТСП ТОУ токами КЗ в условиях ПС 220 кВ Мневники.

Влияние ВТСП ТОУ на устойчивость

Влияние ВТСП ТОУ резистивного типа на нормальные режимы отсутствует, так как в нормальном режиме устройство обладает практически нулевым сопротивлением.

По своему влиянию на динамическую устойчивость ВТСП ТОУ подобен резисторам, используемым при электрическом торможении генераторов. Однако имеются некоторые отличия от классического торможения:

1. Возникновение активного сопротивления мгновенно при достижении критического тока (тока перехода в ТО) в первом полупериоде тока КЗ.
2. Резкое возрастание активного сопротивления ВТСП ТОУ на протяжении всего периода ограничения тока КЗ, что нехарактерно для нагрузочных резисторов.

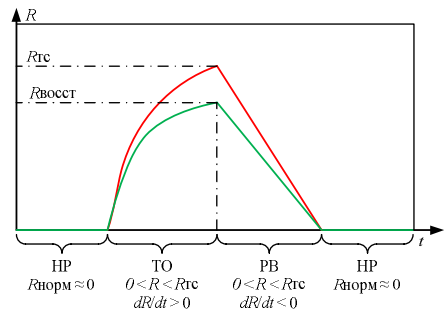


Рис. 3. Сопротивление ТОУ в различных режимах

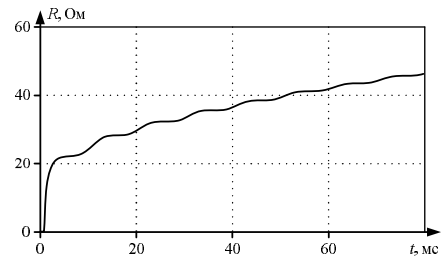


Рис. 4. Сопротивление ТОУ при КЗ

3. Наличие снижающегося активного сопротивления в режиме восстановления (как известно, нагрузочные резисторы отключаются полностью).

Рассмотрим влияние ВТСП ТОУ на устойчивость ЭЭС на примере простейшей электропередачи генератор – шины бесконечной мощности (ШБМ) (рис. 5).

В целях упрощения анализа генератор рассматривается без учета регуляторов и явногополосности. Предполагается, что трехфазное КЗ происходит вблизи шин в начале линии, как наиболее тяжелое место КЗ с точки зрения устойчивости.

Влияние на динамическую устойчивость в первую очередь обусловлено влиянием ВТСП ТОУ на угловые характеристики мощности в аварийном режиме.

Доаварийная угловая характеристика мощности без учета активных сопротивлений описывается выражением [17]:

$$P(\delta) = \frac{E'U}{X_{\Sigma}} \sin(\delta), \quad (1)$$

где E' – переходная ЭДС генератора; U – напряжение системы; X_{Σ} – эквивалентное сопротивление электропередачи.

Угловая характеристика при учете активных сопротивлений описывается выражением [10]:

$$P(\delta) = \frac{E'^2}{Z_{11}} \sin(\alpha_{11}) + \frac{E'U}{Z_{12}} \sin(\delta - \alpha_{12}), \quad (2)$$

где E' – переходная ЭДС генератора; Z_{11} и Z_{12} – собственное и взаимное сопротивление; α_{11} и α_{12} – дополняющие углы; U – напряжение системы.

$$Z_{11} = Z_1 + \frac{Z_2 Z_3}{Z_2 + Z_3}; \quad (3)$$

$$Z_{12} = Z_1 + Z_2 + \frac{Z_1 Z_2}{Z_3}; \quad (4)$$

$$\alpha_{11} = 90 - \arctg\left(\frac{X_{11}}{R_{11}}\right); \quad (5)$$

$$\alpha_{12} = 90 - \arctg\left(\frac{X_{12}}{R_{12}}\right). \quad (6)$$

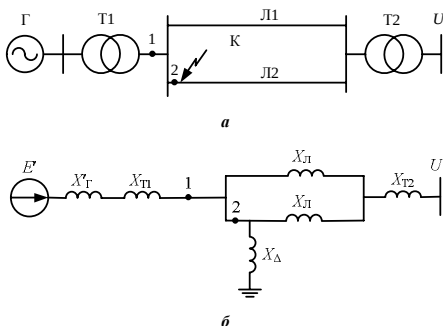


Рис. 5. Схема простейшей электропередачи генератор – ШБМ (а) и ее схема замещения (б)

ВТСП ТОУ в режимах токоограничения и восстановления в общем случае оказывает влияние на сопротивления Z_{11} и Z_{12} и дополняющие углы α_{11} и α_{12} аварийной характеристики электропередачи.

Рассмотрим два характерных случая установки ВТСП ТОУ – в точках 1 и 2 на рис. 5.

Случай установки ВТСП ТОУ в точке 1

При установке ВТСП ТОУ в точке 1 в выражениях (2) и (3) составляющие собственных и взаимных сопротивлений

$$Z_1 = \sqrt{R_{\text{ТОУ}}^2 + (X_{\Gamma} + X_{\text{Т1}})^2}; \quad (7)$$

$$Z_2 = 0, 5X_{\text{Л}} + X_{\text{Т2}}; \quad (8)$$

$$Z_3 = X_{\Delta}. \quad (9)$$

При трехфазном КЗ вблизи шин $X_{\Delta} = 0$, связь генератора с системой нарушается, следовательно, вторая часть слагаемой в (2) обнуляется, угловая характеристика определяется только собственным сопротивлением Z_{11} . Генератор после перехода ВТСП ТОУ в режим ТО нагружается активным сопротивлением ТОУ, следовательно, активная мощность генератора определяется как:

$$P(\delta) = \frac{E'^2}{Z_{11}} \sin(\alpha_{11}). \quad (10)$$

Угловые характеристики имеют вид, представленный на рис. 6.

На рис. 6 P_1 – доаварийная характеристика, $P_{\text{П}}$ – характеристика генератора при действии ВТСП ТОУ в начальный момент КЗ, представляет собой собственную мощность генератора, работающего на активное сопротивление ВТСП ТОУ. С увеличением $R_{\text{ТОУ}}$ в процессе ТО $P_{\text{П}}$ также будет увеличиваться.

Минимальное отклонение угла ротора в начальный момент КЗ будет в случае равенства P_1 и $P_{\text{П}}$ при δ_0 . Определим предпочтительное сопротивление из условия равенства доаварийной и аварийной характеристик в начальный момент КЗ:

$$P_{\text{НОРМ}} = P_{\text{ТОУ}}, \quad (11)$$

где $P_{\text{НОРМ}}$ – доаварийная мощность генератора при δ_0 ; $P_{\text{ТОУ}}$ – мощность генератора в начальный момент КЗ при действии ТОУ.

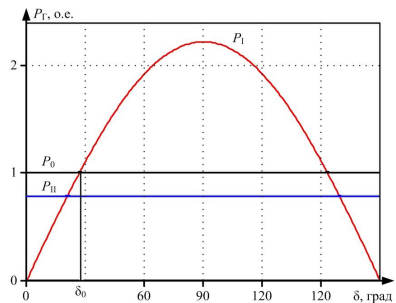


Рис. 6. Угловые характеристики электропередачи при действии ВТСП ТОУ в точке 1

С учетом (1) и (10):

$$\frac{E'U}{X_{\Sigma}} \sin(\delta_0) = \frac{E'^2}{\sqrt{R_{TOY}^2 + X_1^2}} \sin \left[90 - \arctg \left(\frac{X_1}{R_{TOY}} \right) \right]; \quad (12)$$

$$\frac{E'U}{X_{\Sigma}} \sin(\delta_0) = \frac{E'^2}{\sqrt{R_{TOY}^2 + X_1^2}} \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{X_1^2}{R_{TOY}^2}}}; \quad (13)$$

$$\frac{E'U}{X_{\Sigma}} \sin(\delta_0) = \frac{E'^2 R_{TOY}}{R_{TOY}^2 + X_1^2}; \quad (14)$$

$$U \sin(\delta_0) R_{TOY}^2 - E' X_{\Sigma} R_{TOY} + X_1^2 U \sin(\delta_0) = 0. \quad (15)$$

Решение уравнения относительно R_{TOY} имеет вид:

$$R_{TOY} = \frac{E' X_{\Sigma} \pm \sqrt{(E' X_{\Sigma})^2 - (2U \sin(\delta_0) X_1)^2}}{2U \sin(\delta_0)}. \quad (16)$$

Ввиду того, что корень уравнения со знаком «плюс» дает большое значение активного сопротивления, которое практически недостижимо в начальный момент КЗ, критерием предпочтительного сопротивления ВТСП TOY из условия минимального отклонения угла ротора в начальный момент КЗ выглядит следующим образом:

$$R_{TOY} = \frac{E' X_{\Sigma} - \sqrt{(E' X_{\Sigma})^2 - (2U \sin(\delta_0) X_1)^2}}{2U \sin(\delta_0)}. \quad (17)$$

Нужно отметить, что возрастающее R_{TOY} будет существенно тормозить генератор, и на момент устранения КЗ угол ротора может значительно измениться относительно системы. Для сохранения синхронной работы необходим соответствующий подбор параметров ВТСП TOY, а также настройка действия регуляторов генераторов.

Случай установки ВТСП TOY в точке 2

В случае установки TOY в точке 2 на **рис. 5** и КЗ в начале линии связь генератора с системой сохранится. Угловые характеристики мощности в аварийном режиме по выражению (2) имеют вид, представленный на **рис. 7**.

Аналитически определить предпочтительное R_{TOY} в начальный момент КЗ по аналогии с (11) – (16) не представляется возможным. Целесообразно осуществлять подбор предпочтительного активного сопротивления численными методами с применением программно-вычислительных комплексов.

При КЗ в середине линии (см. **рис. 5**) вид характеристик в целом соответствует виду характеристик, представленных на **рис. 7**.

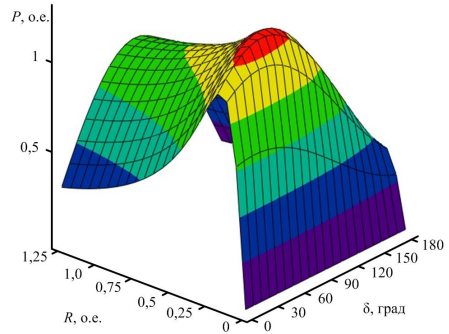


Рис. 7. Угловые характеристики при действии ВТСП TOY в точке 2, $P = f(\delta, R)$

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕЙСТВИЯ ВТСП TOY

Проведем имитационное моделирование с помощью программно-вычислительного комплекса (ПВК) MATLAB/Simulink. Схема модели, соответствующая **рис. 5**, представлена на **рис. 8** (случай установки ВТСП TOY в точке 2 **рис. 5**).

Генератор введен в модель в упрощенном варианте, без учета регулирования. Здесь представляет интерес сравнение аналитического расчета по (17) и расчета в ПВК MATLAB/Simulink. Нужно отметить, что действие регуляторов безусловно оказывает значительное влияние на устойчивость, и данный аспект будет рассмотрен в будущих работах авторов. ВТСП TOY моделируется с помощью активного сопротивления, изменяющегося в соответствии с **рис. 3** и **4**, и входит в сеть действиями выключателей Breaker FCL 1 и Breaker FCL 2. Параметры сети приведены в **табл. 2**.

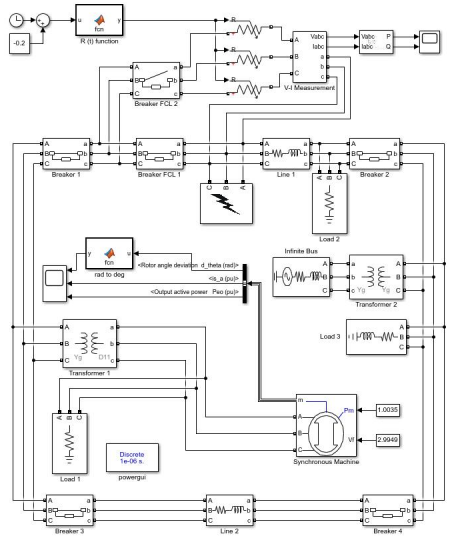


Рис. 8. Схема модели в ПВК MATLAB/Simulink

Таблица 2

Параметры электропередачи	
Элемент	Параметр
Г	$P_{НОМ} = 200 \text{ МВт}; U_{НОМ} = 15,75 \text{ кВ}; x_d = 1,84 \text{ о.е.}; x'_d = 0,295 \text{ о.е.}; J = 6,25 \text{ Т·м}^2$
T1	$S_{НОМ} = 240 \text{ МВА}; U_{ВН} = 230 \text{ кВ}; U_{НН} = 15,75 \text{ кВ}; u_k = 10,5\%$
Л	$x_{л0} = 0,4 \text{ Ом/км}; L = 100 \text{ км}$
T2	$S_{НОМ} = 240 \text{ МВА}; U_{ВН} = 230 \text{ кВ}; U_{НН} = 115 \text{ кВ}; u_k = 10,5\%$
С	$U_C = 115 \text{ кВ}$
ТОУ	$U_{НОМ} = 220 \text{ кВ}; R = 0 - 200 \text{ Ом}$

Нужно отметить, что блоки нагрузки введены в схему в связи с особенностями моделирования индуктивных элементов в Matlab/Simulink, промежуточный отбор мощности отсутствует.

Смоделированы два случая:

1) трехфазное КЗ возникает в начале линии (вблизи шин) в момент времени 0,2 с и устраняется отключением линии через 0,15 с;

2) второй случай в целом аналогичен первому случаю, но в момент возникновения КЗ действиями выключателей Breaker FCL 1 и Breaker FCL 2 вводится возрастающее активное сопротивление.

На рис. 9 показаны результаты моделирования для первого случая, при заданных условиях генератор неустойчив. На рис. 10 показаны результаты моделирования для второго случая при действии ТОУ. При тех же условиях в режиме КЗ появляется активное сопротивление $R_{вост} = 20 \text{ Ом}$, генератор остается в синхронизме с системой.

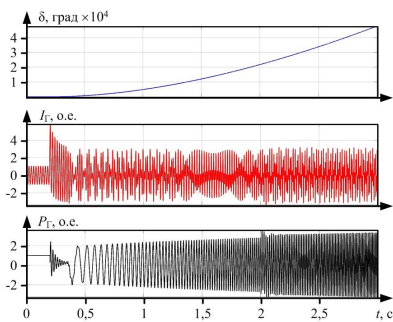


Рис. 9. Изменение угла ротора, тока статора и мощности генератора без ВТСП ТОУ

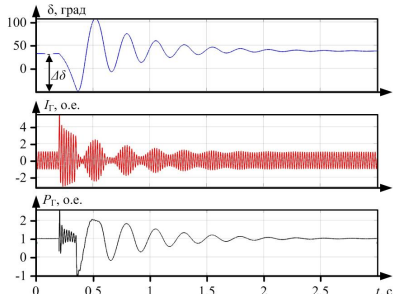


Рис. 10. Изменение угла ротора, тока статора и мощности генератора при $R_{вост}=20 \text{ Ом}$

Расчет для разных величин $R_{вост}$ показывает возможность существенного торможения ротора генератора. На рис. 11 показано максимальное отклонение угла ротора генератора в зависимости от величины $R_{вост}$ в начальный период переходного процесса. Из рис. 11 видно, что возможен оптимальный режим или, другими словами, оптимальное сопротивление, при котором отклонение угла ротора будет минимальным. Стоит отметить, что в таком случае большее возмущение вызовет отключение поврежденной линии. Также нужно отметить возможность дополнительного наброса мощности на генератор при АПВ линии и наличии активного сопротивления ВТСП ТОУ, находящегося в режиме восстановления.

Расчет предпочтительного сопротивления по (17) при установке ТОУ в точке 1 на рис. 5 для параметров, приведенных в табл. 2, дает значение $R_{ТОУ} = 11 \text{ Ом}$. Расчеты при разных $R_{ТОУ}$ действительно показывают наименьшие отклонения угла ротора генератора для $R_{ТОУ} = 11 \text{ Ом}$, на рис. 12 показаны результаты расчета в ПВК. Таким образом, критерий (17) в целом корректен и может быть использован для определения предпочтительного $R_{ТОУ}$ в начальный момент КЗ с точки зрения минимального отклонения угла ротора генератора.

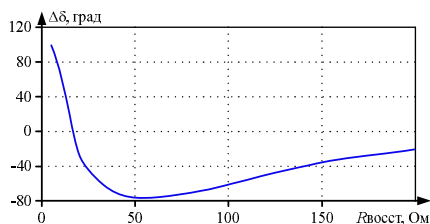


Рис. 11. Максимальное отклонение угла ротора от $\delta_{норм}$ в зависимости от $R_{вост}$

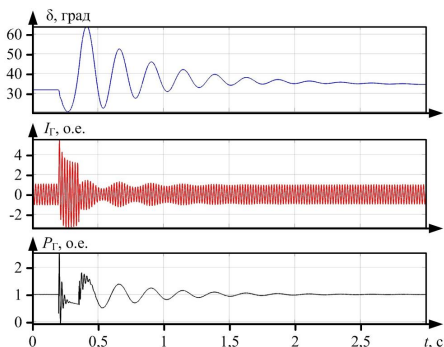


Рис. 12. Изменение угла ротора, тока статора и мощности генератора при $R_{ТОУ}=11 \text{ Ом}$ в начальный момент КЗ

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследования показали, что ВТСП ТОУ безусловно положительно влияет на устойчивость ЭЭС. Однако при установке ВТСП ТОУ вблизи генераторов величина активного сопротивления должна быть подобрана соответствующим образом в целях

снижения вероятности излишнего торможения ротора в процессе токоограничения. Предложен критерий предпочтительного активного сопротивления из условия минимального отклонения угла ротора в начальный момент КЗ. Вопрос подбора оптимального сопротивления с позиций глубины токоограничения, сохранения устойчивости генераторов, термической стойкости ВТСП ТОУ требует подробной проработки с решением задач оптимизации и планируется в дальнейших работах авторов настоящего исследования.

Представляет интерес для дальнейших исследований вопрос возможности разработки регулируемого ВТСП ТОУ для повышения динамической устойчивости.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Официальный сайт ПАО «Россети». URL: https://rosseti.ru/investment/introduction_solutions/reestr_innovation/ (дата обращения 01.09.2023)
2. Результаты испытания сверхпроводящей кабельной линии с системой криогенного обеспечения / Рябин Т.В., Вишневецкий Г.В., Дубинин М.В., Кашеев А.В., Сытников В.Е. // Электроэнергия. Передача и распределение. 2019. №1 (52). С. 94-100.
3. Первое в энергосистеме России токоограничивающее устройство на основе высокотемпературной сверхпроводимости / М.Е. Мойзых, С.В. Самойленков, А.П. Вавилов, Е.С. Прохоров, А.С. Пучков, А.В. Майоров, А.В. Жуков, Р.Л. Байбеков, О.В. Токарева // Электричество. 2021. №4. С. 4-16. doi: 10.24160/0013-5380-2021-4-4-16
4. Особенности применения токоограничивающих устройств на основе высокотемпературной сверхпроводимости в электрических сетях высокого напряжения / А.С. Брилинский, Г.А. Евдокимин, И.А. Кузьмин, Н.Н. Мадгев, М.Е. Мойзых, М.А. Селькова // Электрические станции. 2019. №9(1058). С. 43-51.
5. Пат. 2691746 Российская Федерация, МПК H02N 9/02. Токоограничивающее устройство на основе высокотемпературной сверхпроводимости / Сотников Д.В., Бабуринов К.А., Мойзых М.Е., Самойленков С.В.; заявитель ЗАО «СуперОкс». №2018142077, заявл. 28.11.2021, опубл. 18.06.2019.
6. Требования к организации систем релейной защиты сети при применении токоограничивающих устройств на основе высокотемпературной сверхпроводимости для снижения уровней токов короткого замыкания / О.В. Токарева, Р.Л. Байбеков, О.С. Панин, М.В. Савватин, М.Е. Мойзых // Электроэнергетика глазами молодежи-2019: материалы юбилейной X Международной научно-технической конференции. Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2019. Т. 2. С. 160-164.
7. Наумов И.В., Журавлев С.В., Байбеков Р.Л. Особенности проектирования устройств ПЗА для высоковольтных ВТСП ТОУ сети 220 кВ в Москве // Релейщик. 2021. №1. С. 38-41.
8. Пат. 2777031 Российская Федерация, МПК H02N 3/40. Способ защиты токоограничивающего устройства на основе высокотемпературных сверхпроводников в линии высоковольтной сети без шунтирующего элемента и комплекс релейных защит для реализации способа / Устюжанин П.А., Мойзых М.Е., Магоммедов Э.Ш., Коломенцева Д.А.; заявитель ЗАО «СуперОкс». №2021123647, заявл. 09.08.2021, опубл. 01.08.2022.
9. First Russian 220 kV superconducting fault current limiter (SFCL) for application in city grid / M. Moyzykh, D. Gorbunova, P. Ustyuzhanin, D. Sotnikov, K. Baburin, A. Maklakov, E. Magomedov, A. Shumkov, A. Telnova, V. Shcherbakov, D. Kumarov, L. Sabirov, M. Medovik, A. Kadyrbayev, S. Alexandrov, I. Mikoyan, S. Samoilonkov, A. Vavilov // IEEE Transaction on Applied Superconductivity. 2021. No. 5(31). doi: 10.1109/TASC.2021.3066324
10. Enhancement of power system transient stability and power quality using superconducting fault current limiters / M.E. Almeida, C.S. Rocha, J.A. Dente, P.J. Costa Branco // 2009 International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives. IEEE, 2009. Pp. 425-430. doi: 10.1109/POWERENG.2009.4915203
11. Didier G., Leveque J., Rezzoug A. A Novel approach to determine the optimal location of SFCL in electric power grid to improve power system stability // IEEE Transactions on Power Systems. 2013. No. 28(2). Pp. 978-984. doi: 10.1109/TPWRS.2012.2224386
12. Alaraifi S., El Moursi M.S., Zeineldin H.H. Optimal allocation of HTS-FCL for power system security and stability Enhancement // IEEE Transactions on Power Systems. 2013. No. 28(4). Pp. 4701-4711. doi: 10.1109/TPWRS.2013.2273539
13. Study on a series resistive SFCL to improve power system transient stability: modeling, simulation, and experimental verification / B.C. Sung, D.K. Park, J.-W. Park, T.K. Ko // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2009. No. 56(7). Pp. 2412-2419. doi: 10.1109/TIE.2009.2018432
14. Research on resistor Type superconducting fault current limiter in power system / Y. Ye, L. Xiao, H. Wang, Z. Zhang // IEEE/PES Transmission & Distribution Conference. IEEE, 2005. Pp. 1-6. doi: 10.1109/TDC.2005.1546929
15. Analysis of reactance-type superconducting fault current limiter to the transient stability of power system with two machine system / A.H. Li, Q.L. Sun, X.H. Liu, Z.L. Yang // IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices. IEEE, 2013. Pp. 403-406. doi: 10.1109/ASEMD.2013.6780805
16. Li B., Ou Y.Z. Studies on the effect of SFCL on the transient stability of power system // IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices. IEEE, 2015. Pp. 543-544. doi: 10.1109/ASEMD.2015.7453696
17. Жданов П.С. Вопросы устойчивости электрических систем. М.: Энергия, 1979. 456 с.

Поступила в редакцию 21 сентября 2023 г.

Принята к печати 26 октября 2023 г.

INFORMATION IN ENGLISH

RESISTIVE TYPE HTS FCL INFLUENCE ON POWER SYSTEM STABILITY

Nikolay V. Aleksandrov

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Department of Power Supply of Industrial Enterprises and Agriculture, East Siberian State University of Technology and Management, Ulan-Ude, Russia, alexandrov-88@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0004-8208-4056>

Dmitry E. Shevtsov

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Department of Industrial Power Supply Systems, Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia, zagranica@list.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0792-9624>

Erkemen G. Yadagaev

Ph.D. (Engineering), Head of Repair Management Department, Chukotenergo PJSC, Anadyr, Russia, yadagaev@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0001-6298-5306>

Dmitry E. Dasheev

Ph.D. (Pedagogics), Associate Professor, Department of Power Supply of Industrial Enterprises and Agriculture, East Siberian State University of Technology and Management, Ulan-Ude, Russia, dasheevd@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0003-7732-28>

The discovery of the high-temperature superconductivity (HTS) phenomenon has created the possibility of introducing electrical devices with unique characteristics. The second generation HTS wire based on yttrium ceramics has a layered structure, in which the superconducting layer occupies a small fraction. In the load mode, the HTS wire has zero resistance, and when overcurrent occurs, the superconducting layer goes into the normal state, in which it has a high resistance. The current flowing through the wire is forced into non-superconducting layers (mainly the copper layer), which in turn can significantly limit the current due to the relatively small cross-section. On this basis, high-temperature superconducting fault current-limiting devices (FCL) of resistive type have been created. In Russia and around the world, the development of HTS FCL is actively underway, one of the largest projects has been implemented in Moscow. It is of interest to study the influence of HTS FCL on the stability of power transmission when installing the FCL near the generator. The article examines the influence of HTS FCL on stability using the example of the simplest power transmission generator - infinite power bus when installing FCL at characteristic power transmission points. A criterion for the preferred value of active resistance is proposed based on the condition of the minimum deviation of the rotor angle at the initial moment of a short circuit. Simulation modeling was carried out in the Matlab/Simulink software and computing system. The positive effect of HTS FCL on the stability of power transmission in the event of short circuits is shown. The need to solve optimization problems for selecting the optimal active resistance of the HTS FCL is noted, and the vector for further research on the topic under consideration is determined.

Keywords: HTS FCL, fault current limiting, power systems stability, power systems

REFERENCES

1. Official site of «Rosseti» PJSC. Available at: https://rosseti.ru/investment/introduction_solutions/reestr_innovatsion/ (accessed 01 September 2023) [In Russian].
2. Ryabin T.V., Vishnevskiy G.V., Dubinin M.V., Kashcheev A.V., Sytnikov V.E. Test results of superconducting cable line with helium management system. *Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie* [Electric power. Transmission and distribution], 2019, no. 1(52), pp. 94-100. (In Russian)
3. Moyzykh M.E., Samoylenkov S.V., Vavilov A.P., Prokhorov E.S., Puchkov A.S., Mayorov A.V., Zhukov A.V., Baybekov R.L., Tokareva O.V. First superconducting fault current limiter in Russian power grid. *Elektrichestvo* [Electrical engineering], 2021, no. 4, pp. 4-16. (In Russian). doi: 10.24160/0013-5380-2021-4-4-16
4. Brilinskiy A.S., Evdokunin G.A., Kuzmin I.A., Magdeev N.N., Moyzykh M.E., Selkova M.A. Specific application features of current-limiting devices based on high-temperature superconductivity in high voltage electric networks. *Elektricheskie stantsii* [Electrical stations], 2019, no. 9, pp. 43-51. (In Russian)
5. Sotnikov D.V., Baburin K.A., Moyzykh M.E., Samoylenkov S.V. *Tokoogranichivayushchee ustroystvo na osnove vysokotemperaturnoy sverkhprovodimosti* [Current-limiting device based on high-temperature superconductivity]. Patent RF, no. 2691746, 2021.
6. Tokareva O.V., Baybekov R.L., Panin O.S., Savvatina M.V., Moyzykh M.E. Requirements for the organization of relay protection systems for the network when using current-limiting devices based on high-temperature superconductivity to reduce the levels of short-circuit currents. *Elektroenergetika glazami molodezhi-2019: materialy jubileynoy X Mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii* [Materials of international science and technology conference "Power industry through the eyes of youth"]. Irkutsk, INRTU Publ., 2019, vol. 2, pp. 160-164. (In Russian)
7. Naumov I.V., Zhuravlev S.V., Baybekov R.L. Features of designing relay protection and automation devices for high-voltage HTS FCL 220 kV network in Moscow. *Relejshtik* [Protection Engineer], 2021, no.1, pp. 38-41. (In Russian)
8. Ustjuzhanin P.A., Moyzykh M.E., Magomedov Je.Sh., Kolomenceva D.A. *Sposob zashchity tokoogranichivayushhego ustroystva na osnove vysokotemperaturnykh sverkhprovodnikov v linii vysokovoltnoy seti bez shuntiruyushhego elementa i kompleks relejnykh zashhit dlya realizatsii sposoba* [A method for protecting a current-limiting device based on high-temperature superconductors in a high-voltage network line without a shunt element and a complex of relay protections for implementing the method]. Patent RF, no. 2777031, 2021.
9. Moyzykh M., Gorbunova D., Ustjuzhanin P., Sotnikov D., Baburin K., Maklakov A., Magomedov E., Shumkov A., Telnova A., Shcherbakov V., Kumarov D., Sabirov L., Medovik M., Kadyrbaev A., Alexandrov S., Mikoyan I., Samoilenskoy S., Vavilov A. First Russian 220 kV superconducting fault current limiter (SFCL) for application in city grid. *IEEE Transaction on Applied Superconductivity*, 2021, vol. 31, no. 5. doi: 10.1109/TASC.2021.3066324
10. Almeida M.E., Rocha C.S., Dente J.A., Costa Branco P.J. Enhancement of power system transient stability and power quality using superconducting fault current limiters. 2009 International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives. IEEE, 2009, pp. 425-430. doi: 10.1109/POWERENG.2009.4915203
11. Didier G., Leveque J., Rezzoug A. A Novel approach to determine the optimal location of SFCL in electric power grid to improve power system stability. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2013, no. 28(2), pp. 978-984. doi: 10.1109/TPWRS.2012.2224386
12. Alaraifi S., El Moursi M.S., Zeineldin H.H., Optimal allocation of HTS-FCL for power system security and stability Enhancement. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2013, no. 28(4), pp. 4701-4711. doi: 10.1109/TPWRS.2013.2273539
13. Sung B.C., Park D.K., Park J.-W., Ko T. K. Study on a series resistive SFCL to improve power system transient stability: modeling, simulation and experimental verification. *IEEE*

- Transactions on Industrial Electronics. 2009, no. 56(7), pp. 2412-2419. doi: 10.1109/TIE.2009.2018432
14. Ye Y., Xiao L., Wang H., Zhang Z. Research on resistor Type superconducting fault current limiter in power system. IEEE/PES Transmission & Distribution Conference. IEEE, 2005, pp. 1-6. doi: 10.1109/TDC.2005.1546929
 15. Li A.H., Sun Q.L., Liu X.H., Yang Z.L. Analysis of reactance-type superconducting fault current limiter to the transient stability of power system with two machine system. IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices. IEEE, 2013, pp. 403-406. doi: 10.1109/ASEMD.2013.6780805
 16. Li B., Ou Y.Z. Studies on the effect of SFCL on the transient stability of power system. IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices. IEEE, 2015, pp. 543-544. doi: 10.1109/ASEMD.2015.7453696
 17. Zhdanov P.S. *Voprosy ustojchivosti elektricheskikh system* [Electrical system stability issues]. Moscow, Energiya Publ., 1979. 456 p. (In Russian)
-
- Влияние высокотемпературных сверхпроводящих токоограничивающих устройств резистивного типа на устойчивость электроэнергетических систем / Н.В. Александров, Д.Е. Шевцов, Э.Г. Ядагаев, Д.Е. Дашеев // Электротехнические системы и комплексы. 2023. № 4(61). С. 38-45. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-4\(61\)-38-45](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-4(61)-38-45)
- Aleksandrov N.V., Shevtsov D.E., Yadagaev E.G., Dasheev D.E. Resistive Type Hts Fcl Influence on Power System Stability. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2023, no. 4(61), pp. 38-45. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-4\(61\)-38-45](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-4(61)-38-45)
-

Корнилов Г.П.¹, Газизова О.В.^{1,2}, Бочкарев А.А.¹, Шарафутдинов Д.М.¹, Мороз А.А.¹¹ Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова² Тюменский индустриальный университет, филиал ТИУ в Тобольске

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ АВТОНОМНОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА МАЛОЙ МОЩНОСТИ

Статья посвящена разработке и исследованию оригинальной системы возбуждения синхронных генераторов (СГ), работающих в составе автономных дизельных и бензиновых генераторных установок (ДГУ и БГУ) малой мощности. Проведен обзор и анализ существующих статических систем возбуждения, в ходе которого поставлены требования к силовой части и системе автоматического регулирования возбуждения (АРВ) проектируемого устройства. Наиболее рациональным и обоснованным при этом оказалось применение не стандартного тиристорного возбудителя, а транзисторного регулятора напряжения (ТРН), получающего питание от нерегулируемого диодного выпрямителя. Для управления ТРН и регулирования напряжения статора предложено использовать аналоговый ШИМ-контроллер с внутренним операционным усилителем. В статье подробно описан принцип построения данной системы возбуждения, приведены функциональные и структурные схемы, поясняющие особенности её работы. Разработана принципиальная электрическая схема возбудителя, в которой ТРН выполнен на мощных MOSFET-транзисторах, включенных по двухтактной схеме, а создание ШИМ и регулирование напряжения статора возложено на специализированный ШИМ-контроллер типа TL494. Изготовлен экспериментальный образец устройства, предназначенный для питания обмотки возбуждения и регулирования напряжения статора СГ с номинальным током возбуждения до 50 А. Проведены лабораторные и производственные испытания разработанной системы возбуждения СГ, которые подтвердили высокую эффективность принятого технического решения – максимальная просадка напряжения статора при номинальном токе нагрузки генератора не превышает 5 %, а динамические характеристики системы близки к оптимальным. Предложены направления для дальнейших исследований и разработок в области маломощных систем возбуждения СГ с ТРН.

Ключевые слова: системы возбуждения, автоматическое регулирование возбуждения, автономные электростанции, синхронный генератор, транзисторный регулятор напряжения, широтно-импульсная модуляция, MOSFET-транзистор

ВВЕДЕНИЕ

Значительная часть российской территории не имеет централизованного электроснабжения. В этих условиях разработка автономных источников электрической энергии является актуальной и перспективной задачей.

Для обеспечения автономного электроснабжения возможны следующие варианты:

1. Использование возобновляемых источников электроэнергии (ВИЭ) – солнечных, ветровых и др. [1-3].
2. Применение дизельных и бензогенераторных установок (ДГУ и БГУ) [4, 5].

ВИЭ при всех их достоинствах в настоящее время не могут быть основными источниками электроснабжения: во-первых, из-за тяжёлых российских климатических условий (например, Южного Урала), а во-вторых, как следствие первого, – по причине отсутствия действующих накопителей электроэнергии, способных восполнить бестоковые паузы неработающих или незагруженных ВИЭ [1, 3].

По этим причинам ДГУ и БГУ получили в РФ наибольшее распространение в качестве основных генерирующих источников для электроснабжения объектов, удалённых от энергосистемы, судовых и транспортных систем, а также в качестве источников бесперебойного питания [2].

Основные показатели качества напряжения – его величину и частоту – обеспечивают автоматический регулятор возбуждения (АРВ) синхронного генератора

(СГ) и регулятор скорости приводного двигателя. Требования к поддержанию частоты напряжения автономных источников менее строги по отношению к сетевым генераторам, но поддержание напряжения на уровне $\pm 5\%$ при изменении нагрузки в рабочем диапазоне является обязательным условием их успешной эксплуатации [6, 7].

Ниже приведён краткий обзор известных конструкций и схем возбудителей СГ и на основе их анализа разработано и подробно описано оригинальное схемотехническое исполнение АРВ СГ на современной элементной базе.

ОБЗОР СИСТЕМ ВОЗБУЖДЕНИЯ СГ

Первые генераторы работали с электромашинным вращающимся возбудителем, закрепленным на одном валу с СГ. В настоящее время их практически не осталось, на смену им пришли статические возбудители, которые по мере развития силовой электронной техники были реализованы в следующих исполнениях.

Компаундные системы возбуждения имеют несколько вариантов, один из них – с магнитным усилителем (МУ) и диодным выпрямителем (ДВ) – приведён на **рис. 1**. Снижение напряжения СГ при увеличении нагрузки автоматически компенсируется возрастанием тока возбуждения. Подобные схемы достаточно просты и надежны в эксплуатации, они широко применялись, пока не появились управляемые силовые ключи – тиристоры. Основной принцип компаундирования – формирование выходного сигнала пропорционально току нагрузки – сохранился в современных системах возбуждения, работающих преимущественно в тяжёлых условиях (экскаваторы, буровые установки и др.).

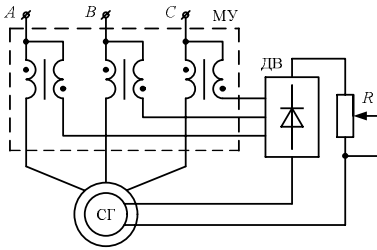


Рис. 1. Компаундная система возбуждения

Схемы с тиристорным возбудителем (ТВ) (рис. 2) – это наиболее широко распространённое исполнение для сетевых и автономных СГ большой мощности (свыше 1 МВт). В современных изделиях АРВ выполняется на базе микропроцессорной техники. Известное решение – это использование комплектных тиристорных преобразователей постоянного тока типа Simoreg с цифровым управлением.

Совершенствование конструкции самих генераторов привело к появлению бесщёточных систем возбуждения (см. рис. 3).

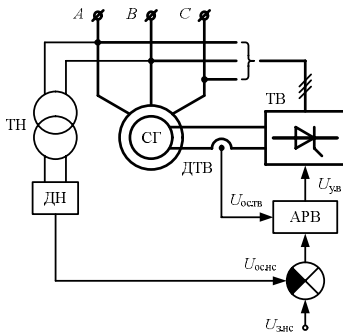


Рис. 2. Тиристорная система возбуждения

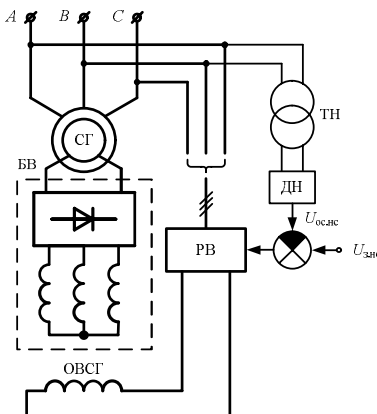


Рис. 3. Бесщёточная система возбуждения

Достоинства такой конструкции определяются, во-первых, отсутствием скользящего контакта колец и щёток, а во-вторых – значительным уменьшением тока регулируемого возбудителя (РВ), который питает расположенную на статоре СГ обмотку возбуждения (ОВСГ) бесщёточного возбудителя (БВ), который состоит из трёхфазной обмотки и мостового выпрямителя, расположенного на роторе. Напряжение, наведённое в трёхфазной роторной обмотке, преобразуется в постоянное и подаётся на обмотку возбуждения генератора. Подобные системы возбуждения используются зарубежными производителями автономных ДГУ (Stamford, Mecc Alte, Leroy Somer и др.), а также применяются в мощных сетевых генераторах.

РАЗРАБОТКА НОВОЙ КОНСТРУКЦИИ СИСТЕМЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ СГ

Основные требования, предъявляемые к разрабатываемой конструкции, сформулированы на основании действующих нормативов и государственных стандартов по обсуждаемой теме [7-9]. Выделим главные из них:

1. Система АРВ работает с генераторами мощностью до 200 кВт, напряжением до 0,4 кВ и ориентирована на поддержание постоянного напряжения статора с точностью до $\pm 5\%$ от номинального значения при изменении нагрузки в допустимых пределах.
2. Питание возбудителя универсальное – от выходных клемм статора СГ или от независимого источника.
3. Дополнительные функции возбудителя – форсировка и гашение поля – не предусмотрены.
4. Для усиления остаточного напряжения должно быть предусмотрено начальное возбуждение от аккумуляторной батареи.

Для того чтобы устройство имело небольшие габариты, достаточный уровень надёжности, а также соответствовало современным техническим требованиям в отношении быстродействия, точности регулирования и экономичности, принята схема регулятора напряжения на силовом транзисторе с ШИМ-управлением [10, 11].

Функциональная и структурная схемы, поясняющие работу устройства, приведены на рис. 4 и 5 соответственно. Рассмотрим функциональную схему системы возбуждения. Ротор СГ приводится во вращение двигателем внутреннего сгорания (ДВС) – дизельным или бензиновым. Нерегулируемый диодный выпрямитель (ДВ) получает питание от статора генератора через понижающий трансформатор (ТС), а регулирование напряжения возбуждения СГ производится транзисторным регулятором напряжения (ТРН), выполненным на MOSFET-транзисторах. Для управления ТРН используется ШИМ, формирование которой осуществляется в системе управления ТРН (СУ ТРН).

Обратная связь по напряжению статора формируется при помощи измерительного трансформатора обратной связи (ТОС) и датчика напряжения статора (ДНС).

Для начального возбуждения предусмотрен аккумулятор начального возбуждения (АНВ), напряжение с которого подаётся на вход ТРН, а также служит для питания СУ ТРН в момент запуска СГ. Когда напряжение на выходе выпрямителя превысит напряжение с АНВ, диод VD закроется, тем самым отключая АНВ от ТРН.

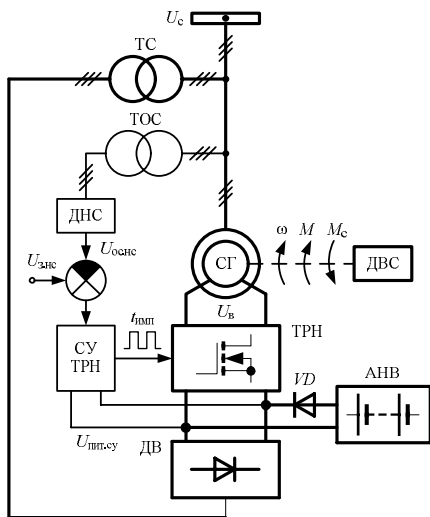


Рис. 4. Функциональная схема системы возбуждения СГ ДГУ

Далее перейдём к рассмотрению структурной схемы системы возбуждения. На элемент сравнения подаются сигналы задания напряжения статора $U_{эис}$ и обратной отрицательной связи $U_{осис}$. Ошибка регулирования $\Delta u_{ис}$ поступает на вход ПИ-регулятора напряжения статора (ПИ-РНС), выходной сигнал которого ограничивается блоком БО. Напряжение управления U_y подаётся на вход ШИМ-контроллера, на выходе которого формируются прямоугольные импульсы с длительностью $t_{имп}$. Блок ТРН ставит в соответствие определённому значению $t_{имп}$ напряжение возбуждения U_b , которое действует на выходе ТРН. Блок СГ представляет собой математическую модель синхронной машины, в которой входными воздействиями являются напряжение возбуждения U_b и скорость вращения ротора ω , возмущающим воздействием – статический ток нагрузки генератора $I_{нагр}$, а выходной координатой – напряжение статора U_c . ДНС на структурной схеме представлен в виде выпрямителя и коэффициента обратной связи по напряжению статора $K_{осис}$. Как было указано в требованиях к системе АРВ, допустимая мощность генератора, с которым она может работать, составляет 200 кВт. Ток возбуждения такого СГ находится в пределах 130 А, что следует учитывать при выборе элементов силовой части и компоновке узлов и блоков устройства.

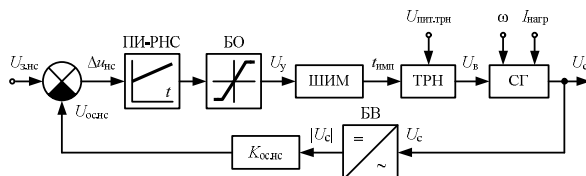


Рис. 5. Структурная схема системы возбуждения СГ ДГУ

В дальнейшем возможна реализация нескольких исполнений силовой части проектируемого АРВ СГ в зависимости от мощности генератора, например:

- 1) АРВ СГ 1-10 кВт;
- 2) АРВ СГ 10-75 кВт;
- 3) АРВ СГ 100-200 кВт.

Одна из разработанных принципиальных схем системы возбуждения СГ ДГУ, удовлетворяющая поставленным требованиям, приведена на рис. 6.

Постоянное напряжение для питания обмотки возбуждения СГ М1 получается от диодного выпрямителя (VD10-VD15), соединённого со статором генератора через понижающий трансформатор Т1.

ШИМ и ПИ-регулятор напряжения выполнены на микросхеме TL494, которая хорошо зарекомендовала себя в импульсных источниках питания различного назначения [12]. Несущая частота ШИМ задана в районе 2 кГц.

Напряжение статора задаётся потенциометром R15, а сопротивление R16 служит для установки требуемого коэффициента обратной связи по напряжению. Напряжение статора измеряется с помощью датчика напряжения, выполненного на трансформаторе TV1 и выпрямителе VD1-VD6.

Прямоугольные импульсы с ШИМ-контроллера поступают на повторители, выполненные на транзисторах VT1-VT4, управляющие силовыми транзисторами VT7-VT8, на которых реализован ТРН, регулирующий напряжение возбуждения СГ.

Аккумуляторная батарея GB1 служит для начального возбуждения генератора, напряжение с которой кратковременно подаётся на обмотку возбуждения, а также для питания системы управления, пока СГ не войдёт в режим самовозбуждения. Диод VD17 при работе генератора в режиме самовозбуждения закрыт, что не позволяет подать на ротор уже возбужденного генератора напряжение от GB1.

Стабилизатор напряжения, выполненный на транзисторах VT5 и VT6, служит для питания микросхемы IC1 и повторителей VT1-VT4.

В соответствии со структурой системы возбуждения СГ ДГУ и принципиальной электрической схемой силовой части и системы управления АРВ, изготовлен экспериментальный образец устройства (рис. 7).

Лабораторные испытания прототипа устройства проведены на кафедре электроснабжения промышленных предприятий МГТУ им. Г.И. Носова. Для испытания регулятора использовался универсальный лабораторный стенд для исследования характеристик синхронных машин (рис. 8) в составе СГ типа ГАБ4-М2 мощностью 4 кВт, приводимого во вращение асинхронным двигателем с частотным управлением. Основные технические данные СГ лабораторной установки приведены в таблице.

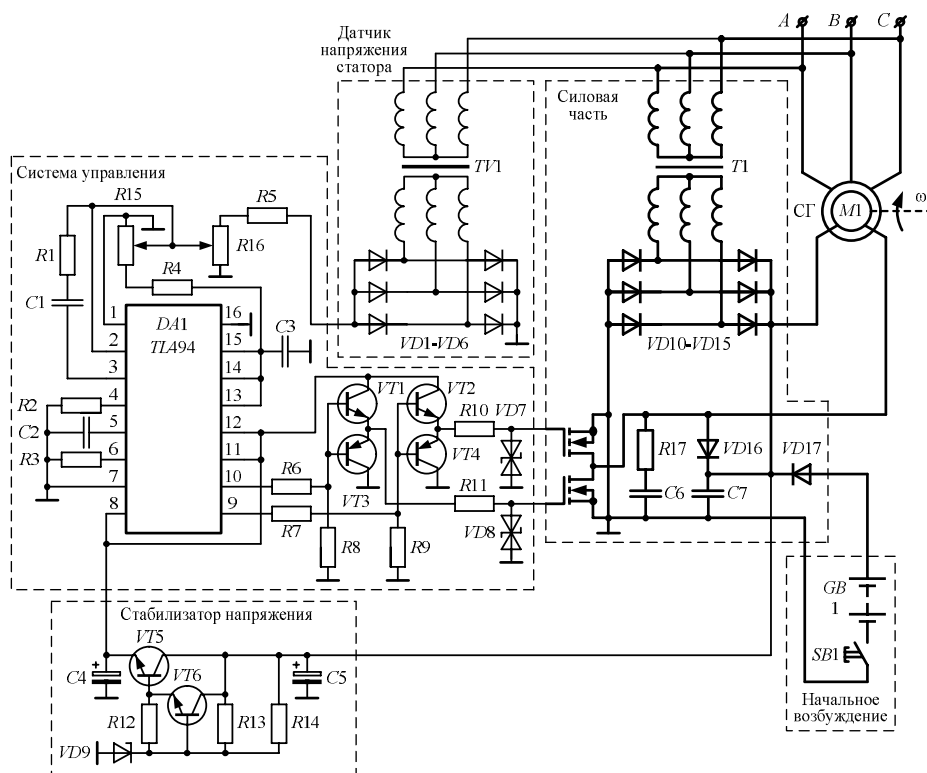


Рис. 6. Принципиальная схема системы возбуждения СГ ДГУ



Рис. 7. Фото экспериментального образца АВР СГ



Рис. 8. Фото лабораторной установки

Технические данные синхронного генератора ГАБ4-M2

Параметр	Величина
Номинальная мощность, кВт	4
Номинальное напряжение статора, В	220
Номинальный ток статора, А	12,5
Ток возбуждения холостого хода, А	4,5
Номинальный ток возбуждения, А	9,0
Номинальная частота вращения, об/мин	3000
Активное сопротивление фазы обмотки статора при температуре 25°C, Ом	0,5
Индуктивность фазы обмотки статора, мГн	42
Активное сопротивление обмотки возбуждения при температуре 25°C, Ом	1,0
Индуктивность обмотки возбуждения, мГн	213

Лабораторная установка оснащена всем необходимым измерительным и регистрирующим оборудованием, позволяющим проводить детальные исследования статических и динамических режимов работы СГ. Регистрация сигналов с датчиков на ЭВМ осуществляется при помощи аналого-цифрового преобразователя.

При лабораторном испытании регулятора рассматривалось влияние ударного приложения нагрузки к СГ на напряжение статора.

На рис. 9 показаны осциллограммы действующих значений напряжения статора, тока статора и тока возбуждения при набросе активной нагрузки в относительных единицах. В качестве базисных единиц приняты номинальные значения токов и напряжений, указанные в таблице. Как видно, напряжение статора при набросе номинальной нагрузки остается практически неизменным.

Точное же измерение напряжения статора показало, что статическая ошибка при набросе нагрузки не превышает 2%.

Производственные испытания системы возбуждения выполнены на БГУ с СГ мощностью 75 кВт, которая служит источником питания мощного агрегата воздушно-плазменной резки (50 кВт).

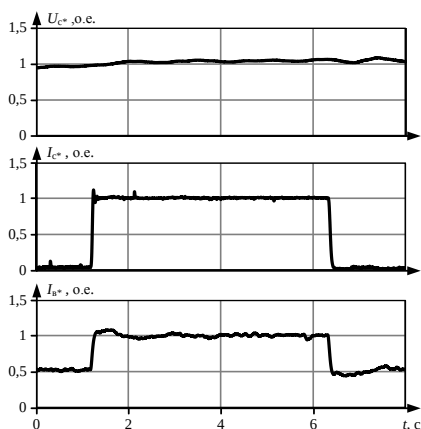


Рис. 9. Осциллограммы действующих значений напряжения статора, тока статора и тока возбуждения в относительных единицах при набросе активной нагрузки

При резке стального листа толщиной 18 мм не возникало прерываний или затухания дуги, просадка напряжения при этом находилась в пределах 5%, что вполне допустимо. Стоит также отметить, что при создании электрической дуги СГ работает с низким коэффициентом мощности (0,3-0,4), что сильнее загружает генератор по полной мощности, из-за чего повышается расход электроэнергии на возбуждение машины.

Результаты лабораторных и производственных испытаний разработанной системы возбуждения в целом можно назвать положительными.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлен экспериментально проверенный действующий образец транзисторной системы возбуждения автономного СГ малой мощности. Конструкция предлагаемой системы возбуждения является достаточно универсальной: она может быть использована для щеточных и бесщеточных СГ, а также в качестве дополнительного регулятора напряжения в компандных системах возбуждения мощных генераторов (до 3 МВт) [11].

Лабораторные и производственные испытания устройства подтвердили устойчивый характер протекания переходных процессов при основном возмущающем воздействии – ударном приложении нагрузки.

Разработанная конструкция системы возбуждения полностью отвечает основным требованиям, предъявляемым к подобным устройствам.

В дальнейшем особый интерес представляет исследование бестрансформаторных систем возбуждения с ПРН, выполненных на силовых IGBT-транзисторах. Такое решение позволит исключить наиболее дорогостоящий элемент разработанного устройства – понижающий силовой трансформатор, а также существенно улучшить его энергетические и регулировочные характеристики.

Список источников

1. Фортов В.Е., Попель О.С. Состояние развития возобновляемых источников энергии в мире и в России // Теплоэнергетика. 2014. № 6. С. 4-13. doi: 10.1134/S0040363614060022
2. Суслов К.В. Развитие систем электроснабжения изолированных территорий России с использованием возобновляемых источников энергии // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2017. Т. 21. № 5(124). С. 131-142. doi: 10.21285/1814-3520-2017-5-131-142
3. Анализ факторов, сдерживающих развитие возобновляемых источников энергии в России / Я.Ю. Малькова, Р.А. Уфа, И.А. Разживин, А.В. Кивец // Энергия единой сети. 2019. № 1(43). С. 49-56.
4. Хватов О.С., Дарьенков А.Б., Самоячев И.С. Электростанции автономных объектов на базе дизель-генераторных установок переменной частоты вращения // Актуальные проблемы электроэнергетики: сборник статей Всероссийской научно-технической конференции. Нижний Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2015. С. 62-68.
5. Хватов О.С., Кобяков Д.С. Повышение эффективности дизель-генераторной электростанции // Электротехника. 2020. № 12. С. 25-31.
6. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы

- качества электрической энергии в системах электро-снабжения общего назначения. М.: Стандартинформ, 2014. 19 с.
7. ГОСТ Р 53987-2010. Электроагрегаты генераторные переменного тока с приводом от двигателя внутреннего сгорания. Применение, технические характеристики и параметры. М.: Стандартинформ, 2012. 20 с.
 8. ГОСТ 21558-2018. Системы возбуждения турбогенераторов, гидрогенераторов и синхронных компенсаторов. Общие технические условия. М.: Стандартинформ, 2019. 26 с.
 9. ГОСТ 20375-2014. Установки электрогенераторные с двигателями внутреннего сгорания. Термины и опреде-

ления. М.: Стандартинформ, 2015. 19 с.

10. Илюшин П.В., Перевалов К.В. О системах автоматического регулирования возбуждения генерирующих установок объектов распределенной генерации // Релейная защита и автоматизация. 2016. № 4(25). С. 23-27.
11. Моделирование процессов в судовом синхронном генераторе с системой компаундирования / Н.Ф. Джагаров, М.Б. Бонев, Ж.Г. Гроздев, Т.П. Лазаров, Ю.В. Джагарова // Электротехнические системы и комплексы. 2015. №3(28). С. 30-36.
12. Switch Mode Pulse Width Modulation Control Circuit TL494 (datasheet). URL: <https://www.ti.com/lit/gpn/tl494> (дата обращения 25.09.2023).

Поступила в редакцию 06 октября 2023 г.

Принята к печати 31 октября 2023 г.

INFORMATION IN ENGLISH

DEVELOPMENT OF EXCITATION SYSTEM FOR A LOW-POWER AUTONOMOUS SYNCHRONOUS GENERATOR

Gennadiy P. Kornilov

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

Olga V. Gazizova

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Department of Industrial Power Supply, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, Tobolsk Industrial Institute, Tobolsk Branch of the Industrial University of Tyumen, Tobolsk, Russia, logan_b_7@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9416-672X>

Aleksey A. Bochkarev

Student, Department of Industrial Power Supply, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, analogsynth@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8834-2384>

Danil M. Sharafutdinov

Undergraduate Student, Department of Metal Forming Machines and Technologies and Mechanical Engineering, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, danil.sharafutdinov2017@yandex.ru

Aleksandr A. Moroz

Undergraduate Student, Department of Industrial Power Supply, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, moroz.alexanderm2016@yandex.ru

The article is devoted to the development and research of an original excitation system for synchronous generators (SG) operating as a part of low-power autonomous diesel and gasoline generator units (DGU and GGU). A review and analysis of existing static excitation systems was carried out, during which requirements were set for the power unit and the excitation automatic control system (EACS) of the designed device. In this case, the most rational and justified solution was the use not of a standard thyristor DC exciter, but of a transistor voltage controller (TVC), receiving power from an unregulated diode rectifier. To control the TVC and regulate the stator voltage, it is proposed to use an analog PWM controller with an internal operational amplifier. The article describes in detail the principle of constructing this excitation system; functional and structural diagrams are given to explain the features of its operation. A schematic electrical circuit of the exciter has been developed, in which the TVR is based on powerful MOSFET transistors connected in a push-pull circuit. Forming of PWM and control of the stator voltage is entrusted to a specialized TL494 PWM controller. An experimental sample of the device was manufactured, intended for powering the excitation winding and regulating the stator voltage of the SG with a rated excitation current of up to 50 A. Laboratory and industrial tests of the developed excitation system were carried out, which confirmed the high efficiency of the adopted technical solution, in particular, maximum stator voltage drop at the rated load current of the

generator does not exceed 5%, and the dynamic characteristics of the system are close to optimal. Directions for further research and development in the field of low-power SG excitation systems with TVC are proposed.

Keywords: excitation systems, automatic excitation control, autonomous power plants, synchronous generator, transistor voltage regulator, pulse width modulation, MOSFET transistor

REFERENCES

1. Fortov V.E., Popel O.S. State of Development of Renewable Energy in the World and in Russia. *Teploenergetika* [Thermal engineering], 2014, no. 6, pp. 4-13. doi: 10.1134/S0040363614060022. (In Russian)
2. Suslov K.V. Development of Power Supply Systems of Russian Isolated Territories Using Renewable Energy Sources. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2017, vol. 21, no. 5(124), pp. 131-142. doi: 10.21285/1814-3520-2017-5-131-142. (In Russian)
3. Malkova Ya.Yu., Ufa R.A., Razzhivin I.A., Kievets A.V. Analysis of Factors Constraining the Development of Renewable Energy in Russia. *Energiya edinoy seti* [Energy of Unified Grid, Scientific and Technical Journal], 2019, no. 1(43), pp. 49-56. (In Russian)
4. Khvatov O.S., Daryenkov A.B., Samoyavchev I.S. Power Plants of Autonomous Objects Based on Diesel Generator

- Sets of Variable Speed. *Aktualnye problem elektroenergetiki: Sbornik statey Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Collection of scientific papers of All-Russian Scientific and Technical Conference "Current problems of electric power engineering"]. Nizhny Novgorod, NNSTU Publ., 2015. pp. 62-68. (In Russian)
5. Khvatov, O.S., Kobayakov D.S. Increasing the Efficiency of a Diesel Power Plant. *Elektrotehnika* [Russian Electrical Engineering], 2020, no. 12, pp. 25-31. (In Russian)
 6. GOST 32144-2013. Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality limits in the public power supply systems. Moscow, Standartinform Publ., 2014. 19 p. (In Russian)
 7. GOST R 53987-2010. Reciprocating internal combustion engine driven alternating current generating sets. Part 1. Application, ratings and performance. Moscow, Standartinform Publ., 2012. 20 p. (In Russian)
 8. GOST 21558-2018. Excitation systems for turbogenerators, hydrogenerators and synchronous compensators. General specifications. Moscow, Standartinform Publ., 2019. 26 p. (In Russian)
 9. GOST 20375-2014. Electric generating sets with internal combustion engines. Terms and definitions. Moscow, Standartinform Publ., 2015. 19 p. (In Russian)
 10. Ilyushin P.V., Perevalov K.V. An Automatic Voltage Regulation for Distributed Generation. *Releynaya zashchita i avtomatizatsiya* [Advancement of Relay Protection, Automation and Control in Electric Power Engineering], 2016, no. 4(25), pp. 23-27. (In Russian)
 11. Djagarov N.F., Bonev M.B., Grozdev Z.G., Lazarov T.P., Djagarova J.V. Processes Simulation in Ship Synchronous Generator with Compound System. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2015, no. 3(28), pp. 30-36. (In Russian)
 12. Switch Mode Pulse Width Modulation Control Circuit TL494 (datasheet). Available at: <https://www.ti.com/lit/gpn/tl494> (accessed 25 September 2023)
- Разработка системы возбуждения автономного синхронного генератора малой мощности / Г.П. Корнилов, О.В. Газизова, А.А. Бочкарев, Д.М. Шарафутдинов, А.А. Мороз // Электротехнические системы и комплексы. 2023. № 4(61). С. 46-52. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-4\(61\)-46-52](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-4(61)-46-52)
- Kornilov G.P., Gazizova O.V., Bochkarev A.A., Sharafutdinov D.M., Moroz A.A. Development of Excitation System for a Low-Power Autonomous Synchronous Generator. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2023, no. 4(61), pp. 46-52. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-4\(61\)-46-52](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-4(61)-46-52)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОБОБЩЕННОЙ ТРЕХСТЕПЕННОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ

Современное развитие компонентной базы позволяет реализовывать на практике и использовать в прецизионных устройствах сравнительно новые типы электрических машин, ротор которых имеет относительно статора не одну, а три степени свободы. Такие машины, как и классические, могут быть различных типов (синхронные, асинхронные, вентильные), иметь различные конструктивные особенности, ключевым образом влияющие на их функционирование. Процесс вывода математических моделей трехстепенных электрических машин, как правило, основан на уравнении Лагранжа второго рода, одинаково применимым как к электродинамическим, так и к механическим явлениям, что позволяет систематизировать вывод уравнений. При этом сам процесс вывода уравнений остается достаточно трудоемким, что обусловлено большим количеством обобщенных координат (и скоростей), характеризующих функционирование такой машины. При этом сами математические модели достаточно сложны, так как движение ротора по любой из трех осей оказывает существенное влияние на его движение по остальным двум осям. В настоящее время получены математические модели основных типов трехстепенных электрических машин, а также (по аналогии с классическими электрическими машинами) введено понятие и получены уравнения движения обобщенной трехстепенной электрической машины с взаимно подвижными обмотками статора и ротора. Поэтому с точки зрения развития теории электромеханики представляет интерес получение на основе математической модели обобщенной трехстепенной электрической машины математических моделей для некоторых типов таких машин. Кроме того, это позволяет без больших затрат получать математическое описание для любых типов трехстепенных электрических машин с учетом их конструктивных особенностей и режимов функционирования.

Ключевые слова: электрическая машина, ротор, статор, обмотка, индуктивность, напряжение, ток, потокоцепление, электромагнитный момент

ВВЕДЕНИЕ

В ряде современных приборов и устройств представляется целесообразным использование электрических машин, ротор которых имеет относительно статора не одну, а три степени свободы – трехстепенные электрические машины (ТЭМ) [1–4]. Наибольшее распространение получили следующие типы ТЭМ: синхронные с радиально намагниченным ротором (РНР), синхронные с аксиально намагниченным ротором (АНР) и асинхронные. Математические модели указанных типов ТЭМ могут быть получены различными способами, например, методом Лагранжа, одинаково применимым как к электродинамическим, так и к механическим процессам, присущим ТЭМ [5, 6]. Однако, по аналогии с классическими электрическими машинами [7, 8], можно получить математические описания всех типов ТЭМ исходя из математической модели обобщенной ТЭМ [9], что в ряде случаев значительно упрощает процесс получения уравнений движения.

Модель обобщенной ТЭМ

Обобщенная ТЭМ (рис. 1) представляет из себя статор 1, на котором размещены пять обмоток: обмотка A (позиция 2 на рис. 1), магнитная ось которой X_s (рис. 2) совпадает с продольной осью статора (здесь принято допущение, что магнитная ось любой из обмоток совпадает с ее геометрической осью); пара обмоток B и C (позиции 3 и 4 на рис. 1), оси которых Y_s и Z_s перпендикулярны друг другу и продольной оси статора; пара обмоток D и E (позиции 5 и 6 на рис. 1), оси

которых U_s и V_s перпендикулярны друг другу и продольной оси статора, причем повернуты вокруг этой оси на угол γ относительно осей обмоток B и C . Отметим, что хотя необходимую конфигурацию магнитного поля в воздушном зазоре можно обеспечить только с помощью трех обмоток A , B и C путем подачи на них напряжений негармонического вида, однако пара обмоток D и E позволяет более просто моделировать некоторые типы ТЭМ, в обмотках которых текут синусоидальные и постоянные токи.

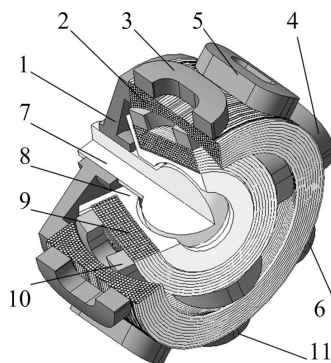


Рис. 1. Физическая модель обобщенной ТЭМ:
1 – статор; 2, 3, 4, 5 и 6 – статорные обмотки A , B , C , D , E соответственно; 7 – подвес; 8 – ротор;
9, 10 и 11 – роторные обмотки a , b и c соответственно

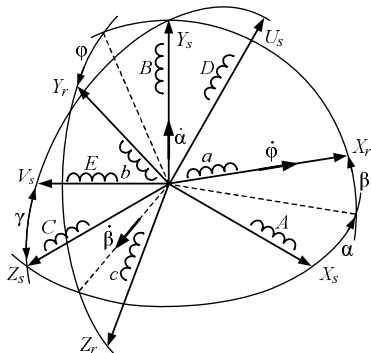


Рис. 2. Системы координат обобщенной ТЭМ

Также на статоре обобщенной ТЭМ размещен вес (шарнир) 7, обеспечивающий ротору 8 три степени свободы. На роторе расположены три обмотки: обмотка *a* (позиция 9 на рис. 1), магнитная ось которой X_r совпадает с продольной осью ротора, и обмотки *b* и *c* (позиции 3 и 4 на рис. 1), оси которых Y_r и Z_r перпендикулярны друг другу и продольной оси ротора. Положение ротора относительно статора задается тремя углами α , β и ϕ .

Математическая модель такой обобщенной ТЭМ приведена в работе [9] и позволяет получить математические модели любой реальной ТЭМ.

$$J\ddot{\alpha}\cos\beta^2 - J\dot{\alpha}\dot{\beta}\sin 2\beta + H\dot{\beta}\cos\beta +$$

$$+ J_x (\ddot{\phi}\sin\beta + \dot{\alpha}\dot{\beta}\sin^2\beta + \dot{\alpha}\dot{\beta}\sin 2\beta) +$$

$$+ \sum [i_k i_k M_{Kk} f_{Kk}^a(\alpha, \beta, \phi)] = M_a;$$

$$K = A, C, D, E; k = a, b, c;$$

$$J\ddot{\beta} - H\dot{\alpha}\cos\beta - J_x \dot{\alpha}^2 \cos\beta\sin\beta +$$

$$+ J\dot{\alpha}^2 \cos\beta\sin\beta +$$

$$+ \sum [i_k i_k M_{Kk} f_{Kk}^b(\alpha, \beta, \phi)] = M_\beta;$$

$$K = A, B, C, D, E; k = a, b, c;$$

$$J_x (\ddot{\phi} + \dot{\alpha}\sin\beta + \dot{\alpha}\dot{\beta}\cos\beta) + q\ddot{\phi} +$$

$$+ \sum [i_k i_k M_{Kk} f_{Kk}^c(\alpha, \beta, \phi)] = M_\phi;$$

$$K = A, B, C, D, E; k = b, c;$$

$$L_K \frac{di_K}{dt} + \sum \left[M_{KN} \frac{di_K}{dt} f_{KN}^i(\alpha, \beta, \phi) \right] +$$

$$+ \sum \left[M_{Kk} \frac{di_k}{dt} f_{Kk}^i(\alpha, \beta, \phi) \right] +$$

$$+ \sum [M_{Kk} i_k \dot{\phi} f_{Kk}^M(\alpha, \beta, \phi)] + R_K i_K = u_K;$$

$$K = A, B, C, D, E; N = A, B, C, D, E; K \neq N \text{ и } K \not\subset N;$$

$$k = a, b, c; \dot{\phi} = \dot{\alpha}, \dot{\beta}, \dot{\phi};$$

$$L_k \frac{di_k}{dt} + \sum \left[M_{Kk} \frac{di_K}{dt} f_{Kk}^i(\alpha, \beta, \phi) \right] +$$

$$+ \sum [M_{Kk} i_K \dot{\phi} f_{Kk}^M(\alpha, \beta, \phi)] + R_K i_k = u_k;$$

$$K = A, B, C, D, E; k = a, b, c; \dot{\phi} = \dot{\alpha}, \dot{\beta}, \dot{\phi},$$

где J_r и J – соответственно полярный и экваториальный моменты инерции ротора; $H = J_x \dot{\phi}$ – кинетический момент; q – коэффициент вязкого трения при вращении ротора относительно его собственной оси (аналогичными коэффициентами относительно двух других осей пренебрегаем в виду их малости); M_ϕ , $\phi = \alpha, \beta, \phi$ – внешние механические моменты, действующие по соответствующим осям подвеса ротора; L_K , R_K , i_K , u_K и L_k , R_k , i_k , u_k – соответственно собственная индуктивность, активное сопротивление, ток, напряжение статорных и роторных обмоток; M_{KN} и M_{Kk} – взаимные индуктивности между соответствующими обмотками; $f_{Kk}^a(\alpha, \beta, \phi)$, $\phi = \alpha, \beta, \phi$, $f_{Kk}^b(\alpha, \beta, \phi)$, $f_{Kk}^c(\alpha, \beta, \phi)$ – сложные тригонометрические функции соответствующих углов.

Отметим, что первые три уравнения описывают механическое движение ротора обобщенной ТЭМ. Причем слагаемые этих уравнений, зависящие от моментов инерции, остаются неизменными для любого типа ТЭМ. Поэтому в дальнейшем введем их следующее обозначение: m_ϕ^j , $\phi = \alpha, \beta, \phi$. Четвертое и пятое уравнения, соответственно, являются уравнениями электрического равновесия каждой из статорных и роторных обмоток.

МОДЕЛЬ АСИНХРОННОЙ ТЭМ

Принципиальная кинематическая схема асинхронной ТЭМ и соответствующая ей система координат представлены на рис. 3 и 4. У такой ТЭМ на статоре отсутствуют обмотки *D* и *E*, а на роторе отсутствует обмотка *a*. Кроме того, роторные обмотки *b* и *c* являются короткозамкнутыми, то есть не подключаются к источнику питания.

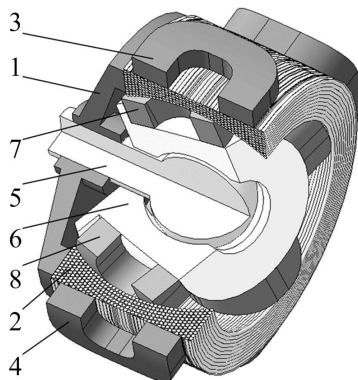


Рис. 3. Физическая модель асинхронной ТЭМ: 1 – статор; 2, 3 и 4 – статорные обмотки *A*, *B*, и *C* соответственно; 5 – подвес; 6 – ротор; 7 и 8 – роторные обмотки *b* и *c* соответственно

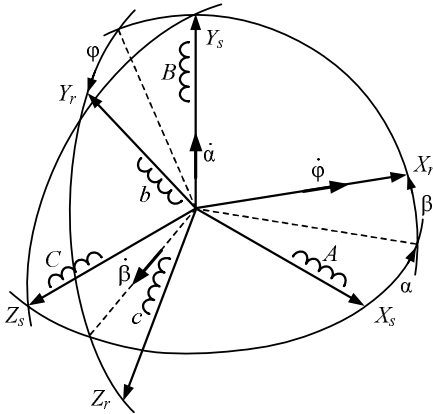


Рис. 4. Системы координат асинхронной ТЭМ

Исключая из модели обобщенной ТЭМ соответствующие собственные и взаимные индуктивности обмоток, получим следующее математическое описание асинхронной ТЭМ:

$$m_{\alpha}^J - i_{A_b} i_{M_{pr}} (\sin \alpha \sin \beta \cos \varphi + \cos \alpha \sin \varphi) + \\ + i_{A_c} i_{M_{pr}} (\sin \alpha \sin \beta \sin \varphi - \cos \alpha \cos \varphi) + \\ + i_{C_b} i_{M_{rs}} (\sin \alpha \sin \varphi - \cos \alpha \sin \beta \cos \varphi) + \\ + i_{C_c} i_{M_{rs}} (\sin \alpha \cos \varphi + \cos \alpha \sin \beta \sin \varphi) = M_{\alpha};$$

$$m_{\beta}^J + i_{A_b} i_{M_{pr}} \cos \alpha \cos \beta \cos \varphi - \\ - i_{A_c} i_{M_{pr}} \cos \alpha \cos \beta \sin \varphi + \\ + i_{B_b} i_{M_{rs}} \sin \beta \cos \varphi - i_{B_c} i_{M_{rs}} \sin \beta \sin \varphi - \\ - i_{C_b} i_{M_{rs}} \sin \alpha \cos \beta \cos \varphi + \\ + i_{C_c} i_{M_{rs}} \sin \alpha \cos \beta \sin \varphi = M_{\beta};$$

$$m_{\varphi}^J - i_{A_b} i_{M_{pr}} (\cos \alpha \sin \beta \sin \varphi + \sin \alpha \cos \varphi) + \\ + i_{A_c} i_{M_{pr}} (\sin \alpha \sin \varphi - \cos \alpha \sin \beta \cos \varphi) + \\ + i_{B_b} i_{M_{rs}} \cos \beta \sin \varphi + i_{B_c} i_{M_{rs}} \cos \beta \cos \varphi + \\ + i_{C_b} i_{M_{rs}} (\sin \alpha \sin \beta \sin \varphi - \cos \alpha \cos \varphi) + \\ + i_{C_c} i_{M_{rs}} (\cos \alpha \sin \varphi + \sin \alpha \sin \beta \cos \varphi) = M_{\varphi};$$

$$L_A \frac{di_A}{dt} + M_{pr} \frac{di_b}{dt} (\sin \alpha \sin \varphi - \cos \alpha \sin \beta \cos \varphi) + \\ + M_{pr} i_b [\dot{\alpha} (\sin \alpha \sin \beta \cos \varphi + \cos \alpha \sin \varphi) - \\ - \dot{\beta} \cos \alpha \cos \beta \cos \varphi + \dot{\varphi} (\cos \alpha \sin \beta \sin \varphi + \\ + \sin \alpha \cos \varphi)] + M_{pr} \frac{di_c}{dt} (\sin \alpha \cos \varphi + \\ + \cos \alpha \sin \beta \sin \varphi) + M_{pr} i_c [\dot{\alpha} (\cos \alpha \cos \varphi - \\ - \sin \alpha \sin \beta \sin \varphi) + \dot{\beta} \cos \alpha \cos \beta \sin \varphi + \\ + \dot{\varphi} (\cos \alpha \sin \beta \cos \varphi - \sin \alpha \sin \varphi)] + R_A i_A = u_A;$$

$$L_s \frac{di_B}{dt} + M_{rs} \frac{di_b}{dt} \cos \beta \cos \varphi - \\ - M_{rs} i_b (\dot{\beta} \sin \beta \cos \varphi + \dot{\varphi} \cos \beta \sin \varphi) - \\ - M_{rs} \frac{di_c}{dt} \cos \beta \sin \varphi + M_{rs} i_c \times \\ \times (\dot{\beta} \sin \beta \sin \varphi - \dot{\varphi} \cos \beta \cos \varphi) + R_s i_B = u_B; \\ L_s \frac{di_C}{dt} + M_{rs} \frac{di_b}{dt} (\sin \alpha \sin \beta \cos \varphi + \cos \alpha \sin \varphi) + \\ + M_{rs} i_b [\dot{\alpha} (\cos \alpha \sin \beta \cos \varphi - \sin \alpha \sin \varphi) + \\ + \dot{\beta} \sin \alpha \cos \beta \cos \varphi + \dot{\varphi} (\cos \alpha \cos \varphi - \\ - \sin \alpha \sin \beta \sin \varphi)] + M_{rs} \frac{di_c}{dt} (\cos \alpha \cos \varphi - \\ - \sin \alpha \sin \beta \sin \varphi) - M_{rs} i_c [\dot{\alpha} (\sin \alpha \cos \varphi + \\ + \cos \alpha \sin \beta \sin \varphi) + \dot{\beta} \sin \alpha \cos \beta \sin \varphi + \\ + \dot{\varphi} (\cos \alpha \sin \varphi + \sin \alpha \sin \beta \cos \varphi)] + R_s i_C = u_C; \\ L_r \frac{di_b}{dt} + M_{pr} \frac{di_A}{dt} (\sin \alpha \sin \varphi - \cos \alpha \sin \beta \cos \varphi) + \\ + M_{pr} i_A [\dot{\alpha} (\sin \alpha \sin \beta \cos \varphi + \cos \alpha \sin \varphi) - \\ - \dot{\beta} \cos \alpha \cos \beta \cos \varphi + \dot{\varphi} (\cos \alpha \sin \beta \sin \varphi + \\ + \sin \alpha \cos \varphi)] + M_{rs} \frac{di_B}{dt} \cos \beta \cos \varphi - M_{rs} i_B \times \\ \times (\dot{\beta} \sin \beta \cos \varphi - \dot{\varphi} \cos \beta \sin \varphi) + M_{rs} \frac{di_C}{dt} \times \\ \times (\sin \alpha \sin \beta \cos \varphi + \cos \alpha \sin \varphi) + \\ + M_{rs} i_C [\dot{\alpha} (\cos \alpha \sin \beta \cos \varphi - \sin \alpha \sin \varphi) + \\ + \dot{\beta} \sin \alpha \cos \beta \cos \varphi + \dot{\varphi} (\cos \alpha \cos \varphi - \\ - \sin \alpha \sin \beta \sin \varphi)] + R_r i_b = 0; \\ L_r \frac{di_c}{dt} + M_{pr} \frac{di_A}{dt} (\sin \alpha \cos \varphi + \cos \alpha \sin \beta \sin \varphi) + \\ + M_{pr} i_A [\dot{\alpha} (\cos \alpha \cos \varphi - \sin \alpha \sin \beta \sin \varphi) + \\ + \dot{\beta} \cos \alpha \cos \beta \sin \varphi + \dot{\varphi} (\cos \alpha \sin \beta \cos \varphi - \\ - \sin \alpha \sin \varphi)] - M_{rs} \frac{di_B}{dt} \cos \beta \sin \varphi + M_{rs} i_B \times \\ \times (\dot{\beta} \sin \beta \sin \varphi - \dot{\varphi} \cos \beta \cos \varphi) + M_{rs} \frac{di_C}{dt} \times \\ \times (\cos \alpha \cos \varphi - \sin \alpha \sin \beta \sin \varphi) - M_{rs} i_C \times \\ \times [\dot{\alpha} (\sin \alpha \cos \varphi + \cos \alpha \sin \beta \sin \varphi) + \dot{\beta} \sin \alpha \times \\ \times \cos \beta \sin \varphi + \dot{\varphi} (\cos \alpha \sin \varphi + \sin \alpha \sin \beta \cos \varphi)] + \\ + R_r i_c = 0,$$

где, исходя из идентичности обмоток B и C, а также обмоток b и c, $L_s = L_B = L_C$ и $L_r = L_b = L_c$ – соответственно индуктивность обмоток статора и ротора;

$M_{rs} = M_{bb} = M_{bB} = M_{Cc} = M_{cC} = M_{Cb} = M_{bC} = M_{Bc} = M_{cB}$;
 $M_{pr} = M_{Ab} = M_{bA} = M_{Ac} = M_{cA}$ – амплитудные значения взаимной индуктивности соответствующих обмоток;
 $R_s = R_B = R_C$ и $R_r = R_b = R_c$ – соответственно сопротивление обмоток статора и ротора.

Приведенная математическая модель ТЭМ асинхронного типа полностью совпадает с моделью, приведенной в работе [10] и полученной на основе уравнения Лагранжа.

Модель ТЭМ с РАДИАЛЬНО-НАМАГНИЧЕННЫМ РОТОРОМ

Принципиальная кинематическая схема ТЭМ с радиально-намагнитным ротором (РНР) и соответствующая ей система координат представлены на рис. 5 и 6.

У такой ТЭМ на статоре отсутствуют обмотки D и E, а на роторе вместо обмоток расположен постоянный магнит, намагниченный в радиальном направлении. Таким образом, для данной машины положение ротора характеризуется положением вектора магнитной индукции $\vec{B}_r$. Этот вектор создается одной из роторных обмоток ОЭМ при питании этой обмотки постоянным током. Будем считать, что он направлен по оси Z_r , то есть создается током i_c .

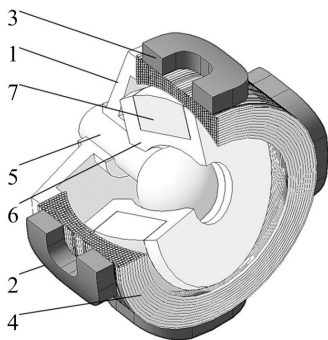


Рис. 5. Физическая модель ТЭМ с РНР:
 1 – статор; 2, 3 и 4 – статорные обмотки A, B, и C соответственно; 5 – подвес; 6 – ротор; 7 – радиально намагнитченный магнит

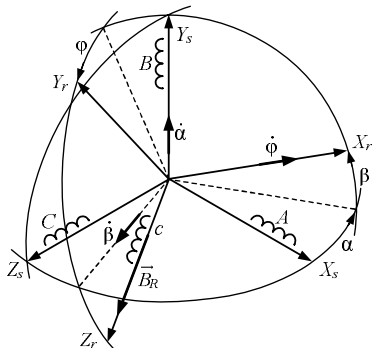


Рис. 6. Системы координат ТЭМ с РНР

Исключая из модели обобщенной ТЭМ соответствующие собственные и взаимные индуктивности обмоток, получим следующие уравнения движения ТЭМ с РНР:

$$m_a^j + i_A \Psi_{pr} (\sin \alpha \sin \beta \sin \varphi - \cos \alpha \cos \varphi) + \\ + i_C \Psi_{rs} (\sin \alpha \cos \varphi + \cos \alpha \sin \beta \sin \varphi) = M_a;$$

$$m_b^j - i_A \Psi_{pr} \cos \alpha \cos \beta \sin \varphi - i_B \Psi_{rs} \sin \beta \sin \varphi + \\ + i_C \Psi_{rs} \sin \alpha \cos \beta \sin \varphi = M_b;$$

$$m_\varphi^j + i_A \Psi_{pr} (\sin \alpha \sin \varphi - \cos \alpha \sin \beta \cos \varphi) + \\ + i_B \Psi_{rs} \cos \beta \cos \varphi + \\ + i_C \Psi_{rs} (\cos \alpha \sin \varphi + \sin \alpha \sin \beta \cos \varphi) = M_\varphi;$$

$$L_A \frac{di_A}{dt} + \Psi_{pr} [\dot{\alpha} (\cos \alpha \cos \varphi - \sin \alpha \sin \beta \sin \varphi) + \\ + \dot{\beta} \cos \alpha \cos \beta \sin \varphi + \\ + \dot{\varphi} (\cos \alpha \sin \beta \cos \varphi - \sin \alpha \sin \varphi)] + R_A i_A = u_A;$$

$$L_s \frac{di_B}{dt} + \Psi_{rs} [\dot{\beta} \sin \beta \sin \varphi - \dot{\varphi} \cos \beta \cos \varphi] + \\ + R_s i_B = u_B;$$

$$L_s \frac{di_c}{dt} - \Psi_{rs} [\dot{\alpha} (\sin \alpha \cos \varphi + \cos \alpha \sin \beta \sin \varphi) + \\ + \dot{\beta} \sin \alpha \cos \beta \sin \varphi + \\ + \dot{\varphi} (\cos \alpha \sin \varphi + \sin \alpha \sin \beta \cos \varphi)] + R_s i_c = u_c,$$

где $\Psi_{pr} = M_{pr} i_c = B_r S_K W_K$, $K = A$; $\Psi_{rs} = M_{rs} i_c = B_r S_K W_K$, $K = B, C$; B_r, S_K, W_K – соответственно индукция, площадь и число витков K-й обмотки.

Полученная математическая модель ТЭМ с РНР, полностью совпадает с моделью, приведенной в работе [11].

МОДЕЛЬ ТЭМ с АКСИАЛЬНО-НАМАГНИЧЕННЫМ РОТОРОМ

Принципиальная кинематическая схема ТЭМ с аксиально-намагнитным ротором (АНР) и соответствующая ей система координат представлены на рис. 7 и 8.

У такой ТЭМ на статоре отсутствует обмотка A, а на роторе вместо обмоток расположены два постоянных магнита, один из которых намагничен в радиальном направлении, а другой в аксиальном (осевом) направлении. Для данной машины (по аналогии ТЭМ с РНР) положение ротора характеризуется положением вектора магнитной индукции $\vec{B}_r$. Этот вектор создается одной из роторных обмоток ОЭМ при питании этой обмотки постоянным током. Будем считать, что он направлен по оси Z_r (создается током i_c). Аксиально намагнитченная часть ротора характеризуется вектором магнитной индукции $\vec{B}_a$, который имитируется роторной обмоткой a обобщенной ТЭМ при протекании по ней постоянного тока i_a .

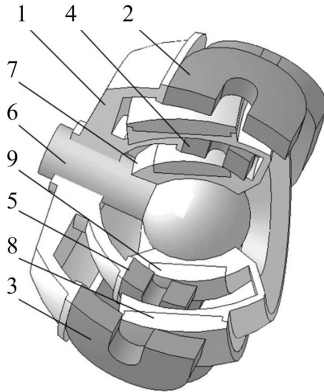


Рис. 7. Физическая модель ТЭМ с АНР:

1 – статор; 2 и 3 – статорные обмотки В и С прецессии; 4 и 5 – статорные обмотки D и E вращения; 6 – подвес; 7 – ротор; 8 – аксиально намагниченная часть ротора; 9 – радиально намагниченная часть ротора

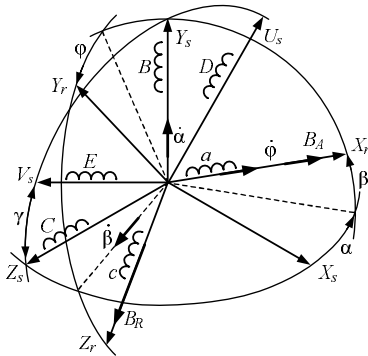


Рис. 8. Системы координат ТЭМ с АНР

Здесь необходимо учесть взаимодействие между собой статорных обмоток вращения и прецессии. Это взаимодействие определяется конструкцией ТЭМ, поэтому наиболее просто учесть его через соответствующие конструктивные коэффициенты: k_1 , который учитывает взаимодействие радиально намагниченной части ротора с обмотками прецессии, и k_2 , который учитывает взаимодействие аксиально намагниченной части ротора с обмотками вращения.

В итоге получим:

$$\begin{aligned} m'_\alpha + i_c \Psi_{pr} \cos \alpha \cos \beta + i_c k_1 \Psi_{rs} (\sin \alpha \cos \varphi + \\ + \cos \alpha \sin \beta \sin \varphi) + i_D [k_2 \Psi_{pr} \cos \alpha \cos \beta \sin \gamma + \\ + \Psi_{rs} (\cos \alpha \sin \beta \sin \varphi \cdot \sin \gamma + \sin \alpha \cos \varphi \sin \gamma)] + \\ + i_E [k_2 \Psi_{pr} \cos \alpha \cos \beta \cos \gamma + \\ + \Psi_{rs} (\sin \alpha \cos \varphi \cos \gamma + \cos \alpha \sin \beta \sin \varphi \cos \gamma)] = M_\alpha; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} m'_\beta - i_B [\Psi_{pr} \cos \beta + k_1 \Psi_{rs} \sin \beta \cdot \sin \varphi] - \\ - i_c [\Psi_{pr} \sin \alpha \cdot \sin \beta - k_1 \Psi_{rs} \sin \alpha \cos \beta \sin \varphi] + \\ + i_D [\Psi_{rs} (\sin \alpha \cos \beta \sin \gamma \sin \varphi - \sin \beta \cos \gamma \sin \varphi) - \\ - k_2 \Psi_{pr} (\sin \alpha \sin \beta \sin \gamma + \cos \beta \cos \gamma)] + \\ + i_E [\Psi_{rs} (\sin \alpha \cos \beta \cos \gamma \sin \varphi + \sin \beta \sin \gamma \sin \varphi) + \\ + k_2 \Psi_{pr} (\cos \beta \sin \gamma - \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma)] = M_\beta, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} m'_\varphi + i_B k_1 \Psi_{rs} \cos \beta \cos \varphi + i_c k_1 \Psi_{rs} (\cos \alpha \sin \varphi + \\ + \sin \alpha \sin \beta \cos \varphi) + i_D \Psi_{rs} (\sin \alpha \sin \beta \sin \gamma \cos \varphi + \\ + \cos \alpha \sin \gamma \sin \varphi + \cos \beta \cos \gamma \cos \varphi) + \\ + i_E \Psi_{rs} (\cos \alpha \cos \gamma \sin \varphi + \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma \cos \varphi - \\ - \cos \beta \sin \gamma \cos \varphi) = M_\varphi; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} L_B \frac{di_B}{dt} + \Psi_{pr} \dot{\beta} \cos \beta + k_1 \Psi_{rs} \dot{\beta} \sin \beta \sin \varphi - \\ - \dot{\varphi} \cos \beta \cos \varphi + R_B i_B = u_B; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} L_C \frac{di_C}{dt} - \Psi_{pr} (\dot{\alpha} \cos \alpha \cos \beta - \dot{\beta} \sin \alpha \sin \beta) - \\ - k_1 \Psi_{rs} [\dot{\alpha} (\sin \alpha \cos \varphi + \cos \alpha \sin \beta \sin \varphi) + \\ + \dot{\beta} \sin \alpha \cos \beta \sin \varphi + (\dot{\varphi} \cos \alpha \sin \varphi + \\ + \sin \alpha \sin \beta \cos \varphi)] + R_C i_C = u_C; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} L_D \frac{di_D}{dt} - k_2 \Psi_{pr} [\dot{\alpha} \cos \alpha \cos \beta \sin \gamma - \\ - \dot{\beta} (\sin \alpha \sin \beta \sin \gamma + \cos \beta \cos \gamma)] - \\ - \Psi_{rs} [\dot{\alpha} (\cos \alpha \sin \beta \sin \varphi \sin \gamma + \sin \alpha \cos \varphi \sin \gamma) + \\ - \dot{\beta} (\sin \beta \sin \varphi \cos \gamma - \sin \alpha \cos \beta \sin \varphi \sin \gamma) + \\ + \dot{\varphi} (\sin \alpha \sin \beta \cos \varphi \sin \gamma + \cos \alpha \sin \varphi \sin \gamma + \\ + \cos \beta \cos \varphi \cos \gamma)] + R_D i_D = u_D; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} L_E \frac{di_E}{dt} - k_2 \Psi_{pr} [\cos \alpha \cos \beta \cos \gamma - \\ - \dot{\beta} (\sin \alpha \sin \beta \cos \gamma - \cos \beta \sin \gamma)] + \\ - \Psi_{rs} [\dot{\alpha} (\sin \alpha \cos \varphi \cos \gamma + \cos \alpha \sin \beta \sin \varphi \cos \gamma) + \\ + \dot{\beta} (\sin \alpha \cos \beta \sin \varphi \cos \gamma + \sin \beta \sin \varphi \sin \gamma) + \\ + \dot{\varphi} (\cos \alpha \sin \varphi \cos \gamma + \sin \alpha \sin \beta \cos \varphi \cos \gamma - \\ - \cos \beta \cos \varphi \sin \gamma)] + R_E i_E = u_E. \end{aligned}$$

Приведенная математическая модель ТЭМ с АНР полностью совпадает с моделью, приведенной в работе [11].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные с помощью математической модели обобщенной ТЭМ математические модели следующих

видов ТЭМ: асинхронной ТЭМ, ТЭМ с РНР и ТЭМ с АНР, полностью совпали с моделями, полученными на основе уравнения Лагранжа. Но при этом процесс получения указанных моделей был значительно менее трудоемким, так как требовалось только учитывать конструктивные и иные особенности, присущие конкретному типу ТЭМ.

Таким образом, математическую модель обобщенной ТЭМ можно использовать для получения уравнений движения практически любых электромеханических преобразователей энергии поворотного типа, что существенно сократит трудозатраты при получении этих уравнений.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Милых А.Н., Барабанов В.А., Двойных В.В. Трехступенные электрические машины. Киев: Наукова думка, 1979. 312 с.
2. Гуревич М.С. Комплексирование преобразований координат во вращающихся следящих системах // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2010. № 1. С. 35-44.
3. Козлова Е.С., Рогов С.В. Математическая модель трехступенной электрической машины // Известия ТулГУ. Технические науки. 2021. Вып.10. С. 89-94.
4. Соколов М.В., Михед А.Д. Гидропривод на основе трехступенной электрической машины // Современные тенденции развития науки и производства: сборник материалов Международной научно-практической конференции. Кемерово: ООО «Западно-Сибирский научный

- центр», 2023. С. 16-19.
5. Сили С. Электромеханическое преобразование энергии. М.: Энергия, 1968. 376 с.
6. Уайт Д., Вудсон Г. Электромеханическое преобразование энергии. М.: Энергия, 1964. 528 с.
7. Макаров В.Г. Применение теории обобщенной электрической машины к трехфазному асинхронному двигателю // Проблемы энергетики. 2009. № 11-12. С. 84-97.
8. Обобщенная аналитическая математическая модель электромеханического преобразователя как объекта управления / А.Н. Горожанкин, А.А. Грызов, Е.С. Чупин, Е.С. Хаятов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2016. Т. 16, № 4. С. 72-76.
9. Соловьев А.Э., Осман Ф.Т., Ульянов Р.Ю. Математическая модель обобщенной трехступенной электрической машины // Навигация и управление движением: материалы трудов XII конференции молодых ученых. С.-Петербург: Изд-во ГНЦ РФ ЦНИИ «Электронприбор», 2010. С. 372-378.
10. Соловьев А.Э., Осман Ф.Т., Ульянов Р.Ю. Модель трехступенного электромеханического преобразователя энергии асинхронного типа // Математические методы в технике и технологиях: материалы трудов XXII Междуна. науч. конф. Псков: Изд-во Псков. гос. политехн. ин-та, 2009. Т. 8. С. 83-85.
11. Гироскопические приводы на базе трехступенных электрических машин: монография / Соловьев А.Э., Сухинин Б.В., Сурков В.В., Козлова Е.С. Тула: Изд-во ТулГУ, 2007. 215 с.

Поступила в редакцию 31 августа 2023 г.

Принята к печати 11 октября 2023 г.

INFORMATION IN ENGLISH

USING A MATHEMATICAL MODEL OF A GENERALIZED THREE-STAGE ELECTRIC MACHINE

Aleksandr Je. Solovyev

D.Sc. (Engineering), Associate Professor, Head of Electrical Engineering and Electrical Equipment Department, Tula State University, Tula, Russia, soaled@yandex.ru

Oleg A. Kravchenko

D.Sc. (Engineering), Professor, Rector, Tula State University, Tula, Russia, info@tsu.tula.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2974-448X>

The modern development of the component base makes it possible to implement in practice and use in precision devices relatively new types of electric machines, the rotor of which has not one, but three degrees of freedom relative to the stator. Such machines, like classical ones, can be of various types (synchronous, asynchronous, valve), have various design features that have a key effect on their functioning. The process of deriving mathematical models of three-stage machines (usually based on the Lagrange equation of the second kind) is quite time-consuming and the mathematical models themselves are quite complex, since the movement of the rotor along any of the three axes has a significant impact on its movement along the remaining two axes. At present, mathematical models of the main types of three-stage electric machines have been obtained and, (by analogy with classical electric machines), the concept has been introduced and the equations of motion of a generalized three-stage electric machine with mutually movable stator and rotor windings have been obtained. Therefore, from the point of view of the development of the theory of electromechanics, it is of interest to obtain mathematical models for some types of such machines based on a mathematical model of a generalized three-stage electrical machine. In addition, this makes it possible to obtain a mathematical description for any types of three-stage

electric machines without much effort, taking into account their design features and operating modes.

Keywords: electric machine, rotor, stator, winding, inductance, voltage, current, flow coupling, electromagnetic moment

REFERENCES

1. Milyakh A.N., Barabanov V.A., Dvoynikh V.V. *Trekhstupennyye elektricheskiye mashiny* [Three-power electric machines]. Kiev, Naukova dumka, 1979. 312 p. (In Russian)
2. Gurevich M.S. Integration of coordinate transformations in rotating tracking systems. *Izvestiya SPbGETU "LETI"* [Proceedings of Saint Petersburg Electrotechnical University], 2010, no. 1, pp. 35-44. (In Russian)
3. Kozlova E.S., Rogov S.V. Mathematical model of a three-stage electric machine. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskiye nauki*. [Izvestiya Tula State University], 2021, iss. 10, pp. 89-94. (In Russian)
4. Sokolov M.V., Mikhed A.D. Gyro drive based on a three-stage electric machine. *Sovremennyye tendentsii razvitiya nauki i proizvodstva: sbornik materialov Mezhnatsionalnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Collection of materials of the International Scientific and Practical Conference "Modern trends in the development of science and production"]. Kemerovo, LLC "Western Siberian Scientific Center"

- Publ., 2023, pp.16-19. (In Russian)
5. Sili S. *Elektromekhanicheskoe preobrazovanie energii* [Electromechanical transformation of energy]. Moscow, Energia Publ., 1968. 376 p. (In Russian)
6. White D., Woodson G. *Elektromekhanicheskoe preobrazovanie energii* [Electromechanical energy conversion]. Moscow, Energia Publ., 1964. 528 p. (In Russian)
7. Makarov V.G. Application of the theory of a generalized electric machine to a three-phase asynchronous motor. *Problemy energetiki* [Problems of Power Engineering], 2009, no. 11-12, pp. 84-97. (In Russian)
8. Gorozhankin A.N., Gryzlov A.A., Chupin E.S., Khayatov E.S. Generalized analytical mathematical model of an electromechanical converter as a control object. *Vestnik YuUr-GU. Seriya «Energetika»* [Bulletin of South Ural State University. Series "Power Engineering"], 2016, vol. 16, no. 4, pp. 72-76. (In Russian)
9. Solovov A.E., Osman F.T., Ulyanov R.Yu. Mathematical model of a generalized three-stage electric machine. *Navigatsiya i upravlenie dvizheniev: materialy trudov XII konferentsii molodykh uchenykh* [Proceedings of the XII Conference of Young scientists "Navigation and motion control"]. St. Petersburg, Publishing House of the SSC RF Central Research Institute "Electric appliance", 2010, pp. 372-378. (In Russian)
10. Solovov A.E., Osman F.T., Ulyanov R.Yu. Model of a three-stage electromechanical asynchronous type energy converter. *Matematicheskie metody v tekhnike i tekhnologiyakh: materialy trudov XXII Mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya* [Proceedings of the XXII International Scientific Conference "Mathematical methods in engineering and technologies"]. Pskov, Publishing House of Pskov State Polytechnic University, 2009, vol. 8, pp. 83-85. (In Russian)
11. Solovov A.E., Sukhinin B.V., Surkov V.V., Kozlova E.S. *Giroskopicheskie privody na baze trekhstepennykh elektricheskikh mashin* [Gyroscopic drives based on three-stage electric machines]. Tula: TulSU Publishing House, 2007. 215 p.

Соловьев А.Э., Кравченко О.А. Использование математической модели обобщенной трехступенной электрической машины // Электротехнические системы и комплексы. 2023. № 4(61). С. 53-59. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-4\(61\)-53-59](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-4(61)-53-59)

Solovyev A.Je., Kravchenko O.A. Using a Mathematical Model of a Generalized Three-Stage Electric Machine. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2023, no. 4(61), pp. 53-59. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-4\(61\)-53-59](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-4(61)-53-59)

МЕТОДИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ АДАПТИВНЫХ КОМПЛЕКСОВ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ

Рассмотрены вопросы оценки эффективности использования автоматизированных адаптивных комплексов энергосбережения на промышленных предприятиях. Показана сложность решения этого вопроса для адекватной оценки эффективности устройств энергосбережения различного типа. Является неправильным сравнивать показания счетчиков при включенном и выключенном состоянии устройств энергосбережения из-за быстро меняющейся нагрузки. Кроме того, целесообразно, чтобы процесс оценки эффективности использования таких устройств был автоматизирован. В данной работе представлен алгоритм проведения испытаний на эффективность путем выбора участков одинаковых нагрузок, ориентируясь на значения токов при включенном и выключенном устройстве энергосбережения. При включении или выключении устройства энергосбережения происходит изменение тока в сети из-за компенсации реактивной мощности. Поскольку при включении устройства выход на режим происходит постепенно (потому нагрузка может измениться существенно), рекомендуется фиксировать изменение тока при отключении устройства, при этом мало вероятно, что нагрузка изменится существенно. Далее сравниваются значения потребляемых мощностей, но при включенном устройстве ток должен быть на определенное до этого значение ниже. Для оценки эффективности использования устройств энергосбережения на удаленных предприятиях без физического подключения устройств энергосбережения предложены формулы, позволяющие оценить их эффективность. В результате в данной статье: предложена методика оценки эффективности использования энергосберегающих устройств на предприятиях на этапе предварительных испытаний с использованием анализаторов параметров качества энергии; разработан алгоритм автоматизированной оценки текущей эффективности использования энергосберегающих устройств в процессе их постоянной работы с передачей информации на терминальные устройства предприятий; разработаны соотношения для оценки эффективности использования энергосберегающих устройств по данным о параметрах сети, полученным от предприятий; предложен алгоритм автоматизированной оценки эффективности применения энергосберегающих устройств на основе использования разработанных соотношений с передачей информации на терминальные устройства предприятий.

Ключевые слова: энергосбережение, ток, мощность, напряжение, автоматизация, компенсация, реактивная мощность, перекос, гармоники, анализаторы качества электроэнергии, коэффициент мощности, корреляция

ВВЕДЕНИЕ

Экономия электрической энергии является на сегодняшний день одним из самых ключевых факторов экономики. Этому, в частности, посвящен Федеральный закон 261-ФЗ «Об энергосбережении и повышении энергетической эффективности» [1].

Добиться сбережения электроэнергии возможно лишь за счет улучшения параметров качества электроэнергии, основными из которых являются компенсация реактивной мощности, снижение несимметрии питающих токов и напряжений, фильтрация высших гармоник, ограничение пусковых токов, компенсация кратковременных падений напряжений, сглаживание переходных процессов [2-4].

На рынке широко используются компенсаторы реактивной мощности (КРМ) различных производителей, как отечественных, так и зарубежных. Имеются также управляемые компенсаторы реактивной мощности (УКРМ). В УКРМ управление компенсацией реактивной мощности осуществляется по одной фазе, так как используются трехфазные конденсаторы, собранные в треугольник, хотя опыт показывает, что реактивная мощность в сетях предприятий существенно различается по фазам. Поэтому существующие УКРМ не всегда эффективно решают задачу компенсации реактивной мощности.

На рынке также существуют фильтры гармоник

различного типа [5, 6]. Это независимые устройства, которые продаются либо отдельно, либо расположены внутри шкафа с УКРМ. При установке УКРМ и фильтров, как правило, необходимо осуществлять процедуры по согласованию их совместной работы. Такая совокупность компенсаторов и фильтров приводит к их существенному удорожанию. Кроме того, существующие фильтры гармоник заранее настроены на определенные частоты, а гармонический состав в сетях предприятий в процессе их работы может постоянно меняться [7-9], поэтому для эффективной фильтрации высших гармоник желательно иметь управляемые фильтры гармоник [3]. Существенную роль в экономии электрической энергии играет снижение перекосов напряжений [10-12]. На сегодняшний день компенсация перекосов напряжений может осуществляться однофазными или трехфазными стабилизаторами напряжения или симметрирующими трансформаторами [13]. Но эти устройства имеют высокую цену и массогабаритные характеристики, такие же, как питающие силовые трансформаторы, и включаются в разрыв систем энергоснабжения предприятия, чем изменяют конфигурацию сети и снижают ее надежность.

Современные достижения в области материаловедения и технологий позволяют решить перечисленные выше задачи и проблемы более эффективными способами, что делает возможным провести автоматизацию процессов компенсации реактивной мощности, перекосов напряжений, фильтрации высших гармоник. Проблемы компенсации реактивной мощности, пере-

косов напряжений, фильтрации высших гармоник и др. реализованы как единое функциональное и конструктивное решение в виде адаптивного комплекса энергосбережения (АКЭС) при участии автора и приведены в работах [2, 4, 13].

Тем не менее актуальной является задача оценки эффективности использования как адаптивных комплексов энергосбережения, так и всех других предлагаемых решений с точки зрения экономии электрической энергии.

МЕТОДИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ОЦЕНКИ ПРИМЕНЕНИЯ АКЭС НА ПРЕДПРИЯТИЯХ

Для оценки эффективности применения энергосберегающих устройств любого типа необходимо иметь методики, позволяющие адекватно оценить эту эффективность.

Прямым способом оценки эффективности устройств энергосбережения являются их натурные испытания с применением, например, счетчиков коммерческого учета электрической энергии путем снятия и анализа их показаний при подключении и отключении энергосберегающих систем.

Такой подход, в принципе, возможен, если нагрузка изменяется относительно мало. Такой вариант представлен на рис. 1, где показаны графики (по фазам) напряжений (окно 1), токов (окно 2), активных мощностей (окно 3), реактивных мощностей (окно 4) и коэффициентов мощности (окно 5).

Из графиков видно, что при включенном энергосберегающем устройстве (интервал времени с 15:00 до 21:00) токи (I), активная мощность (P) и реактивная мощность (Q) существенно ниже, чем при выключенном (интервал с 22:00 до 03:00), то есть несложно увидеть и оценить экономию электрической энергии.

Однако в большинстве случаев нагрузка предприятия

меняется непредсказуемо и оценка потребляемой энергии по счетчикам электрической энергии при включенном и выключенном энергосберегающем устройстве не будет адекватной. Такая ситуация представлена на рис. 2.

Для правильной оценки экономии электрической энергии в электроэнергетических сетях в таких случаях рекомендуется использовать анализаторы параметров качества электроэнергии сети (АКПЭС). Чтобы адекватно оценить экономию электроэнергии необходимо найти участки одинаковых нагрузок при включенном и выключенном энергосберегающем устройстве.

Так, например, при отключении АКЭС происходит мгновенное увеличение тока в сети [5]. Вероятность того, что при этом мгновенно изменилась активная мощность, невелика. Поэтому алгоритм нахождения одинаковых нагрузок должен выглядеть следующим образом: на начальном этапе необходимо зафиксировать изменение тока в сети (снижение) при включении устройства энергосбережения и возрастание при его отключении. Например, при отключении АКЭС можно записать:

$$\delta I = \frac{I_{\text{вык}} - I_{\text{вкл}}}{I_{\text{вык}}} 100\%, \quad (1)$$

где $I_{\text{вык}}$ – ток при выключенном устройстве; $I_{\text{вкл}}$ – ток при включенном устройстве.

Изменение коэффициента мощности при выключенном ($\cos\varphi_{\text{вык}}$) и включенном устройстве энергосбережения ($\cos\varphi_{\text{вкл}}$) будет выглядеть следующим образом:

$$\delta \cos\varphi = \frac{\cos\varphi_{\text{вык}} - \cos\varphi_{\text{вкл}}}{\cos\varphi_{\text{вык}}} 100\%. \quad (2)$$

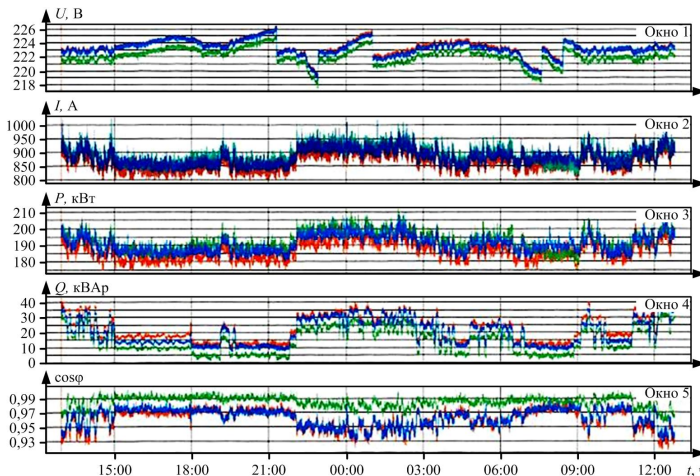


Рис. 1. Графики изменения параметров электрической сети при включенном и выключенном энергосберегающем устройстве при малозменяющейся нагрузке (— фаза А, — фаза В, — фаза С)

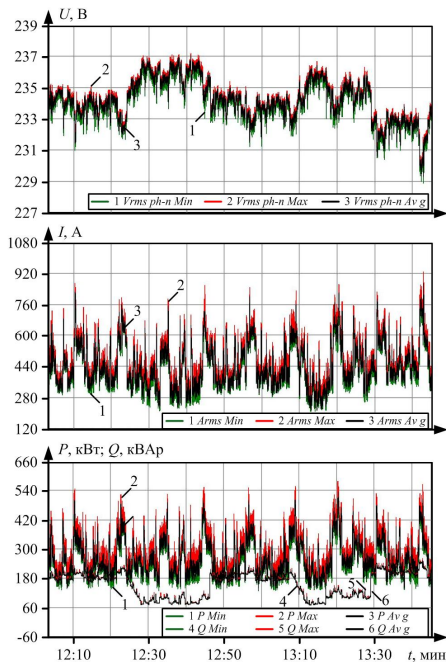


Рис. 2. Графики изменения параметров электрической сети при включенном и выключенном энергосберегающем устройстве при сильно изменяющейся нагрузке

Далее производится запись на карту памяти анализатора параметров электрической сети при включенном и выключенном устройстве энергосбережения (3–4 цикла по 30–40 мин). После этого результаты записи переписываются в компьютер и с помощью специальной программы открывают записанные данные. Затем на диаграммах параметров сети необходимо найти относительно ровные участки активной мощности, соответственно с включенным ($P_{\text{вкл}}$) и выключенным ($P_{\text{вык}}$) устройстве энергосбережения. При этом необходимо сравнить значения токов и коэффициентов мощности сети с включенным и выключенным устройством. Если значения δI , рассчитанное по соотношению (1), и $\delta \cos \varphi$, рассчитанное по соотношению (2), близки к зарегистрированным ранее значениям, то можно рассчитать экономии активной энергии по соотношению

$$\delta P = \frac{P_{\text{вык}} - P_{\text{вкл}}}{P_{\text{вык}}} 100\%. \quad (3)$$

Случается, что при анализе результатов проведенных испытаний сложно (или невозможно) найти участки подобные указанным выше. В этом случае необходимо либо повторить испытания (что зачастую сложно организовать практически и, возможно, не будет полной гарантии в успехе эксперимента), либо провести необходимые дополнительные расчеты. Так, если после проведенного анализа оказалось, что при рас-

танном по соотношению (2) δP значения δI и $\delta \cos \varphi$ оказались отличными от значений, рассчитанных ранее по соотношениям (1) и (2), например $\delta I'$ и $\delta \cos \varphi'$, то рассчитываются коэффициенты поправок по току K_T и по коэффициенту мощности K_K :

$$K_T = \frac{\delta I}{\delta I'} \quad (4)$$

и

$$K_K = \frac{\delta \cos \varphi}{\delta \cos \varphi'}, \quad (5)$$

а затем скорректированное значение экономии активной мощности:

$$\delta P_K = \delta P K_T K_K. \quad (6)$$

В результате последовательность действий для оценки эффективности использования энергосберегающей системы выглядит следующим образом:

- подключить АКЭС и анализатор качества параметров сети (АКПЭС) согласно приведенной ниже схеме (рис. 3);
- включить анализатор качества параметров сети на запись, а также включить энергосберегающий комплекс в рабочий режим;
- после выхода энергосберегающего комплекса на рабочий режим (когда реактивная мощность будет скомпенсирована полностью или, во всяком случае, когда все конденсаторы АКЭС будут включены) отключить его. При этом зафиксировать изменение (возрастание) тока и изменение (снижение) коэффициента мощности в сети по показаниям измерителя параметров сети энергосберегающей системы (желательно записать, например, на камеру мобильного телефона). Для оценки изменения тока можно также использовать стандартные токовые клещи;
- повторить описанную в п. 3 процедуру 3–4 раза и вычислить среднеарифметические значения изменения тока и коэффициента мощности. Если рассчитанные по соотношениям (1) и (2) изменения тока или коэффициента мощности будут существенно отличаться от остальных, то следует считать их как промахи и во внимание не принимать;
- включить энергосберегающий комплекс в рабочий режим на 30–40 мин. Анализатор качества параметров сети при этом включен постоянно и работает на запись без отключения. По истечении этого времени отключить энергосберегающее устройство на тот же период времени. Повторить циклы (устройство ВКЛЮЧЕНО – ВЫКЛЮЧЕНО) 3–4 раза.

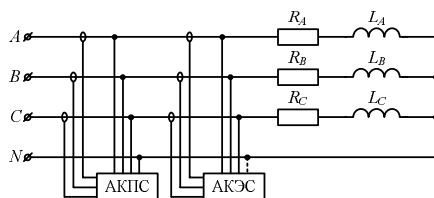


Рис. 3. Схема проведения испытаний эффективности работы АКЭС

Переписать данные карты памяти анализатора параметров сети в компьютер, открыть их с помощью специальной программы и провести описанные выше действия по оценке эффективности использования энергосберегающей системы.

Таким образом, используя приведенную выше методику, можно за относительно короткий промежуток времени достаточно адекватно оценить экономию электрической энергии за счет использования АКЭС.

Такая процедура определения эффективности АКЭС может быть использована на этапе проведения предварительных испытаний на предприятиях. Для этого необходим выезд на предприятие специалистов вместе с устройствами энергосбережения и измерительной аппаратурой.

Однако для руководства предприятий после приобретения энергосберегающего оборудования важно иметь информацию о параметрах сети и особенно об экономии электроэнергии в процессе работы энергосберегающей системы на предприятиях после ее установки. Для этого необходимо разработать алгоритм удаленной передачи информации на компьютер главного энергетика или главного инженера предприятия, позволяющий автоматизировать процесс получения информации о состоянии сети и об эффективности применяемой системы энергосбережения.

Для этого был разработан алгоритм автоматизированного процесса получения информации об эффективности работы энергосберегающей системы во время ее работы в сети, представленный на рис. 4.

В заданное программное время автоматически происходит отключение системы энергосбережения от сети (блок 2). При этом система запоминает параметры сети, которые были до ее отключения, в том числе среднее значение тока $I_{\text{вкл}}$ и суммарную активную мощность, потребляемую предприятием $P_{\text{вкл}}$ (блок 1).

В момент отключения АКЭС измеряется ток $I_{\text{вык}}$ (блок 2), затем рассчитывается изменение (увеличение) тока δI (блок 3) по формуле (1).

Далее в течение 1 мин измеряется суммарная активная мощность $P_{\text{вык}}$ и ток $I_{\text{вык}}$ и рассчитываются их средние значения за указанный интервал времени (блоки 4 и 5 соответственно). Затем рассчитывается разница в процентном отношении между текущим значением тока и его значением до отключения АКЭС (δI) (блок 6). Если их отличие не превышает 5%, то можно считать, что нагрузки в сети были одинаковыми (блок 7). Тогда по соотношению (3) вычисляется экономия электрической энергии (блок 8), результат выводится на дисплей и система включает АКЭС (блоки 9, 10).

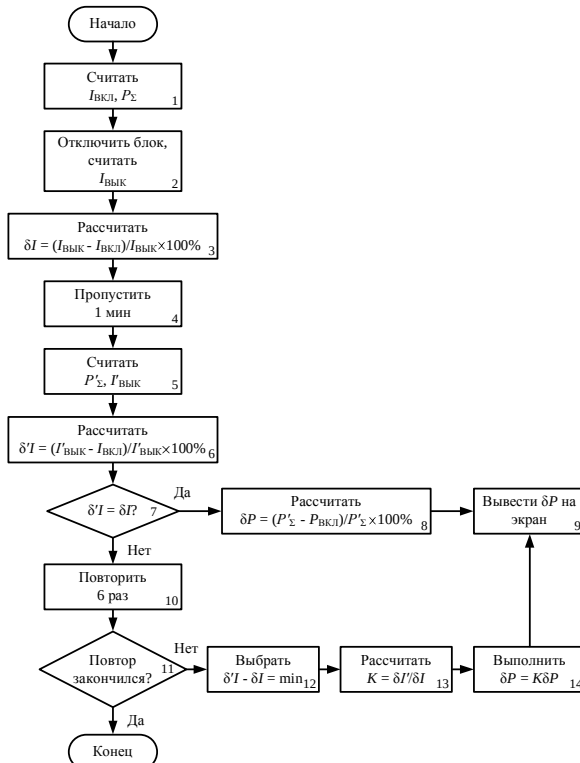


Рис. 4. Блок-схема алгоритма автоматизированного процесса получения информации

Если разница между значениями токов (блок 7) превышает 5% и время диагностирования не превышает 6 мин, то программа переходит на повторный цикл (блоки 4, 5, 6, 7). В случае, если время диагностирования превышает 6 мин, из предыдущих вариантов проверки выбирается минимальное значение разности δT и δI (блок 12), затем рассчитывается коэффициент корреляции K по соотношению (4) и по формуле

$$\delta_3 = \frac{P_{\text{вык}} - P_{\text{вкл}}}{P_{\text{вык}}} K. \quad (7)$$

По формуле (7) рассчитывается процент экономии электрической энергии (блок 14), далее результат выводится на дисплей (блок 9) и включается АКЭС (блок 10).

Если оборудование не установлено на предприятии и особенно если предприятия находятся далеко, желательно для снижения затрат на проведение испытаний и оценки эффективности их использования иметь аналитические соотношения, позволяющие произвести эту оценку. Для этого необходимо получить от предприятий данные об основных параметрах их сети (значение реактивной мощности, коэффициента мощности, коэффициента гармоник, коэффициента перекоса напряжений).

Для получения соотношений, позволяющих оценить эффективность использования разработанных АКЭС, было произведено множество замеров параметров сети предприятий и испытаний по эффективности использования АКЭС.

Материалы по испытаниям были разделены на три группы:

- низкий коэффициент мощности (большая реактивная мощность), но низкий коэффициент гармоник и низкий коэффициент перекоса напряжений;
- высокий коэффициент мощности, но высокий коэффициент гармоник и низкий коэффициент перекоса напряжений;
- высокий коэффициент мощности, низкий коэффициент гармоник, но высокий коэффициент перекоса напряжений.

В результате обработки указанных выше материалов был построен график зависимости потерь мощности (η_3) в электрических сетях от значения коэффициента мощности ($\cos \varphi$) (рис. 5).

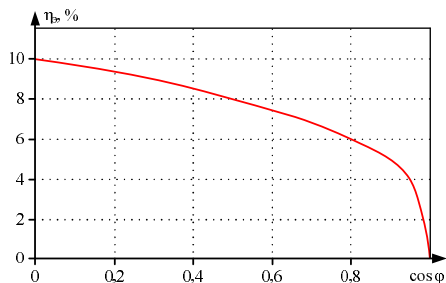


Рис. 5. График зависимости потерь мощности в электрических сетях от значения коэффициента мощности

Поскольку вводить в алгоритм график для определения потерь от наличия реактивной мощности не является удобным, была получена формула, отражающая достаточно близко его вид:

$$\delta_{\text{PM}} = 10(1 - \cos^4 \varphi), \quad (8)$$

где δ_{PM} – потери от наличия реактивной мощности, %.

Экономия электрической энергии за счет фильтрации высших гармоник выглядит следующим образом:

$$\delta_{\text{Г}} = K_{\text{Г}} (1 \dots 1,5), \quad (9)$$

где $\delta_{\text{Г}}$ – экономия электрической энергии за счет фильтрации высших гармоник, %; $K_{\text{Г}}$ – коэффициент гармоник.

Разброс коэффициента, на который умножается коэффициент гармоник, связан с тем, что при его большой величине подавление гармоник ниже из-за недостаточной мощности фильтрующих элементов. Так, при $K_{\text{Г}}$, лежащем в пределах от 1 до 4%, это значение равно 1,5, для $K_{\text{Г}}$ в пределах от 5 до 9% – 1,3, для $K_{\text{Г}}$ 15–20% рекомендуется 1,2.

Влияние перекоса напряжений на экономию электроэнергии может быть выражено следующим образом:

$$\delta_{\text{ПН}} = 6\delta_{\text{У}} K_{\text{ЭП}}, \quad (10)$$

где $\delta_{\text{ПН}}$ – перекос напряжений, %; $K_{\text{ЭП}}$ – коэффициент электропривода;

$$\delta_{\text{У}} = \frac{U_{\text{max}} - U_{\text{min}}}{U_{\text{max}}} 100\%,$$

где U_{max} – максимальное фазное напряжение; U_{min} – минимальное фазное напряжение;

$$K_{\text{ЭП}} = \frac{P_{\text{ЭП}}}{P_{\text{сум}}}, \quad (11)$$

где $P_{\text{ЭП}}$ – мощность электропривода; $P_{\text{сум}}$ – суммарная мощность.

Таким образом, суммарная экономия электроэнергии будет составлять

$$\delta_{\text{с}} = \delta_{\text{PM}} + \delta_{\text{Г}} + \delta_{\text{ПН}}. \quad (12)$$

Последовательность работы с предприятиями по внедрению АКЭС может выглядеть следующим образом:

- по данным о параметрах сети предприятия (полученных от предприятий) с использованием разработанных соотношений оценить эффективность применения АКЭС;
- по желанию заказчика выехать на предприятие с оборудованием (устройствами энергосбережения анализатором параметров сети) и провести натурные испытания по разработанной методике;
- составить протокол, отчет и коммерческое предложение;
- в программном обеспечении АКЭС предусмотреть возможность автоматизированного процесса контроля параметров сети, а также эффективности его использования с передачей данных на удаленные терминалы по разработанному алгоритму.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложена методика оценки эффективности энергосберегающих устройств на предприятиях с высокой степенью достоверности путем проведения натурных испытаний с использованием анализаторов качества электроэнергии.

2. Предложена методика автоматизированной оценки эффективности АКЭС, установленных на предприятиях, в процессе их эксплуатации с передачей информации на удаленные терминалы.

3. Предложена методика автоматизированной оценки эффективности использования АКЭС по информации от предприятий о параметрах сети с использованием разработанных формул.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Федеральный закон от 23 ноября 2009 г. № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» // Российская газета. Федеральный вып. 2009. №226 (5050). С. 19-21.
2. Основные направления энергосбережения на предприятиях и оборудовании, используемое для энергосбережения / В.И. Самохин, Д.В. Самохин, И.В. Сухоставский, Е.Е. Бабкин // Электронные информационные системы. 2020. №1(24). С. 63-76.
3. Радкевич В.Н., Тарасова М.Н. Оценка степени снижения потерь активной мощности в линиях электропередачи при компенсации реактивной мощности // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2016. №1(59) С. 5-13. doi: 10.21122/1029-7448-2016-59-1-5-13
4. Самохин Д.В. Локальная управляемая система энергосбережения // Электронные информационные системы. 2020 №4(27). С. 41-47.
5. Venkata B.R., Dayasagar S.C., Venkata G.R. Analysis of Active and Passive Power Filters for Power Quality Improvement under Different Load Conditions // International Journal of Advanced Research in Electrical – Electronics and Instrumentation Engineering. 2014. No. 8. Pp. 11102-11115.
6. Шрейнер Р.Т., Ефимов А.А. Активный фильтр как новый элемент энергосберегающих систем электропривода // Электричество. 2000. №3. С. 46-54.
7. Учёт несинусоидального/несимметричного режима работы электрической сети коммунально-бытового назначения при расчете уровня тока нулевого проводника / М.М. Камолов, С.А. Абдулкеримов, Х.Б. Назиров, Ш.Дж. Джураев, С.Т. Исmoilov // Электричество. 2021. №1. С. 35-43. doi: 10.24160/0013-5380-2020-1-35-43
8. Камолов М.М. Оценка несимметричных режимов в электрических сетях коммунально-бытового назначения // Политехнический Вестник. Серия: Инженерные исследования. 2020. №3. С. 29-37.
9. Measurement of Emissions of High Harmonic Currents in Modern Electrical Receivers in Municipal-Households Power Supply System / K.B.Nazirov, Z.S. Ganiev, Sh.D. Dzhuraev, M.M. Kamolov, A.S. Amirkhanov // IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering. IEEE, 2020. Pp. 1270-1275. doi: 10.1109/EICoN Rus49466.2020.9039148
10. Simulation of the Municipal-Household Electrical Supply System for Calculation and Forecasting the Level Current and Voltage Higher Harmonics / K.B. Nazirov, Sh.D. Dzhuraev, M.M. Kamolov, A.S. Amirkhanov, S.T. Ismoilov // IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering. IEEE, 2020. Pp. 1276-1281. doi: 10.1109/EICoN Rus49466.2020.9038935
11. Experimental Evaluation and Analysis of Electric Power Quality in Electric Networks Municipal-Households / K.B. Nazirov, S.D. Dzhuraev, Z.S. Ganiev, M.M. Kamolov, S.T. Ismoilov, A.G. Kayumov // IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering. IEEE, 2021. Pp. 1491-1494. doi: 10.1109/EICoN Rus51938.2021.9396351
12. Computation of the zero-wire current under an asymmetric nonlinear load in a distribution network / S. Dzhuraev, S. Beryozkina, M. Kamolov, M. Safaraliev, I. Zicmane, K. Nazirov, S. Sultonov // Energy Reports. 2022. No. 8(8). Pp. 563-573. doi: 10.1016/j.egy.2022.09.176
13. Автоматизация компенсации перекоса фазных (линейных) напряжений в электроэнергетических сетях / Д.В. Самохин, В.И. Самохин, А.В. Гурев, М.М. Камолов // Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России. 2023. № 3 (159). С. 22-26.

Поступила в редакцию 07 августа 2023 г.

Принята к печати 26 октября 2023 г.

INFORMATION IN ENGLISH

METHODOLOGY FOR AUTOMATED ASSESSMENT OF ADAPTIVE ENERGY SAVING COMPLEX EFFECTIVENESS AT ENTERPRISES

Dmitry V. Samokhin

Assistant Professor, Institute of Microdevices and Control Systems, National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia, oppozite1984@mail.ru

The issues of assessing the effectiveness of using automated adaptive energy saving systems at industrial enterprises are considered. The difficulty of solving this issue for adequately assessing the effectiveness of energy saving devices of various types is shown. It is not correct to compare meter readings when energy saving devices are on and off due to rapidly changing loads. In addition, it is advisable that the process of assessing the effectiveness of using such devices be automated. This paper presents an algorithm for conducting efficiency tests by selecting sections of identical loads, focusing on the current values when the energy saving device is turned on and off. When an energy saving device is turned on or off, the current in the network changes due to reactive power compensation. Since when the

device is turned on, the mode is reached gradually (therefore the load can change significantly), it is recommended to record the change in current when the device is turned off, since it is unlikely that the load will change significantly. Next, the power consumption values are compared, but when the device is turned on, the current should be lower by a previously determined value. To assess the effectiveness of using energy-saving devices at remote enterprises without physically connecting energy-saving devices, formulas have been developed to evaluate their effectiveness. As a result, in this article, a methodology has been proposed for assessing the effectiveness of using energy-saving devices at enterprises at the stage of preliminary tests using analyzers of energy network quality parameters; an algorithm has

been developed for automated assessment of the current efficiency of using energy-saving devices in the process of their constant operation with the transfer of information to terminal devices of enterprises; relationships have been developed to assess the efficiency of using energy-saving devices based on data on network parameters received from enterprises; an algorithm has been proposed for automated assessment of the effectiveness of using energy-saving devices based on the use of developed relationships with the transfer of information to terminal devices of enterprises.

Keywords: energy saving, current, power, voltage, automation, compensation, reactive power, distortion, harmonics, power quality analyzers, power factor, correlation

REFERENCES

1. Federal Law of November 23, 2009 No. 261-FZ "On Energy Saving and Improving Energy Efficiency and on Amending Certain Legislative Acts of the Russian Federation". *Rossiyskaya gazeta. Federal'nyy vypusk* [Rossiyskaya Gazeta. Federal issue], 2009, no. 226 (5050), pp. 19-21. (In Russian)
2. Samokhin V.I., Samokhin D.V., Sukhostavskii I.V., Babkin E.E. Main directions of energy saving at enterprises and equipment used for energy saving. *Elektronnyye informatsionnyye sistemy* [Electronic information systems], 2020, no. 1(24), pp. 63-76. (In Russian)
3. Radkevich V.N., Tarasova M.N. Evaluation of the degree of reduction of active power losses in power lines with reactive power compensation. *Energetika. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy i energeticheskikh ob'yedineniy SNG* [Energetika. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations], 2016, vol. 59, no. 1, pp. 5-13. doi: 10.21122/1029-7448-2016-59-1-5-13 (In Russian)
4. Samokhin D.V. Local controlled energy saving system. *Elektronnyye informatsionnyye sistemy* [Electronic information systems], 2020, no. 4 (27), pp. 41-47. (In Russian)
5. Venkata B.R., Dayasagar S.C., Venkata G.R. Analysis of Active and Passive Power Filters for Power Quality Improvement under Different Load Conditions. *International Journal of Advanced Research in Electrical – Electronics and Instrumentation Engineering*, 2014, no. 8, pp. 11102-11115.
6. Schreiner R.T., Efimov A.A. An active filter as a new element of electric drive energy-saving systems. *Elektrichestvo*, 2000, no. 3, pp. 46-54. (In Russian)
7. Kamolov M.M., Abdulkarimov S.A., Nazirov H.B., Dzhuraev Sh.J., Ismoilov S.T. Taking into account the non-sinusoidal/asymmetric mode of operation of the electric utility network when calculating the current level of the zero conductor. *Elektrichestvo* [Elektrichestvo], 2021, no. 1, pp. 35-43. doi:10.24160/0013-5380-2020-1-35-43 (In Russian)
8. Kamolov M.M. Evaluation of asymmetric modes in electrical networks for domestic purposes. *Politehnicheskii Vestnik. Seriya: Inzhenernye issledovaniya* [Polytechnic bulletin. Series: Engineering studies], 2020, no. 3, pp. 29-37. (In Russian)
9. Nazirov K.B., Ganiev Z.S., Dzhuraev Sh.D., Kamolov M.M., Amirkhanov A.S. Measurement of Emissions of High Harmonic Currents in Modern Electrical Receivers in Municipal-Households Power Supply System. *IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering. IEEE*, 2020, pp. 1270-1275. doi: 10.1109/EIConRus49466.2020.9039148
10. Nazirov K.B., Dzhuraev Sh.D., Kamolov M.M., Amirkhanov A.S., Ismoilov S.T. Simulation of the Municipal-Household Electrical Supply System for Calculation and Forecasting the Level Current and Voltage Higher Harmonics. *IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering. IEEE*, 2020, pp. 1276-1281. doi: 10.1109/EIConRus49466.2020.9038935
11. Nazirov K.B., Dzhuraev S.D., Ganiev Z.S., Kamolov M.M., Ismoilov S.T., Kayumov A.G. Experimental Evaluation and Analysis of Electric Power Quality in Electric Networks Municipal-Households. *IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering. IEEE*, 2021, pp. 1491-1494. doi: 10.1109/EIConRus51938.2021.9396351
12. Dzhuraev S.D., Beryozkina S., Kamolov M.M., Safaraliev M., Zicmane I., Nazirov K., Sultanov S. Computation of the zero-wire current under an asymmetric nonlinear load in a distribution network. *Energy Reports*, 2022, no. 8(8), pp. 563-573. doi: 10.1016/j.egy.2022.09.176
13. Samokhin D.V., Samokhin V.I., Gureev A.V., Kamolov M.M. Automation of phase (line) voltage imbalance compensation in electric power networks. *Oboronnii kompleks – nauchno-tehnicheskomu progressu Rossii* [Defense complex – scientific and technological progress of Russia], 2023, no. 3 (159), pp. 22-26. (In Russian)

Самохин Д.В. Методика автоматизированной оценки эффективности применения адаптивных комплексов энергосбережения на предприятиях // Электротехнические системы и комплексы. 2023. № 4(61). С. 60-66. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-4\(61\)-60-66](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-4(61)-60-66)

Samokhin D.V. Methodology for Automated Assessment of Adaptive Energy Saving Complex Effectiveness at Enterprises. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2023, no. 4(61), pp. 60-66. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-4\(61\)-60-66](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-4(61)-60-66)

ОЦЕНКА ВРЕМЕННЫХ ЗАДЕРЖЕК ПРИ ОБМЕНЕ ИНФОРМАЦИЕЙ В СТРУКТУРАХ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ И ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Разработка объектно-ориентированных цифровых двойников (ЦД) актуальна для виртуального ввода в эксплуатацию и наладки электромеханических и гидравлических систем прокатных станов. Важной задачей, решаемой с применением ЦД, является настройка систем управления. Дано сравнение структур передачи информации в цифровых моделях, цифровых тенях и ЦД. Рассмотрены варианты размещения виртуальной модели объекта и алгоритма системы управления на персональном компьютере (ПК) либо в ресурсе программируемого логического контроллера (ПЛК). Подчеркнута актуальность оценки запаздываний сигналов при размещении программы управления в ПЛК, а модели объекта – в ПК, отмечена недостаточная изученность данного вопроса. Показано, что дополнительное запаздывание вносит различие интерфейсов ПЛК и ПК. Это приводит к искажению информационного обмена между объектом и системой управления и нарушению процесса двойникового. Выполнено исследование ЦД условного дискретного объекта с пропорциональным регулятором. Виртуальная модель реализована в среде Matlab Simulink Desktop Real Time в ПК, система управления – на языке программирования ПЛК. Путем сопоставления осциллограмм, полученных при различных коэффициентах усиления регулятора, доказано, что задержка в передаче сигнала приводит к его искажениям и усилению колебательных свойств системы. Предложен способ определения задержек, возникающих при обмене информацией в структуре цифрового двойника, включающий передачу тестового сигнала через интерфейс UDP в программу виртуальной модели на ПК и «возвращение» в ПЛК, фиксацию обоих сигналов на выходе ПЛК и вычисление временной задержки. Рассмотрено определение задержки путем оценки временного сдвига пилообразного сигнала, поступающего на вход ПЛК, и его отклика после «возвращения» из ПК. С целью моделирования запаздываний при разработке алгоритма управления предложено включение в структуру системы дополнительных дискретных звеньев. Дана оценка влияния на запаздывание сигналов дискретного характера программы ПЛК. Доказано, что запаздывания, обусловленные этой причиной, незначительны и могут не учитываться. Полученные результаты и способ определения задержек рекомендуются для использования при создании объектно-ориентированных цифровых двойников мехатронных комплексов прокатных станов.

Ключевые слова: электромеханическая система, цифровой двойник, создание, контроллер, персональный компьютер, размещение, обмен данными, запаздывание, определение, способ, моделирование, рекомендации

ВВЕДЕНИЕ

Задача создания цифровых двойников электромеханических и гидравлических (в комплексе – мехатронных) систем актуальна для промышленных объектов [1, 2]. Она важна для металлургических заводов и в первую очередь для наиболее сложных агрегатов – прокатных станов [3, 4]. Можно утверждать, что развитие ЦД основано на достижениях в области цифровых систем, реализованных в программируемых логических контроллерах (ПЛК). Проблемам развития цифровых систем управления электроприводами посвящены работы многих отечественных ученых. В этом направлении следует отметить труды М.Г. Бычкова (МЭИ) [5], З.Ш. Ишматова (УГТУ-УПИ) [6], А.Е. Колганова, С.К. Лебедева (ИГЭУ) [7, 8]. Также заслуживают внимания публикации зарубежных авторов [9–11].

Известно, что отличием цифровых двойников от цифровых моделей и цифровых теней является двусторонний обмен информацией в течение жизненного цикла объекта. Принципы обмена данными между физическими и цифровыми объектами поясняются с помощью рис. 1 [12], аналогичные рисунки приведены в [13, 14] и других публикациях. В [15] со ссылкой на [12] даются следующие определения:

1. Цифровая модель – представляет собой симуляцию физического процесса и характеризуется ручным обменом данными между реальными и цифровыми объектами.

2. Цифровая тень – имеет односторонний автоматизированный поток данных от реального к цифровому объекту, который обычно определяется как эмуляция физического актива или процесса. Типичными задачами являются моделирование в реальном времени и мониторинг процесса.

3. Цифровой двойник – реализует автоматизированный двусторонний поток данных между физическими и цифровыми объектами. К характерным задачам следует отнести виртуальный ввод в эксплуатацию и управление производством.

Приведенные различия являются важными, хотя в литературных источниках до сих пор эти понятия часто воспринимаются как синонимы, как и не существует однозначного определения цифрового двойника. В плане практического использования можно утверждать, что цифровые модели и, в меньшей степени, цифровые тени уже сегодня являются стандартной практикой во многих организациях. Перспектива цифрового двойника заключается в способности «проактивно реагировать на информацию, поступающую от физического объекта, автоматизированным способом для создания технического эффекта или предотвращения убытков» [15]. Направления создания ЦД мехатронных систем прокатного оборудования обозначены в [16]. Известны примеры ЦД, разработанных для стана холодной прокатки [17], для виртуального ввода в эксплуатацию моталок стана горячей прокатки [18] (оба выполнены при участии автора), для стана прокатки алюминия [19] и др.

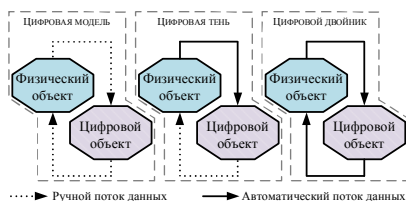


Рис. 1. Интеграция данных в структурах цифровой модели, цифровой тени и цифрового двойника

Объектно-ориентированные цифровые двойники технологических агрегатов применяются на этапах проектирования, виртуального ввода в эксплуатацию, наладки и настройки алгоритмов управления, модернизации оборудования [20]. Согласно приведенному **рис. 1**, в них предусмотрен on-line-обмен информацией, поэтому при их применении для решения названных задач необходимо учитывать реальное быстродействие создаваемых систем, которое может отличаться от быстродействия ПЛК, заявленного изготовителем [21]. Такая же задача возникает при применении цифровых теней для мониторинга технического состояния в режиме штатной эксплуатации (здесь не рассматривается). От этого параметра (быстродействия) и задержек при передаче сигналов зависит скорость обмена данными и, соответственно, точность двойникового (воспроизведения виртуального пространства) оборудования и процессов [22].

Временные задержки, которые возникают при on-line-обмене информацией в структуре ЦД, зависят от способа размещения виртуальной модели (ВМ) физического объекта и алгоритма системы управления объектом. Такая задержка наиболее значима при их расположении на разных вычислительных устройствах – в ПЛК и/или промышленных компьютерах (ПК). Задержка увеличивается при разных интерфейсах создаваемых вычислительных устройств. Поэтому ее оценка при двусторонней передаче сигналов в системе «алгоритм управления – виртуальная модель» является актуальной. Публикаций, посвященных этому вопросу, в доступных изданиях не обнаружено, представленная статья направлена на устранение данного информационного пробела. При рассмотрении материала виртуальная модель условного объекта реализована в приложении Simulink Desktop Real Time [23]. Такое решение часто используется при разработке ЦД без применения специализированных платформ, концепция и пример такого подхода обоснованы в [18].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В **таблице** указаны типовые времена циклов для элементов систем автоматизации металлургического оборудования при их реализации в ПЛК. Приведенные значения получены в результате анализа программного обеспечения контроллеров от производителей технологических комплексов SMS-Siemag, DANIELI, Siemens. Указанные значения у разных производителей могут различаться, но обычно они близки к указанным диапазонам. В эти значения входит время цикла программы регуляторов при условии, что сигналы обратных связей измеряются, принимаются в программу ПЛК, а выходные воздействия программы поступают в исполнительные механизмы в пределах времени, не большего, чем время цикла программы.

Времена циклов регулирования электрических и гидравлических приводов прокатных станов и технологических комплексов в металлургии

Задача	Время цикла
Регулирование положения гидравлических нажимных устройств (ГНУ)	1–3 мс
Регулирование толщины с воздействием на положение ГНУ	2–6 мс
Регулирование усилия системы противозгиба валков	5–10 мс
Система управления режимами скоростей (СУРС) листовых станов горячей прокатки	10–20 мс
СУРС станов холодной прокатки	10–20 мс
СУРС сортовых станов	20 мс
Регулирование положения либо усилия петледержателей станов горячей прокатки	5–10 мс
Регулирование положения – усилия формирующих роликов моталок	2–5 мс
Регулирование положения (зазоров) тянущих роликов, манипуляторов	10–40 мс
СУРС непрерывных технологических линий	20–40 мс
Летучие ножницы (контур регулирования положения)	5 мс
Летучие ножницы с повышенной точностью реза	от 0,5 мс

Из **таблицы** следует, что к отдельным системам предъявляются жесткие требования в отношении быстродействия при передаче сигналов. Пример построения системы управления чистовой группой стана горячей прокатки приведен в [24–26], аналогичный пример для системы управления ГНУ в структуре CAPT (HGC и AGC) рассмотрен в [27, 28]. В подобных системах ввод «быстрых» сигналов обратных связей в технологический контроллер осуществляется либо непосредственно через модули ввода-вывода, установленные в «корзине» ПЛК, либо от станций удаленного ввода-вывода. Подключение этих станций к процессору ПЛК осуществляется по информационным сетям. В современных решениях распространены интерфейсы ProfiBus DP, ModBus TCP, Profinet, EtherCat. Последние два обеспечивают цикл шины в 1 мс, кроме того, EtherCat по спецификации может работать с циклом 0,2 мс, что является перспективной технологией на ближайшее будущее.

В качестве интерфейсов датчиков, как правило, используются:

- аналоговые сигналы 4–20 мА для датчиков давления с последующим преобразованием в цифровой код;
- непосредственное подключение к информационной сети (например, ProfiBus, Profinet) или интерфейсы, подобные SSI для сигналов положения;
- аппаратные интерфейсы инкрементальных энкодеров для сигналов скорости и положения механизмов с подключением к аппаратным счетным модулям.

Интерфейс с управляемыми электро- и гидроприводами, как правило, осуществляется через информационную сеть (полевую шину – Field bus). Очевидно, что при создании ЦД для целей виртуального ввода в эксплуатацию и наладки систем автоматизации необходимо обеспечивать такое же или близкое время обмена сигналами между ПЛК и моделью, как и на реальном

объекте. Однако в приведенных рассуждениях не учитываются задержки времени, которые возникают в ЦД. Эти задержки зависят от конфигурации ЦД и, соответственно, от дополнительного времени, необходимого для поступления сигналов при обмене данными. Такая вынужденная задержка, как правило, не учитывается, но оказывает влияние на процессы обмена информацией между физическим объектом и виртуальной моделью. Поэтому оценка и учет данной задержки необходимы при создании и внедрении ЦД.

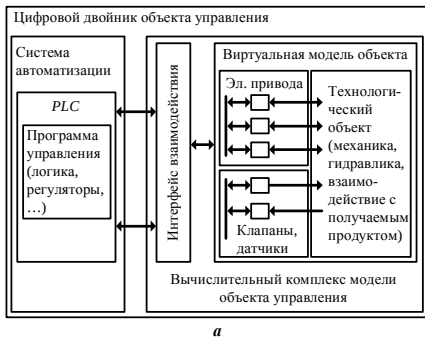
Ниже решаются следующие задачи:

- анализируются варианты размещения виртуальных моделей в компьютере и ПЛК;
- дается оценка запаздывания при обмене данными;
- предлагается схема моделирования сигналов с запаздыванием, выполняется анализ переходных процессов при введении дополнительных звеньев задержки.

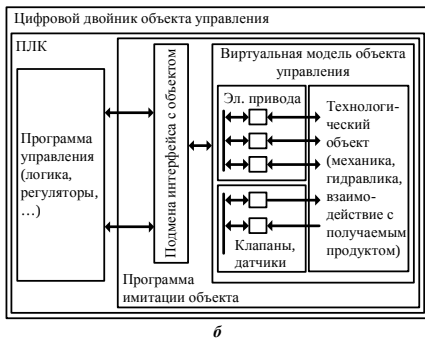
ВАРИАНТЫ РАЗМЕЩЕНИЯ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЦД

Рассматриваются следующие подходы к реализации ЦД [16]:

- реализация ВМ физического объекта на отдельном ПК, а системы управления – в ПЛК (рис. 2, а);
- размещение ВМ в программе ПЛК, в котором размещена тестируемая программа управления объектом (рис. 2, б).



а



б

Рис. 2. Варианты размещения виртуальной модели на отдельном компьютере (а) и в программном ресурсе ПЛК (б)

В последнем случае отсутствует запаздывание при передаче сигналов между основной программой ПЛК и программным обеспечением ПК (далее между ПЛК и ПК). Также нет необходимости в дополнительном оборудовании для размещения ЦД. Однако возникают ограничения на уровень детализации ВМ и, соответственно, на объем (и сложность) программы в ПЛК. В свою очередь, первый подход (размещение ВМ на отдельной машине или комплексе машин симуляции) позволяет добиться практически любой детализации модели. Она может быть разработана, например, с использованием Matlab Simulink Real Time [23]. В этом случае как раз необходимо уделять внимание возможным задержкам в обмене сигналами между ПЛК и ПК. Для исключения задержек идеальным вариантом является наличие интерфейса между ПЛК и ПК, аналогичного тому, который применяется в реальной системе. Например, если ПЛК связан с периферийными устройствами по сети EtherCat, то такой же интерфейс желательно иметь между ПЛК и моделью. Также возможна реализация обмена данными между ними на отдельно выделенной машине по интерфейсу, отличному от применяемого в реальной системе.

ПРАКТИЧЕСКИЙ ТЕСТ УСЛОВНОЙ СИСТЕМЫ

Ниже рассмотрен и протестирован способ связи между ПЛК и виртуальной моделью, размещенной на отдельном ПК, с использованием обмена через UDP-протокол (рис. 3). Рассмотрена схема, состоящая из объекта регулирования, представляющего собой последовательное соединение инерционного и интегрирующего звеньев, исполненного в Matlab Simulink Desktop Real Time, и пропорционального регулятора, размещенного в ПЛК. В качестве контроллера использован модуль OWEN PLC 210 [29] со средой CodeSys 3.5. Регистрация процессов выполнялась системой сбора данных IBA PDA через интерфейс CodeSys-Xplorer [30]. Цикл задачи регулятора и блоков обмена данными в контроллере был установлен равным 2 мс, что достижимо этим процессорным модулем для небольших задач. Связь между ПЛК и ПК организована по интерфейсу UDP. Приняты следующие настройки модели: фиксированный шаг интегрирования, равный 0,00005 с, метод решения уравнений – ode4 (Runge-Kutta). Между контроллером и ВМ передавалось по 20 сигналов в обоих направлениях в формате 16-разрядных чисел.

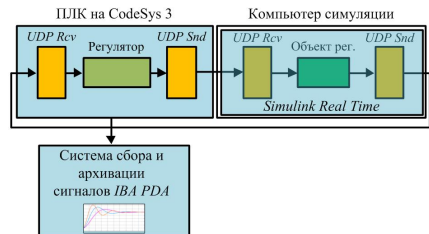


Рис. 3. Реализация ЦД в среде Matlab Simulink Desktop Real Time

В качестве примера выполнено моделирование условного объекта, схема которого представлена на рис. 4. Передаточная функция объекта

$$W_o = \frac{1}{T_0 s + 1} \frac{1}{T_2 s + 1}.$$

Приняты постоянные времени $T_0 = 0,01$ с и $T_2 = 0,1$ с, соответственно, регулятор имеет передаточную функцию

$$W_R = \frac{T_2 s}{2 T_0 s} = K_p = \frac{0,1}{2 \cdot 0,01} = 5.$$

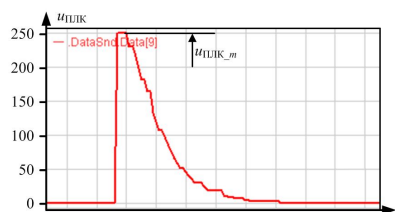
Исходя из этого, в контроллере применен П-регулятор, представленный в виде фрагмента программы:

```
LimReg(
    X_in:= Kp * (Ref - INT_TO_REAL(DriveInData.Data[9]) * K_Rcv),
    UpLim:= 100.0,
    DnLim:= -100.0,
    Y_out:=,
    AtUpLim:=,
    AtDnLim:=);
DriveOutData.Data[9]:= REAL_TO_INT(LimReg.Y_out * K_Snd);
```

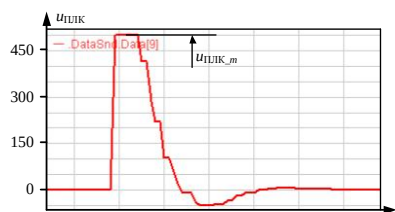
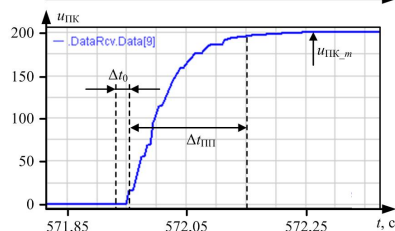
Результаты моделирования системы в Matlab Simulink Desktop Real Time приведены на рис. 5.



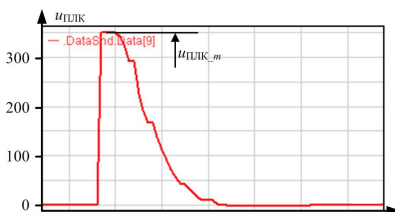
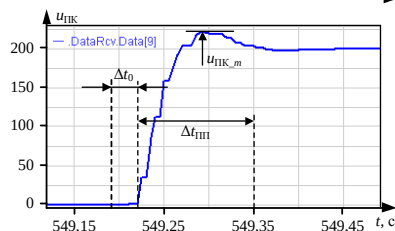
Рис. 4. Схема объекта



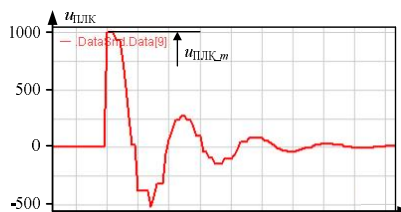
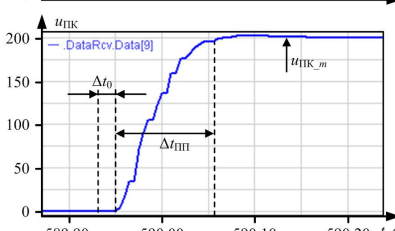
а



б



б



г

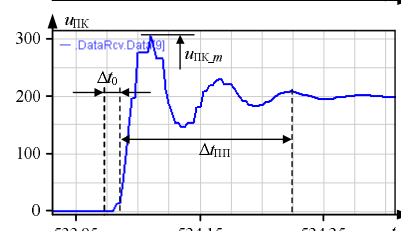


Рис. 5. Реакция тестируемой системы на скачок задания при различных коэффициентах регулятора:

а – $K_p = 1,25$; б – $K_p = 2,5$; в – $K_p = 1,25$; г – $K_p = 5$

Показаны реакции на скачок задания при разных коэффициентах K_p регулятора. В верхних окнах показаны сигналы $u_{ПЛК}$, генерируемые системой управления (в нашем случае регулятором), выполненной в ПЛК, в нижних – выходные сигналы $u_{ПК}$ виртуальной модели, размещенной в ПК, как показано на рис. 3. Время задержки сигналов Δt_0 на всех рисунках одинаково и составляет около 0,02 с. Продолжительность переходных процессов $\Delta t_{\text{п}}$ изменяется от 0,2 с на рис. 5, а до 0,3 с на рис. 5, з. Амплитуда $u_{ПК_m}$ увеличивается в 1,5 раза – от 200 у.е. (установившееся значение) до 300 у.е., амплитуда $u_{ПЛК_m}$ – в 4 раза – от 250 до 1000 у.е., что определяется величиной K_p .

Из рисунков следует, что с ростом K_p усиливаются колебательные свойства системы «регулятор – объект». Согласно приведенному выше расчету, коэффициент регулятора $K_p = 5$ должен соответствовать оптимальной настройке системы с перерегулированием в 4,3%. Однако в представленном эксперименте при $K_p = 5$ (см. рис. 5, з) система имеет явную колебательность с перерегулированием 50% ($u_{ПК_m} = 300$ у.е. при установившемся значении 200 у.е.). Как будет подтверждено ниже, это обусловлено наличием транспортного запаздывания при прямой и обратной передаче данных между ПЛК и ПК.

СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАПАЗДЫВАНИЯ СИГНАЛА В СТРУКТУРЕ ЦД

Для моделирования времени запаздывания при передаче сигнала необходимо, прежде всего, его определить. С этой целью выполнены следующие операции: сформирован пилообразный тестовый сигнал в ПЛК, далее он был передан через интерфейс UDP в программу виртуальной модели в Simulink на ПК и «возвращен обратно» в ПЛК. Оба сигнала со стороны ПЛК зафиксированы системой IBA PDA (рис. 3), результат приведен на рис. 6. Как видно из графиков, запаздывание при передаче по маршруту «ПЛК–ПК–ПЛК» составляет 10–15 мс.

К аналогичным задержкам приводит введение в структуру звена запаздывания, показанного на рис. 7, а. Для подтверждения этого исследованы процессы на модели, выполненной в Matlab Simulink (рис. 7, б), полученной путем включения в исходную структуру (см. рис. 4) двух блоков транспортного запаздывания по 5 мс.

Выполнен анализ переходных процессов, представленных на рис. 8. Зависимости построены в относительных единицах, используемых при передаче сигнала между ПЛК и ПК, они качественно соответствуют процессам, показанным на рис. 5, а и з. Отличия в параметрах процессов обусловлены тем, что на рис. 5 не приведены сигналы при нулевой задержке. Таким образом, предложенное моделирование задержки позволяет получить процессы, качественно соответствующие процессам, полученным при исследовании исходной структуры. Это позволяет сформулировать способ учета задержек, возникающих при передаче сигналов, путем включения в моделируемую структуру дополнительных блоков, параметры которых определены экспериментальным путем (см. рис. 6).

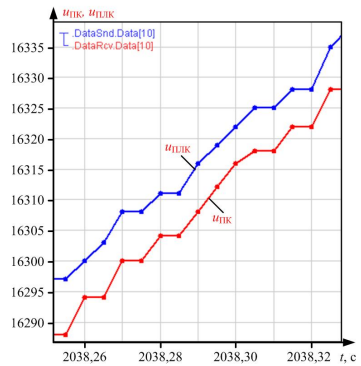


Рис. 6. К определению реального запаздывания

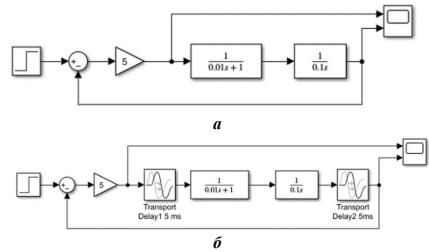


Рис. 7. Схема звена с запаздыванием (а) и исследуемая схема с дополнительными звеньями с запаздыванием (б)

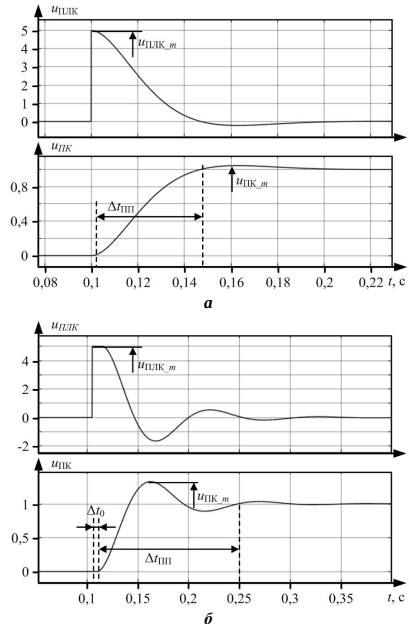


Рис. 8. Переходные процессы при $K_p = 5$ без учета (а) и с учетом (б) запаздывания

Анализ представленных зависимостей подтвердил вывод, что введение временной задержки усиливает колебательность системы. В результате время переходного процесса $t_{пл}$ увеличивается от 0,15 с на **рис. 8, а** до 0,25 с на **рис. 8, б**. Таким образом, при моделировании системы с заданной задержкой получен результат, аналогичный результату в реальной системе «ПЛК–ПК». Очевидно, что задержка при передаче сигналов оказывает влияние на процессы в более сложных структурах ЦД. Это должно учитываться при разработке ЦД и выборе интерфейса взаимодействия между ПЛК и ПК.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ДИСКРЕТНОСТИ ПРОГРАММЫ ПЛК

В схемах, представленных на **рис. 7**, можно также учесть влияние дискретного характера программы контроллера. Это объясняется тем, что в рассматриваемом примере цикл программы ПЛК составляет 2 мс, что соизмеримо с временами циклов опроса электро- и гидрориводов, приведенных в **таблице**. Для учета дискретных свойств в схему на **рис. 7, б** дополнительно введены звенья Zero-Order Hold_1 и Zero-Order Hold_2. Полученная структура представлена на **рис. 9**, исходный вариант показан в верхней части рисунка. Дополнения внесены в нижнюю часть: звено Zero-Order Hold_1 включено на вход регулятора, звено Zero-Order Hold_2 – в цепь обратной связи. На контрольно-измерительном устройстве (справа) производится сравнение сигналов исходной и преобразованной схем.

Расчетные зависимости, представленные на **рис. 10**, позволяют выполнить оценку влияния дискретности. Они аналогичны приведенным на **рис. 5**.

На **рис. 10** обозначены: 1 – зависимости в контуре со звеном Order Hold_1; 2 – те же зависимости в исходной системе. Как видно, ошибка из-за неучета дискретного характера регулятора невелика, так как запаздывание в разы больше дискреты (шага программы) регулятора.

Рассмотренный пример оценки запаздываний является не единственным. Аналогичные результаты получены для реального электропривода клетки, гидравлических нажимных устройств в структуре САР толшины стана 5000. Также с использованием предложенного способа проведен анализ временных запаздываний в мехатронных системах прокатной клетки и моталки широкополосного стана горячей прокатки.

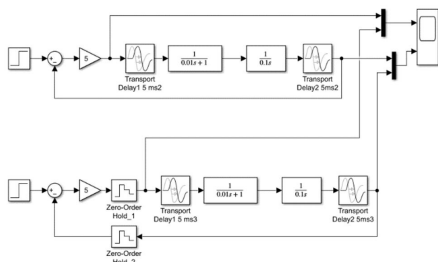


Рис. 9. Схема исследуемого объекта с дополнительными блоками, имитирующими дискретность ПЛК

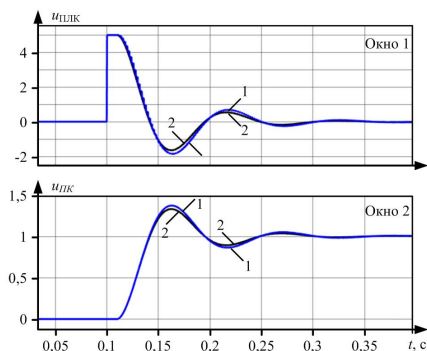


Рис. 10. Результаты сравнения переходных процессов: выходные сигналы регулятора (окно 1) и реакция объекта регулирования (окно 2)

Преимуществом предложенного способа является то, что сравниваются сигналы непосредственно в структуре САР и на ее выходе (то есть с учетом задержек, вносимых интерфейсом). Это позволяет оценивать запаздывания в любых электромеханических и гидравлических системах независимо от их сложности. Поэтому разработанный способ рекомендуется для применения при виртуальной наладке и вводе в эксплуатацию мехатронных комплексов не только прокатных станов, но и других промышленных объектов.

В целом представленные результаты являются подтверждением необходимости учета задержек при передаче сигналов в структурах цифровых двойников приводов прокатного стана и актуальности выполненных исследований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. При использовании виртуальных моделей ЦД в виде программ на выделенных вычислительных машинах необходимо учитывать запаздывания сигналов, которые вносит интерфейс между ПЛК и ПК. В исследуемом случае интерфейс UDP обеспечивает суммарное запаздывание в пределах 10 мс, что соизмеримо с реальными задержками сетей типа ProfiBus или Mod-Bus TCP и модулей ввода-вывода.

2. Предложен способ определения задержек, возникающих при обмене информацией в структуре цифрового двойника. Он включает следующие операции:

- формирование тестового сигнала в ПЛК (в рассмотренном случае – пилообразного сигнала);
- передачу тестового сигнала через интерфейс UDP в программу виртуальной модели в Simulink на ПК и «возвращение обратно» в ПЛК;
- фиксацию обоих сигналов на выходе ПЛК системой IBA PDA, вычисление временной задержки путем сопоставления осциллограмм.

3. На конкретном примере сделан вывод, что задержки в реальной системе соизмеримы с задержками в ЦД при использовании предложенного способа обмена информацией между ПЛК и симулятором по UDP-протоколу. При этом запаздывания, обусловленные дискретным характером программы контроллера, незначительны.

4. Для ограничения величины запаздывания целесообразно применять схему, представленную на рис. 2, б. В ней выполнено совместное размещение виртуальной модели и структуры системы управления в ресурсах ПЛК. Это исключает использование промежуточного интерфейса и тем самым снижает задержку при обмене информацией. Однако в каждом случае следует давать оценку погрешностям, обусловленным применением упрощенных моделей, что вызвано ограниченным ресурсом ПЛК.

5. Разработанный способ определения запаздываний, вносимых интерфейсом системы обмена информацией, рекомендуется для использования при настройке и виртуальном вводе в эксплуатацию ЦД электромеханических и гидравлических систем независимо от их сложности.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Lim K.Y.H., Zheng P., Chen C.-H. A state-of-the-art survey of Digital Twin: techniques, engineering product lifecycle management and business innovation perspectives // *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2020. No. 31. Pp. 1313-1337. doi: 10.1007/s10845-019-01512-w
2. Smart manufacturing systems: state of the art and future trends // Y.J. Qu, X.G. Ming, Z.W. Liu, X.Y. Zhang, Z.T. Hou // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2019. No. 103. Pp. 3751-3768. doi: 10.1007/s00170-019-03754-7
3. Prediction for Manufacturing Factors in a Steel Plate Rolling Smart Factory Using Data Clustering-Based Machine Learning // Ch.Y. Park, J.W. Kim, B. Kim, J. Lee // *IEEE Access*. 2020. No. 8. Pp. 60890-60905. doi: 10.1109/access.2020.2983188
4. Экспериментальное определение параметров двухмассовой электромеханической системы прокатного стана / А.С. Карандаев, А.А. Радионов, Б.М. Логинов, О.А. Гасиярова, Е.А. Гартлиб, В.Р. Храмшин // *Известия высших учебных заведений. Электромеханика*. 2021. №3(64). С. 24-35. doi: 10.17213/0136-3360-2021-3-24-35
5. Бычков М.Г., Кузнецова В.Н. Реализация коррекции управляющих воздействий многокоординатного сервопривода на базе программируемого логического контроллера // *Электротехнические системы и комплексы*. 2014. №1(22). С. 7-13.
6. Ишматов З.ИИ. Микропроцессорное управление электроприводами и технологическими объектами, полиномиальные методы: монография. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2007. 278 с.
7. Лебедев С.К., Колганов А.Р., Гнездов Н.Е. Электромехатронные системы позиционирования с наблюдаемыми нагрузками: монография. Иваново: ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В. И. Ленина», 2016. 340 с.
8. Лебедев С.К., Колганов А.Р. Управление движением промышленных манипуляторов. Иваново: ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В. И. Ленина», 2018. 340 с.
9. Vukosavic S.N. *Digital Control of Electrical Drives*. Springer, 2007. doi: 10.1007/978-0-387-48598-0
10. Nevaranta N. Review on Oversampling Approaches for Control and Estimation in Electrical Drives // *IEEE 19th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*. 2021. 6 p. doi: 10.1109/INDIN45523.2021.9557456
11. Real-time simulator and offline/online closed-loop test bed for power system modeling and development / A. Parizad, H.R. Baghaee, M.E. Iranian, G.B. Gharehpetian, J.M. Guerrero // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2020. 122. 106203. doi: 10.1016/j.ijepes.2020.106203
12. Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification / W. Kritzinger, M. Karner, G. Traar, J. Henjes, W. Sihn // *IFAC-PapersOnLine*. 2018. No. 11(51). Pp. 1016-1022. doi: 10.1016/j.ifacol.2018.08.474
13. Yildiz E., Moller C., Bilberg A. Virtual Factory: Digital Twin Based Integrated Factory Simulations. *Procedia CIRP*. 2020. No. 93. Pp. 216-221. doi: 10.1016/j.procir.2020.04.043
14. Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research / A. Fuller, Z. Fan, C. Day, C. Barlow // *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. Pp. 108952-108971. doi: 10.1109/ACCESS.2020.2998358
15. LeBlanc, Mollie B. Digital twin technology for enhanced upstream capability in oil and gas. Master of science in engineering and management at the massachusetts institute of technology. URL: <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/132840> (дата обращения 07.10.2023)
16. Концептуальные направления создания цифровых двойников электротехнических систем агрегатов прокатного производства / А.А. Радионов, А.С. Карандаев, Б.М. Логинов, О.А. Гасиярова // *Известия вузов. Электромеханика*. 2021. Т. 64. № 1. С. 54-68. doi: 10.17213/0136-3360-2021-1-54-68
17. Construction Principle for Object-Oriented Digital Twins of Mechatronic Complexes of Rolling Mills / A.A. Radionov, P.A. Bovshik, B.M. Loginov, A.S. Karandaev, V.R. Khramshin // *International Russian Smart Industry Conference (SmartIndustryCon)*. IEEE, 2023. Pp. 516-522. doi: 10.1109/SmartIndustryCon57312.2023.10110770
18. Substantiating and Implementing Concept of Digital Twins for Virtual Commissioning of Industrial Mechatronic Complexes Exemplified by Rolling Mill Coilers / V.R. Gasiyarov, P.A. Bovshik, B.M. Loginov, A.S. Karandaev, V.R. Khramshin, A.A. Radionov // *Machines*. 2023. No. 11(2). 276. <https://doi.org/10.3390/machines11020276>
19. Research and application of computer control system for aluminium single-stand 4-high cold rolling mill / F. Zhang, X. Wang, S. Zong, X. Xiang // *Journal of Engineering*. 2016. No. 11(2016). Pp. 415-422. doi: 10.1049/joe.2016.0182
20. Наблюдатель упругого момента двухмассовой электро-механической системы / А.С. Карандаев, Б.М. Логинов, Е.Г. Бодров, В.Р. Храмшин, М.Н. Самодурова // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика»*. 2022. №4(22). С. 23-33. doi: 10.14529/power220403
21. Allmeling J. Model continuity: From offline simulation to real-time testing. URL: <https://www.powerelectronicsnews.com/model-continuity-from-offline-simulation-to-real-time-testing/> (дата обращения 07.10.2023)
22. Characterising the Digital Twin: A systematic literature review / D. Jones, C. Snider, A. Nassehi, J. Yon, B. Hicks // *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2020. Vol. 29(A). Pp. 36-52. doi: 10.1016/j.cirpj.2020.02.002
23. Desktop Real-Time Run Simulink models in real time on your computer. URL: <https://www.mathworks.com/products/simulink-desktop-real-time.html> (дата обращения 07.10.2023)
24. Технологические схемы управления электроприводами чистойовой группы широкополосного стана горячей прокатки / А.С. Карандаев, В.Р. Храмшин, И.Ю. Андришин, В.В. Головин, П.В. Шиялев // *Труды VII конгресса прокатчиков*. М., 2007. Т.1. С. 71-75.
25. Новые технические решения в электроприводах и системах регулирования технологических параметров станов горячей прокатки / А.С. Карандаев, В.Р. Храмшин, И.Ю. Андришин, В.В. Головин, П.В. Шиялев, С.А. Петряков, А.А. Лукин // *Известия ТулГУ. Технические науки*. 2010. №3(2). С. 34-40.

26. Автоматическая коррекция скоростей электроприводов клеток стана 2000 при прокатке трубной заготовки / И.Ю. Андришин, В.В. Галкин, В.В. Головин, А.С. Карандаев, А.А. Радионов, В.Р. Храмшин // Известия вузов. Электромеханика. 2011. № 4. С. 31-35.
27. Математическая модель взаимосвязанных электротехнических систем непрерывной группы широкополосного стана / В.Р. Храмшин, И.Ю. Андришин, А.Н. Гостев, А.С. Карандаев // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2013. №1. С. 12-21.
28. Автоматическая коррекция толщины головного участка полосы в гидравлической системе автоматического регулирования толщины широкополосного стана горячей прокатки / В.В. Галкин, С.А. Петряков, А.С. Карандаев, В.Р. Храмшин // Известия вузов. Электромеханика. 2011. № 4. С. 46-50.
29. ПЛК210 контроллер для средних и распределенных систем автоматизации. URL: <https://owen.ru/product/plk210?ysclid=lltrj898qq32279535> (дата обращения 07.10.2023)
30. ibaPDA Масштабируемое базовое ПО для сбора измеренных данных. URL: <https://www.iba-ag.com/ru/ibapda> (дата обращения 07.10.2023)

Поступила в редакцию 06 сентября 2023 г.

Принята к печати 15 октября 2023 г.

INFORMATION IN ENGLISH

TIME LAG ASSESSMENT DURING INFORMATION INTERCHANGE WITHIN THE DIGITAL TWINS STRUCTURES OF ELECTROMECHANICAL AND HYDRAULIC SYSTEMS

Boris M. Loginov

Ph.D. (Engineering), Department of Industrial Electric Power Supply, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, lb18@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3337-3148>

The development of object-oriented digital twins (DTs) is relevant for the virtual commissioning and adjustment of electromechanical and hydraulic systems of rolling mills. An important task solved with the use of digital data is the configuration of control systems. A comparison is given of information transmission structures in digital models, digital shadows and DTs. Options for placing a virtual model of an object and a control system algorithm on a personal computer (PC) or in a programmable logic controller (PLC) resource are considered. The relevance of assessing signal delays when placing a control program in a PLC and an object model in a PC is emphasized; insufficient knowledge of this issue is noted. It is shown that additional delay is introduced by the difference between PLC and PC interfaces. This results in distortion of information exchange between the object and the control system and disruption of the twinning process. A study of the central dynamics of a conditional discrete object with a proportional controller was carried out. The virtual model is implemented in the Matlab Simulink Desktop Real Time environment on a PC, the control system is implemented in the PLC programming language. By comparing oscillograms obtained at different regulator gains, it is proven that the delay in signal transmission results in its distortion and in an increase in the oscillatory properties of the system. A method is proposed for determining delays that occur during the exchange of information in the structure of a digital twin, including transmitting a test signal via the UDP interface to a virtual model program on a PC and "returning" to the PLC, recording both signals at the PLC output and calculating the time delay. The definition of the delay is considered by estimating the time shift of the sawtooth signal entering the PLC input and its response after "returning" from the PC. In order to simulate delays when developing a control algorithm, it is proposed to include additional discrete links in the structure of the system. An assessment is made of the influence of the discrete nature of the PLC program on the delay of signals. It has been proven that delays due to this reason are insignificant and can be neglected. The results obtained and the method for determining delays are recommended for use in creating object-oriented digital twins of mechatronic rolling mill complexes.

Keywords: electromechanical system, digital twin, development, controller, personal computer, placement, data exchange, delay, definition, method, modeling, recommendations

REFERENCES

1. Lim K.Y.H., Zheng P., Chen C.-H. A state-of-the-art survey of Digital Twin: techniques, engineering product lifecycle management and business innovation perspectives. *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2020, no. 31, pp. 1313-1337. doi:10.1007/s10845-019-01512-w
2. Qu Y.J., Ming X.G., Liu Z.W., Zhang X.Y., Hou Z.T. Smart manufacturing systems: state of the art and future trends. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2019, no. 103, pp. 3751-3768. doi:10.1007/s00170-019-03754-7
3. Park Ch.Y., Kim J.W., Kim B., Lee J. Prediction for Manufacturing Factors in a Steel Plate Rolling Smart Factory Using Data Clustering-Based Machine Learning. *IEEE Access*. 2020, no. 8, pp. 60890-60905. doi:10.1109/access.2020.2983188
4. Karандаев А.С., Радионов А.А., Loginov В.М., Гасиярова О.А., Гартлиб Е.А., Храмшин В.Р. Experimental calculation of a rolling stand two-mass electromechanical system parameters. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika*. [Bulletin of Higher Educational Institutions. Electromechanics], 2021, no. 3(64), pp. 24-35. doi:10.17213/0136-3360-2021-3-24-35 (In Russian)
5. Bychkov M.G., Kuznetsova V.N. Implementation of control action adjustment at the multicoordinate servo drive based on programmable logic controller. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical systems and complexes], 2014, no. 1(22), pp. 7-13. (In Russian)
6. Ishmatov Z.Sh. *Mikroprotessornoe upravlenie elektropriivodami i tekhnologicheskimi objektami, polinomialnye metody* [Microprocessor control of electric drives and production facilities, polynomial methods]. Ekaterinburg, USTU-UPU Publ., 2007. 278 p.
7. Lebedev S.K., Kolganov A.R., Gnezdov Kh.E. *Elektromekhatronnye sistemy pozitsionirovaniya s nablyudatelnyami nagruzki* [Electro-mechatronic positioning systems with load observation sensor]. Ivanovo, FGBOU VPO V.I. Lenin Ivanovo State Electric Power University Publ., 2016. 340 p.
8. Lebedev S.K., Kolganov A.R. *Upravlenie dvizheniem promyshlennykh manipulyatorov* [Industrial Manipulator Control]. Ivanovo, FGBOU VPO V.I. Lenin Ivanovo State Electric Power University Publ., 2018. 340 p. (In Russian)
9. Vukosavic S.N. Digital Control of Electrical Drives. *Springer*, 2007. doi:10.1007/978-0-387-48598-0
10. Nevaranta N. Review on Oversampling Approaches for Control and Estimation in Electrical Drives. *IEEE 19th Interna-*

- tional Conference on Industrial Informatics (INDIN). 2021. 6 p. doi:10.1109/INDIN45523.2021.9557456
11. Parizad A., Baghaee H.R., Irianian M.E., Gharehpajian G.B., Guerrero J.M. Real-time simulator and offline/online closed-loop test bed for power system modeling and development. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2020. 122. 106203. doi: 10.1016/j.ijepes.2020.106203
 12. Kritzinger W., Karner M., Traar G., Henjes J., Sihl W. Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. *IFAC-Papers On Line*. 2018, no. 11(51), pp. 1016-1022. doi: 10.1016/j.ifacol.2018.08.474
 13. Yildiz E., Moller C., Bilberg A. Virtual Factory: Digital Twin Based Integrated Factory Simulations. *Procedia CIRP*. 2020, no. 93, pp. 216-221. doi: 10.1016/j.procir.2020.04.043
 14. Fuller A., Fan Z., Day C., Barlow C. Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research. *IEEE Access*. 2020, vol. 8, pp. 108952-108971. doi: 10.1109/ACCESS.2020.2998358
 15. LeBlanc, Mollie B. Digital twin technology for enhanced upstream capability in oil and gas. Master of science in engineering and management at the massachusetts institute of technology. Available at: <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/132840> (accessed 07 October 2023)
 16. Radionov A.A., Karandaev A.S., Loginov B.M., Gasiyarova O.A. Conceptual trends in developing digital twins of rolling line electrified systems. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika*. [Bulletin of Higher Educational Institutions. Electromechanics], 2021, vol. 64, no. 1, pp. 54-68. doi: 10.17213/0136-3360-2021-1-54-68 (In Russian)
 17. Radionov A.A., Bovshik P.A., Loginov B.M., Karandaev A.S., Khramshin V.R. Construction Principle for Object-Oriented Digital Twins of Mechatronic Complexes of Rolling Mills. *International Russian Smart Industry Conference (SmartIndustryCon)*. IEEE, 2023, pp. 516-522. doi: 10.1109/SmartIndustryCon57312.2023.10110770
 18. Gasiyarov V.R., Bovshik P.A., Loginov B.M., Karandaev A.S., Khramshin V.R., Radionov A.A. Substantiating and Implementing Concept of Digital Twins for Virtual Commissioning of Industrial Mechatronic Complexes Exemplified by Rolling Mill Coilers. *Machines*. 2023, no. 11(2), 276. <https://doi.org/10.3390/machines11020276>
 19. Zhang F., Wang X., Zong S., Xiang X. Research and application of computer control system for aluminium single-stand 4-high cold rolling mill. *Journal of Engineering*. 2016, no. 11(2016), pp. 415-422. doi: 10.1049/joe.2016.0182
 20. Karandaev A.S., Loginov B.M., Bodrov E.G., Khramshin V.R., Samodurova M.N. Elastic moment sensor. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya «Energetika»* [Bulletin of South Ural State University. Series "Power Engineering"], 2022, no. 4(22), pp. 23-33. doi: 10.14529/power220403 (In Russian)
 21. Allmeling J. Model continuity: From offline simulation to real-time testing. Available at: <https://www.powerelectronicsnews.com/model-continuity-from-offline-simulation-to-real-time-testing/> (accessed 07 October 2023)
 22. Jones D., Snider C., Nassehi A., Yon J., Hicks B. Characterising the Digital Twin: A systematic literature review. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2020, vol. 29(A), pp. 36-52. doi:10.1016/j.cirpj.2020.02.002
 23. Desktop Real-Time Run Simulink models in real time on your computer. Available at: <https://www.mathworks.com/products/simulink-desktop-real-time.html> (accessed 07 October 2023)
 24. Karandaev A.S., Khramshin V.R., Andryushin I.Yu., Golovin V.V., Shilyaev P.V. Production Control Schemes of Wide-strip Hot Rolling Stand Finishing Train Electric Drives. *Trudy VII kongressa prokatchikov* [Papers of VII Roller Congress], Moscow, 2007, vol. 1, pp. 71-75. (In Russian)
 25. Karandaev A.S., Khramshin V.R., Andryushin I.Yu., Golovin V.V., Shilyaev P.V., Petryakov S.A., Lukin A.A. New Technological Solutions in Electric Drives and in Hot Rolling Stand Production Parameters Control Systems. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki*. [Izvestiya Tula State University], 2010, no. 3(2), pp. 34-40. (In Russian)
 26. Andryushin I.Yu., Galkin V.V., Golovin V.V., Karandaev A.S., Radionov A.A., Khramshin V.R. Automatic Velocity Adjustment of 2000 Rolling Stand Electric Drives in the Process of Pipe Shell Rolling. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika* [Bulletin of Higher Educational Institutions. Electromechanics], 2011, no. 4, pp. 31-35. (In Russian)
 27. Khramshin V.R., Andryushin I.Yu., Gostev A.N., Karandaev A.S. Mathematical Model of Interrelated Electrical Systems of a Wide-Strip Stand Continuous Train. *Mashinostroenie: setevoy elektronnyi nauchnyi zhurnal* [Russian Internet Journal of Industrial Engineering], 2013, no. 1, pp. 12-21. (In Russian)
 28. Galkin V.V., Petryakov S.A., Karandaev A.S., Khramshin V.R. Automatic adjustment of strip head section thickness in the hydraulic system of automatic thickness control at a wide-strip hot rolling mill. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika* [Bulletin of Higher Educational Institutions. Electromechanics], 2011, no. 4, pp. 46-50. (In Russian)
 29. PLC210 controller for middle-level and distributed automation systems. Available at: <https://owen.ru/product/plk210?ysclid=ltlpj898qq32279535> (accessed 7 October 2023) (In Russian)
 30. ibaPDA Scalable basic software for measured data collection. Available at: <https://www.iba-ag.com/ru/ibapda> (accessed 7 October 2023) (In Russian)

Логонов Б.М. Оценка временных задержек при обмене информацией в структурах цифровых двойников электромеханических и гидравлических систем // Электротехнические системы и комплексы. 2023. № 4(61). С. 67-75. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-4\(61\)-67-75](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-4(61)-67-75)

Loginov B.M. Time Lag Assessment during Information Interchange within the Digital Twins Structures of Electromechanical and Hydraulic Systems. *Elektrotekhnicheskie sistemy i kompleksy* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2023, no. 4(61), pp. 67-75. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-4\(61\)-67-75](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-4(61)-67-75)

¹Донецкий национальный технический университет

²Макеевский научно-исследовательский институт по безопасности работ в горной промышленности, Донецкая область

МЕТОД ИДЕНТИФИКАЦИИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ДУГОВОГО ПРОБОЯ НА ОСНОВЕ ДИСКРЕТНОГО ВЕЙВЛЕТ-АЛГОРИТМА

С целью исключения ложных срабатываний устройства защиты от дугового пробоя (УЗДП) проведен поиск новых и рассмотрены комбинации уже существующих методов обработки входящих на микроконтроллер данных, которые могут значительно отличаться от вида подключаемой в сеть нагрузки. В результате исследований разработан новый метод идентификации последовательных дуговых замыканий в электрической сети жилых зданий на основе дискретного вейвлет-преобразования (DWT). Метод включает в себя дискретно-временной анализ на основе моделирования в математическом пакете Matlab экспериментальных кривых тока с дуговыми пробоями, а также извлечение признаков дугового пробоя с использованием метода обработки сигнала, называемого вейвлетами семейства Daubechies *db4*. Верификация и сравнительный анализ модели обнаружения последовательного дугового пробоя рассмотрен на примере двух типовых нагрузок бытовой электрической сети: обогреватель мощностью 2,2 кВт и пылесос с симисторным регулятором мощности. Установлено, что дуговые пробои имеют уникальные особенности в своих кривых тока, а именно уровни нормализованных в относительных единицах коэффициентов детализации *cd DWT* во временной области на частоте дискретизации 10 кГц показывают значения: 1 уровень – от 0,2 до 0,5 и выше, 2 уровень – от 0,05 до 0,2 и выше. Установлено, что уровни нормализованных в относительных единицах коэффициентов детализации *DWT* во временной области на частоте дискретизации 10 кГц при нормальной работе в каждом масштабе относительно малы: 1 уровень < 0,1 и 2 уровень < 0,04. Это позволяет характеризовать интенсивность искрения матрицей *SAF*, строки которой соответствуют уровню нормализованного *cd1*, а столбцы – номеру полупериода 1...10.

Ключевые слова: дуговой пробой, электрическая сеть, потребитель электроэнергии, вейвлет-преобразование, переходной процесс, сила тока, частота дискретизации, микроконтроллер

ВВЕДЕНИЕ

В распределительных сетях низкого напряжения существует высокий риск возникновения пожаров, вызванных неисправностями электропроводки.

Отметим, что последние 5 лет в Российской Федерации пожары от электроустановок занимают лидирующее место и составляют более 34% от их общего числа [1]. Около 90% этого объема приходится на жилой сектор, где основной причиной пожаров являются неисправности кабельных изделий, электроустановочных устройств (электрические розетки, вилки, выключатели, разветвители и т.п.) и осветительных приборов.

Одной из распространенных причин пожаров являются дуговые пробои, которые в основном возникают из-за электрических проблем, таких как старение кабелей и ослабление контактных соединений. Создавая высокую температуру и распыляя расплавленный металл, дуговые пробои в конечном итоге приводят к пожарам по электротехническим причинам [2].

Обычные защитные устройства, такие как автоматические выключатели, предохранители или прерыватели тока утечки не способны обнаружить эту неисправность, так как ток дуги остается ниже уровней отключения теплового или мгновенного расцепителей.

Известны два типа дуговых замыканий: последовательные и параллельные. Первый тип, показанный на рис. 1, а, является наиболее распространенным и возникает при обрыве одного силового проводника. Максимальный ток дуги ограничивается током нагрузки

из-за последовательного соединения и, в зависимости от этого тока, может выделяться или не выделяться значительное количество тепла, вызывающего пожароопасное состояние ослабленных контактов.

Параллельное дуговое замыкание, показанное на рис. 1, б, возникает между нейтральным и фазным проводником, когда изоляция повреждена из-за механического, температурного напряжения или старения. В этом случае высокоомная дуга сначала расплавляет и карбонизирует изоляцию, а затем образуется токовый тракт, который может повлечь возгорание.

Устройства защиты от образования дугового пробоя (УЗДП) уже существуют и представляют собой микропроцессорный модульный релейный аппарат, предназначенный для электрической цепи класса до 0,4 кВ. Но эксперименты показывают, что они часто не устраняют такие неисправности [3].

При проектировании и эксплуатации УЗДП также остались не решенными полностью проблемы, вызванные ложными срабатываниями из-за электромагнитных помех, не связанных с аварийным искрением.

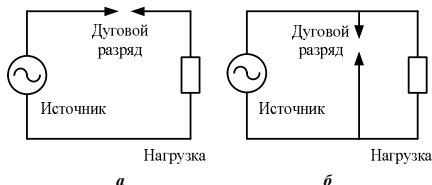


Рис. 1. Дуговое замыкание: последовательное (а) и параллельное (б)

А. Недостатки существующих подходов.

Многие из существующих подходов к обнаружению дуговых замыканий изучают форму сигнала тока и его первую и вторую производные, чтобы идентифицировать пики, нулевые «площадки» или быстрое нарастание фронта после нулевой «площадки» [4]. Другим способом распознать возникновение дуги является анализ широкополосного высокочастотного (ВЧ) шума в диапазоне от 5 до 50 МГц. Например, в [5] высокочастотный компонент анализируется путем построения срезов трехмерной поверхности на основе биспектра. В других источниках неперIODичность сигнала рассматривается как критерий обнаружения дуги [6]. Для методов обнаружения ВЧ принятые методы цифровой обработки сигналов приводят к необходимости точного измерения ВЧ-составляющих и, следовательно, высокой частоты дискретизации [7], что требует высокочастотных микроконтроллеров и АЦП.

Функция «нулевой паузы» сама по себе не подходит для нелинейных нагрузок в качестве метода обнаружения и требуется её дальнейшая обработка.

В то же время наиболее перспективным с точки зрения диагностических характеристик можно признать развиваемые в последнее время для извлечения признаков неисправности (дугового пробоя) Вейвлет-преобразования [8]. Они позволяют учитывать нестационарность токовых сигналов дугового пробоя и адаптировать к сигналу выбор параметров окна по времени.

Можно классифицировать непрерывные вейвлет-преобразования (CWT) и дискретные вейвлет-преобразования (DWT).

Вейвлеты – это математические функции, похожие на синусоидальные волны, с той разницей, что они имеют «конечную колебательную природу». Дискретное вейвлет-преобразование оказалось полезным при анализе переходных процессов, таких как те, которые связаны с дуговыми пробоями в электропроводке жилых зданий.

Б. Анализ дискретного вейвлет-преобразования.

Итеративный процесс анализа сигнала в рамках набора фильтров DWT называется анализом с несколькими разрешениями (MRA). На первом этапе декомпозиции сигнал поступает в фильтр нижних частот (LPF), специфичный для определенной функции масштабирования основного вейвлета. Коэффициенты аппроксимации (ca) могут быть получены после свертки выборок сигнала с коэффициентами передаточной функции низкочастотного фильтра g и понижающей дискретизацией в 2 раза, то есть исходная длина вектора данных уменьшается вдвое [9].

$$y_{low}[n] = \sum_k g_k x_{2^{j-1}}[n - 2^{j-1}k], \quad (1)$$

где g_k – параметры НЧ фильтра; k – порядок коэффициента фильтра ($k \in \mathbb{Z}$ и принимает как отрицательные, так и положительные значения); n – номер точки обрабатываемого сигнала; j – уровень вейвлет-преобразования (декомпозиции).

Чтобы получить коэффициенты детализации (cd) сигнала на первом уровне декомпозиции, его необходимо ввести в высокочастотный фильтр h , специфичный для вейвлет-функции, и свернуть его выборки с

параметрами передаточной функции фильтра, также затем уменьшив дискретизацию в 2 раза (рис. 2).

$$y_{high}[n] = \sum_k h_k \cdot x_{2^{j-1}}[n - 2^{j-1}k], \quad (2)$$

где h_k – параметры ВЧ фильтра.

На втором уровне декомпозиции коэффициенты аппроксимации, полученные на первом этапе, будут обрабатываться таким же образом, как при обработке входного сигнала для получения коэффициентов ca и cd .

Существование такого набора фильтров зависит от двух типов функций, которые являются функцией масштабирования и вейвлет-функцией, специфичных для определенных типов материнских вейвлетов.

ОБНАРУЖЕНИЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ДУГОВОГО ЗАМЫКАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДИСКРЕТНОГО ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

Исключение ложных срабатываний УЗДП достигается за счет поиска новых и комбинации уже существующих методов обработки входящих на микроконтроллер данных, которые могут значительно отличаться от вида подключаемой в сеть нагрузки.

В данной работе предложен новый метод обнаружения последовательного дугового пробоя в электрической сети жилых помещений.

Для применения алгоритма обнаружения неисправностей, первоначально собраны и обобщены данные экспериментальных исследований, которые проводились на платформе (рис. 3) с шагом по времени: 0,004 мкс; 0,2 мкс; 0,01 мс; 0,04 мс; 0,1 мс; 0,4 мс. В дальнейшем при разработке алгоритма распознавания выбирался шаг по времени 0,1 мс с учетом реализации на доступном микроконтроллере STM32F401CU6.

Исследуемая нагрузка 7 подключена через штепсельное соединение 6 (вилка-розетка) к сети 1 через контактор 2 и резистивный шунт 4. Формирование переходных процессов с искрениями при включении и отключении нагрузки происходит за счет контактов однофазного контактора, управляемого кнопкой 3 включения его катушкой.

Принудительная генерация искрений при работе нагрузки достигается за счет обеспечения дребезга в месте присоединения неизолированного проводника к зажиму контактора.

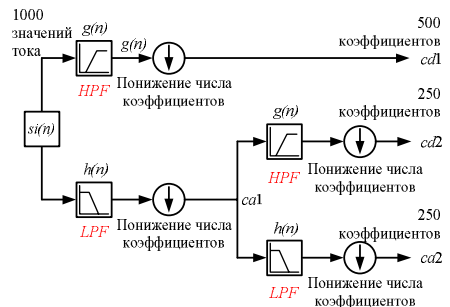


Рис. 2. DWT-анализ с несколькими масштабными разрешениями

Измерение переходных процессов силы тока в нагрузке от времени (рис. 4 и 5) обеспечивается за счет резистивного шунта 4 с коэффициентом преобразования 1В/1А, подключенного к осциллографу 5. Данные зависимости нормализовались путем приведения к безразмерному виду $i(t)/i_{\max}$.

Для моделирования и обработки сигналов токов дуговых пробоев использовался математический пакет Matlab. Вейвлет-анализ токовых диаграмм нагрузок электросетей офисной и бытовой нагрузки 0,4 кВ выполнялся в пакете «WaveletToolbox» Matlab [10].

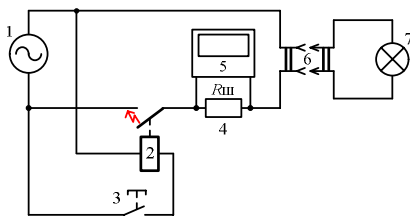


Рис. 3. Схема экспериментального стенда для получения кривой тока дугового пробоя: 1 – сеть 220 В, 50 Гц; 2 – контактор однофазный (формирователь дуги); 3 – кнопка включения катушки контактора; 4 – резистивный шунт 1 Ом (для измерения силы тока); 5 – осциллограф запоминающий типа TDS 2022; 6 – розетка и вилка для подключения бытовой нагрузки; 7 – бытовая нагрузка (LED лампа, пылесос, дрель)

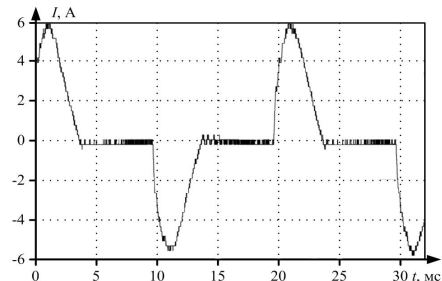


Рис. 4. Кривая тока пылесоса с симисторным регулятором мощности в нормальном режиме работы (шаг – 0,008 мс)

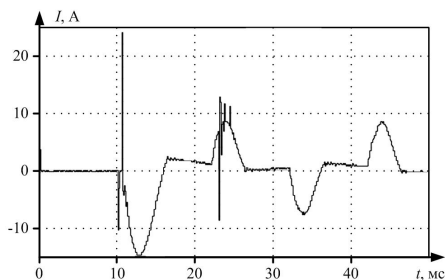


Рис. 5. Кривая тока пылесоса с симисторным регулятором мощности в режиме последовательного дугового пробоя при ослабленном контакте (шаг – 0, 1 мс)

Дискретно-временной анализ осуществлялся функцией *wavedec*, которая возвращает векторы одномерного дискретного многоуровневого вейвлет-преобразования.

Ее синтаксис:

$$[c, l] = \text{wavedec}(I_d, \text{level_max}, \text{'filter'}), \quad (3)$$

где I_d – одномерный сигнал; *level_max* – максимальный уровень преобразования; *'filter'* – тип вейвлета, например, *'db4'*; $[c, l]$ – выходные векторы разложения.

Для извлечения коэффициентов детализации *cd* на уровнях *levels=1, 2...level_max* использована функция *detcoef* с синтаксисом:

$$cd = \text{detcoef}(c, l, \text{levels}). \quad (4)$$

cd при *level_max=7* представляет собой структуру в виде $\{(512 \times) (261 \times 1) \dots (14 \times 1)\}$ с векторами *cd1, cd2...cd7* на соответствующих номеру вектора уровнях вейвлет-преобразования.

Коэффициенты аппроксимации *ca* на уровнях *levels=1, 2...level_max* извлекаются функцией *appcoef* с синтаксисом:

$$ca(i) = \text{appcoef}(c, l, \text{'filter'}, j), \quad (5)$$

где *j* – уровень преобразования.

ca(i) возвращает коэффициенты аппроксимации на уровне преобразования *I* и представляет собой структуру в виде $\{(512 \times) (261 \times 1) \dots (14 \times 1)\}$ с векторами *ca1, ca2...ca7*.

Затем признаки дугового пробоя извлекались с использованием метода обработки сигнала, называемого вейвлетами семейства Daubechies *db4*. Алгоритм также включал использование пороговых значений, обнаружение пиков и отключение реле. Верификация и сравнительный анализ модели обнаружения последовательного дугового пробоя рассмотрен на примере двух типовых нагрузок бытовой электрической сети: обогреватель мощностью 2,2 кВт (рис. 6 и 7) и пылесос с симисторным регулятором мощности (рис. 8 и 9).

С целью проверки эффективности детектирования и универсальности модели было собрано 50 рядов токовых данных для каждого из указанных типов нагрузки. Каждый ряд данных, содержащий 10 нормальных полупериодов работы или 10 полупериодов, содержащих искрения с частотой дискретизации 10 кГц, то есть исходный сигнал содержал 1024 точки.

Результаты испытаний показывают, что при обнаружении данных о последовательных дуговых пробоях производится анализ алгоритма декомпозиции вейвлет-пакетов к текущему сигналу при нормальной работе и в режиме искрений за 1...5 периодов промышленной частоты.

Как видно из рис. 6-9, безразмерные значения детальных компонент при нормальной работе в каждом масштабе относительно малы – $cd1 < 0,1$, $cd2 < 0,04$. Разложения вейвлетов *db4* более высоких порядков на частоте дискретизации 10 кГц неинформативно из-за малого количества исходных точек сигнала.

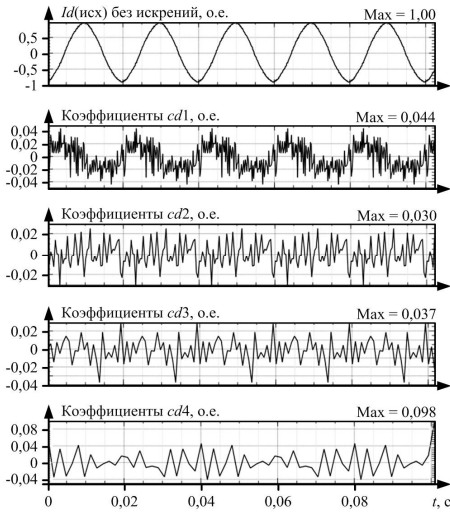


Рис. 6. Диаграммы тока (оригинальный сигнал) и коэффициентов детализации DWT (1...4 уровни) во временной области (нагрузка – обогреватель 2,2 кВт в нормальном состоянии)

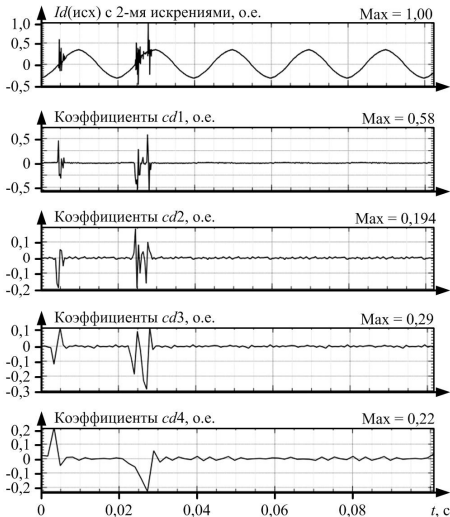


Рис. 7. Диаграммы тока (оригинальный сигнал) и коэффициентов детализации DWT (1...4 уровни) во временной области (нагрузка – обогреватель 2,2 кВт при ослабленном контакте)

В то же время безразмерные значения детальных компонент при появлении искрения классифицируются на кратковременные – один период и длительные – более одного периода.

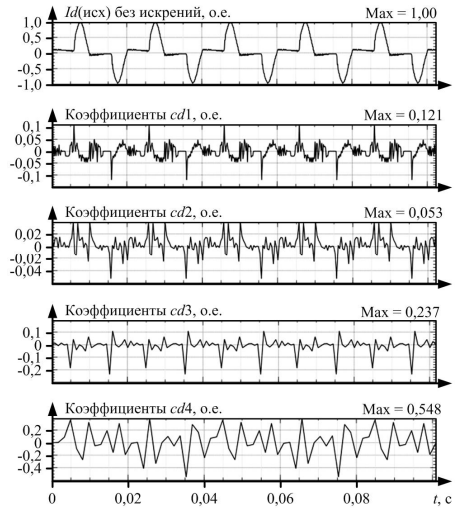


Рис. 8. Диаграммы тока (оригинальный сигнал) и коэффициентов детализации DWT (1...4 уровни) во временной области (нагрузка – пылесос с симисторным регулятором мощности 1,8 кВт в нормальном состоянии)

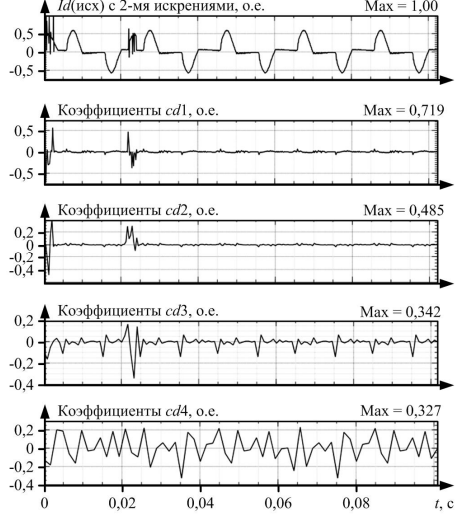


Рис. 9. Диаграммы тока (оригинальный сигнал) и коэффициентов детализации DWT (1...4 уровни) во временной области (нагрузка – пылесос с симисторным регулятором мощности 1,8 кВт при ослабленном контакте)

В первом случае дуговой пробой не представляет пожарной опасности и может отслеживаться в алгоритме распознавания по интенсивности пересечений заданных уровней детальных компонент cd . Во втором случае информация кодируется в виде матрицы SAF:

$$SAF_{j,k} = \begin{bmatrix} K_{1,1} & K_{1,2} & K_{1,3} & K_{1,4} & K_{1,5} & K_{1,6} & K_{1,7} & K_{1,8} & K_{1,9} & K_{1,10} \\ K_{2,1} & K_{2,2} & K_{2,3} & K_{2,4} & K_{2,5} & K_{2,6} & K_{2,7} & K_{2,8} & K_{2,9} & K_{2,10} \\ K_{3,1} & K_{3,2} & K_{3,3} & K_{3,4} & K_{3,5} & K_{3,6} & K_{3,7} & K_{3,8} & K_{3,9} & K_{3,10} \\ K_{4,1} & K_{4,2} & K_{4,3} & K_{4,4} & K_{4,5} & K_{4,6} & K_{4,7} & K_{4,8} & K_{4,9} & K_{4,10} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

где $K_{j,k}$ – число пересечений компонент $cd1$ уровней с номером $i = 1$ (0,2...0,3 о.е.), 2 (0,3...0,4 о.е.), 3 (0,4...0,5 о.е.), 4 (>0,5 о.е.) в течение полупериода промышленной частоты j .

Опасность искрения определяется интегральной интенсивностью колебаний по формуле

$$H = \sum_{k=1}^4 m_k \sum_{j=1}^{10} K_{j,k}, \quad (7)$$

где $m_1 = 1,0$; $m_2 = 2,0$; $m_3 = 3,0$; $m_4 = 4,0$ – «весовые» коэффициенты.

В зависимости от величины H принимается решение либо подать предупреждающий сигнал, либо отключить нагрузку, либо отсутствие реакции (защита от ложного срабатывания).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данная работа посвящена выявлению последовательных дуговых замыканий. Представлен новый метод идентификации дуговых пробоев в электрической сети жилых зданий на основе дискретного вейвлет-преобразования (DWT) семейства Daubechies $db4$.

Установлено, что дуговые пробои имеют уникальные особенности в своих кривых тока, а именно уровни нормализованных в относительных единицах коэффициентов детализации DWT во временной области на частоте дискретизации 10 кГц показывают значения: 1 уровень – от 0,2 до 0,5 и выше, 2 уровень – от 0,05 до 0,2 и выше.

Опасность искрения характеризуется матрицей интенсивности колебаний SAF , строки которой соответствуют уровню нормализованного $cd1$, а столбцы – номеру полупериода 1...10.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Пожары и пожарная безопасность в 2019 году. Статистический сборник / под общ. ред. Д.М. Гордиенко. М.: ВНИИПО, 2020. 80 с.
2. Монаков В.К. Разработка устройства защиты от дуговых замыканий // Пожаровзрывобезопасность. 2014. Т. 23, №8, С. 27-31.
3. Защита от дугового замыкания для дома: AFDD или УЗМ 50/УЗМС. URL: <https://elektrikblog.ru/zashchita-ot-dugovogo-zamykaniya-dlya-doma/> (дата обращения 11.11.2023)
4. A Method for Residential Series Arc Fault Detection and Identification, Electrical Contacts / D. Li, Z. Song, J. Wang, Y. Geng, H. Chen, L. Yu, B. Liu // Proceedings of the Annual Holm Conference on Electrical Contacts. IEEE, 2009. Pp. 7-13. doi: 10.1109/HOLM.2009.5284428
5. Series Arc Fault Detection Algorithm Based on Autoregressive Bispectrum Analysis / K. Yang, R. Zhang, S. Chen, F. Zhang, J. Yang, X. Zhang // Algorithms. 2015. No. 8(4). Pp. 929-950. doi: 10.3390/a8040929
6. Wang S.C., Wu C.J., Wang Y.J. Detection of Arc Fault on Low Voltage Power Circuits in Time and Frequency Domain Approach // International Journal of Circuits, Systems and Signal Processing. 2012. No. 6(5). Pp. 324-331.
7. Arc Faults in Low-Voltage Distribution Networks / M. Rashevskaya, A. Kulikov, M. Tibrayev, A. Gudoghnikov // Proceedings of the 17th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA). IEEE, 2021. Pp. 1-5. doi: 10.1109/ELMA52514.2021.9503046
8. Дьяконов В.П. Вейвлеты. От теории к практике. М.: СОЛОН-Ипресс, 2010. 400 с.
9. Discrete Wavelet Transform optimal parameters estimation for arc fault detection in low-voltage residential power networks / P. Qi, S. Jovanovic, J. Lezama, P. Schweitzer // Electric Power Systems Research. 2017. No. 143. Pp. 130-139. doi: 10.1016/j.epsr.2016.10.008
10. MathWorks Help Center. Wavedec. URL: <https://www.mathworks.com/help/wavelet/ref/wavedec.html> (дата обращения 11.11.2023)

Поступила в редакцию 14 октября 2023 г.

Принята к печати 07 ноября 2023 г.

INFORMATION IN ENGLISH

METHOD OF SERIES ARC FAULT DETECTION USING DISCRETE WAVELET TRANSFORM ALGORITHM

Ilya A. Bershadsky

D.Sc. (Engineering), Associate Professor, Head of Industrial and Municipal Power Supply Department, Donetsk National Technical University, Donetsk, Russia, ibersh164@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7383-3415>

Aleksandr Yu. Gladkov

Ph.D. (Engineering), Laboratory Chief, Scientific Research Laboratory of Intrinsic Safety, Electrical Facilities Department, Makeevka Scientific and Research Institute for Mine Safety, Makeevka, Russia, Gladkov5555@rambler.ru, <https://orcid.org/0009-0000-3979-0626>

Andrey V. Zgarbul

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Industrial and Municipal Power Supply Department, Donetsk National Technical University, Donetsk, Russia, zgarbul.andrey@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0001-3049-2291>

Sergej V. Shlepnev

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Dean of Intelligent Electrical Power Engineering and Robotic Engineering, Donetsk National Technical University, Donetsk, Russia, shlepnev71@mail.ru

Anatolij D. Mykh

Postgraduate Student, Industrial and Municipal Power Supply Department, Donetsk National Technical University, Donetsk, Russia, vip.myh@mail.ru

In order to eliminate false alarms of the arc fault detection device (AFDD), a research was conducted and combinations of existing methods of processing data entering the microcontroller were considered, which may differ significantly from the type of load connected to the network. As a result of the research, a new method for identifying sequential arc circuits in the electrical network of residential buildings based on discrete wavelet transform (DWT) has been developed. The method includes a discrete-time analysis of experimental current curves with arc breakdowns in the mathematical package Matlab, as well as the extraction of signs of arc breakdown using a signal processing method called wavelets of the Daubechiesdb4 family. Verification and comparative analysis of the sequential arc breakdown detection model is considered on the example of two typical household electrical network loads: a 2.2 kW heater and a vacuum cleaner with a triac power regulator. It is established that arc breakdowns have unique features in their current curves, namely: the level of detail coefficients normalized in relative units of CDDWT in the time domain at a sampling frequency of 10 kHz shows the values: 1 level is from 0.2 to 0.5 and higher, 2 level is from 0.05 to 0.2 and higher. It has been established that the level of detail coefficients normalized in relative units in the time domain at a sampling frequency of 10 kHz at normal operation at each scale relative to the scale is level $1 < 0.1$ and level $2 < 0.04$. This will allow us to characterize the intensity of sparking by the SAF matrix, the rows of which correspond to the level of normalized cd1, and the columns correspond to the half-period number 1..10.

Keywords: arc fault, electrical network, electric power consumer, wavelet transform, transient, current strength, sampling rate, microcontroller

REFERENCES

- Gordienko D.M. *Pozhary i pozharnaya bezopasnost v 2019 godu. Statisticheskij sbornik*. [Fires and fire safety in 2019. Statistical collection]. Moscow, VNIPO Publ., 2020. 80 p. (In Russian)
- Monakov V.K. Development of a protection device against arc faults. *Pozharovzryvbezopasnost* [Fire and Explosion Safety], 2014, vol. 23, no. 8, pp. 27-31. (In Russian)
- Arc fault protection for home: AFDD or UZM 50/UZIS. Available at: <https://elektrikblog.ru/zashchita-ot-dugovogo-zamykaniya-dlya-doma/>. (accessed 11 November 2023). (In Russian)
- Dongwei Li, Zhengxiang Song, Jianhua Wang, Ying-san Geng, Huilin Chen, Li Yu, Bo Liu A. Method for Residential Series Arc Fault Detection and Identification, Electrical Contacts, Proceedings of the Annual Holm Conference on Electrical Contacts. IEEE, 2009, pp. 7-13. doi: 10.1109/HOLM.2009.5284428
- Yang K., Zhang R., Chen S., Zhang F., Yang J., Zhang X. Series Arc Fault Detection Algorithm Based on Autoregressive Bispectrum Analysis. *Algorithms*. 2015, no. 8(4), pp. 929-950. doi: 10.3390/a8040929
- Wang Sh.-Ch., Wu Ch.-J., Wang Y.-J. Detection of Arc Fault on Low Voltage Power Circuits in Time and Frequency Domain Approach. *International Journal of Circuits, Systems and Signal Processing*. 2012, no. 6(5), pp. 324-331.
- M. Rashevskaya, A. Kulikov, M. Tibrayev, A. Gudoghnikov: Arc Faults in Low-Voltage Distribution Networks, Proceedings of the 17th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA). IEEE, 2021, pp. 1-5. doi: 10.1109/ELMA52514.2021.9503046
- Dyakonov V.P. *Veivlety. Ot teorii k praktike*. [Wavelets. From theory to practice]. Moscow, SOLON-Press Publ., 2010. 400 p. (In Russian)
- Qi P., Jovanovic S., Lezama J., Schweitzer P. Discrete Wavelet Transform optimal parameters estimation for arc fault detection in low-voltage residential power networks. *Electric Power Systems Research*. 2017, no. 143, pp. 130-139. doi: 10.1016/J.EPSR.2016.10.008
- MathWorks Help Center. Wavedec. Available at: <https://www.mathworks.com/help/wavelet/ref/wavedec.html>. (accessed 11 November 2023)

Метод идентификации последовательного дугового пробоя на основе дискретного вейвлет-алгоритма / И.А. Бершадский, А.Ю. Гладков, А.В. Згарбул, С.В. Шлепнёв, А.Д. Мых // Электротехнические системы и комплексы. 2023. № 4(61). С. 76-81. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-4\(61\)-76-81](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-4(61)-76-81)

Bershadsky I.A., Gladkov A.Yu., Zgarbul A.V., Shlepnev S.V., Myh A.D. Method of Series arc Fault Detection Using Discrete Wavelet Transform Algorithm. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2023, no. 4(61), pp. 76-81. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-4\(61\)-76-81](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-4(61)-76-81)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Александров Николай Васильевич – канд. техн. наук, доцент, кафедра электроснабжения промышленных предприятий и сельского хозяйства, Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления, Улан-Удэ, Россия, alexandrov-88@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0004-8208-4056>

Бершадский Илья Адольфович – д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой, кафедра электроснабжения промышленных предприятий и городов, Донецкий национальный технический университет, Донецк, Россия, ibersh164@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7383-3415>

Благодаров Дмитрий Анатольевич – канд. техн. наук, доцент, кафедра автоматизированного электропривода, Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт», Москва, Россия, BlagodarovDA@mpei.ru, <https://orcid.org/0009-0001-1267-6644>

Бочкарев Алексей Андреевич – студент, кафедра электроснабжения промышленных предприятий, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия, analogsynth@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8834-2384>

Бурковский Александр Викторович – канд. техн. наук, доцент, декан, факультет энергетики и систем управления, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия, bav@vorstu.ru

Газизова Ольга Викторовна – канд. техн. наук, доцент, кафедра электроснабжения промышленных предприятий, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия; кафедра электроэнергетики, Тюменский индустриальный институт (филиала в г. Тобольске), Тобольск, Россия, logan_b_7@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9416-672X>

Гладков Александр Юрьевич – канд. техн. наук, заведующий лабораторией, научно-исследовательская лаборатория искробезопасности отдела электрооборудования, Макеевский научно-исследовательский институт по безопасности работ в горной промышленности, Макеевка, Россия, Gladkov5555@rambler.ru, <https://orcid.org/0009-0000-3979-0626>

Дашеев Дмитрий Евгеньевич – канд. пед. наук, доцент, кафедра электроснабжения промышленных предприятий и сельского хозяйства, Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления, Улан-Удэ, Россия, dasheevd@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0003-7732-2833>

Жарков Александр Александрович – канд. техн. наук, доцент, кафедра автоматизированного электропривода, Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт», Москва, Россия, ZharkovAA@mpei.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5628-8101>

Згарбул Андрей Викторович – канд. техн. наук, доцент, кафедра электроснабжения промышленных предприятий и городов, Донецкий национальный технический университет, Донецк, Россия, zgarbul.andrey@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0001-3049-2291>

Зеленцов Валерий Иванович – канд. техн. наук, доцент, кафедра электрификации и транспорта, Российский государственный профессионально-педагогический университет, Екатеринбург, Россия, v.zelentsov@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0009-9102-6321>

Зюев Анатолий Михайлович – д-р техн. наук, доцент, профессор, кафедра электропривода и автоматизации промышленных установок, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия, a.m.zyuzev@urfu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2233-2730>

Ипполитов Владимир Владимирович – старший преподаватель, кафедра электрификации и транспорта, Российский государственный профессионально-педагогический университет, Екатеринбург, Россия, suchi6624@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0002-2445-1490>

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

Кравченко Олег Александрович – д-р техн. наук, профессор, ректор, Тульский государственный университет, Тула, Россия, info@tsu.tula.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2974-448X>

Кулик Егор Сергеевич – канд. техн. наук, ассистент, кафедра автоматизированного электропривода, Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт», Москва, Россия, kulikegorka@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3345-0174>

Логинов Борис Михайлович – канд. техн. наук, доцент, кафедра электроснабжения промышленных предприятий, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия, lb18@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3337-3148>

Масленников Тимофей Константинович – инженер, кафедра автоматизированного электропривода, Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт», Москва, Россия, maslennikov.tim20138@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0001-1041-5555>

Мороз Александр Андреевич – студент, кафедра электроснабжения промышленных предприятий, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия, moroz.alexanderm2016@yandex.ru

Мугалимов Риф Гарифович – д-р техн. наук, доцент, профессор, кафедра электроснабжения промышленных предприятий, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия, energosberegenie@rambler.ru

Мугалимова Алия Рифовна – канд. техн. наук, доцент, кафедра горных машин и транспортно-технологических комплексов, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия, aliya.mugалимова@gmail.com

Мых Анатолий Дмитриевич – аспирант, кафедра электроснабжения промышленных предприятий и городов, Донецкий национальный технический университет, Донецк, Россия, vir.myh@mail.ru

Писаревский Александр Юрьевич – канд. техн. наук, доцент, кафедра электромеханических систем и электроснабжения, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия, 2732558@mail.ru

Писаревский Юрий Валентинович – канд. техн. наук, доцент, кафедра электромеханических систем и электроснабжения, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия, 2732558@mail.ru

Пластун Анатолий Трофимович – д-р техн. наук, профессор, кафедра электротехники, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия, a.t.plastun@urfu.ru

Самохин Дмитрий Викторович – старший преподаватель, институт микроприборов и систем управления имени Л.Н. Преснухина, Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», Москва, Россия, oppozite1984@mail.ru

Соловьев Александр Эдуардович – д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой, кафедра электро-техники и электрооборудования, Тульский государственный университет, Тула, Россия, soaled@yandex.ru

Тикунев Алексей Владимирович – канд. техн. наук, доцент, кафедра электромеханических систем и электроснабжения, Воронежский государственный

технический университет, Воронеж, Россия, Tikunov_a@list.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9443-0508>

Титова Лариса Николаевна – канд. техн. наук, доцент, кафедра электромеханических систем и электроснабжения, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия, tlh64@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8461-0591>

Федорова Ксения Георгиевна – канд. техн. наук, доцент, кафедра автоматизированного электропривода, Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт», Москва, Россия, FedorovaXG@mpei.ru

Шарафутдинов Данил Маратович – студент, кафедра машин и технологий обработки давлением и машиностроения, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия, daniil.sharafutdinov2017@yandex.ru

Шахбиева Карина Асламбековна – аспирант, кафедра электроснабжения промышленных предприятий, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия, karina.shakhbieva@mail.ru

Шевцов Дмитрий Евгеньевич – канд. техн. наук, доцент, кафедра электроснабжения промышленных предприятий, Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия, zagranica@list.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0792-9624>

Шлепнёв Сергей Владимирович – канд. техн. наук, доцент, декан, факультет интеллектуальной электроэнергетики и робототехники, Донецкий национальный технический университет, Донецк, Россия, shlepnev71@mail.ru

Ядагаев Эркемен Геннадьевич – канд. техн. наук, начальник отдела, отдел организации ремонтов, ПАО «Чукотэнерго», Анадырь, Россия, yadagaev@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0001-6298-5306>

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

Журнал «Электротехнические системы и комплексы» основан в 1996 г. 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 г. «Электротехнические системы и комплексы» выпускается как журнал с периодичностью четыре номера в год.

С 02.02.2016 г. 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 состоянию Перечня на 24.10.2023 г. журнал публикует работы по следующим научным специальностям:

- 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки)
- 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации (технические)
- 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки)
- 2.4.1. Теоретическая и прикладная электротехника (технические науки)
- 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы (технические науки)
- 2.4.3. Электроэнергетика (технические науки)
- 2.4.4. Электротехнология и электрофизика (технические науки)

По результатам экспертной оценки ВАК с **06.12.2022 г.** журнал отнесен к категории **К2**.

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.magt.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 рефразирование не приемлемы!

Пакет подаваемых документов (отправляется по электронной почте ecis.red@gmail.com):

- 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.