

ЭлСиК

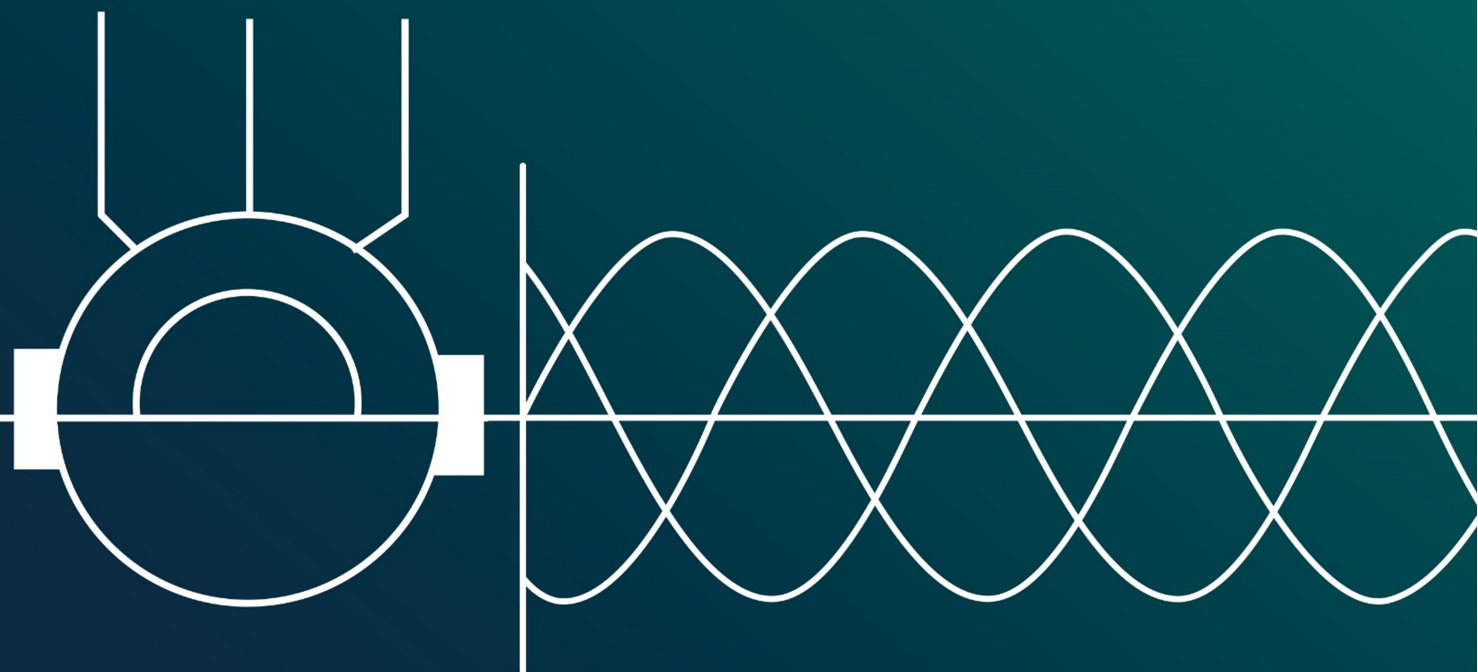
ISSN 2311-8318

ISSN (online) 2658-3151

# ЭЛЕКТРО- ТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

№ 4(57)

2022 г.



## КОЗЯРУК АНАТОЛИЙ ЕВТИХИЕВИЧ

29 октября 2022 г. на 82-м году жизни покинул этот мир Козярук Анатолий Евтихиевич, ведущий российский ученый в области исследования, проектирования и создания электромеханических систем с полупроводниковыми преобразователями, а также признанный специалист в области систем автоматического управления электроприводами, профессор кафедры электроэнергетики и электромеханики Санкт-Петербургского горного университета.

Родился Анатолий Евтихиевич 14 апреля 1940 г. на Украине, в селе Сиваши Херсонской области. Уже в пятнадцатилетнем возрасте он окончил школу с золотой медалью в городе Цюрупинске (Олешки). В 1955 г. поступил на электротехнический факультет Одесского политехнического института, а в 1959 г. прошел конкурсный отбор и был переведен в Харьковский авиационный институт, который и окончил с отличием в 1961 г.

Свой трудовой путь Анатолий Евтихиевич начал в 1961 г. в опытно-конструкторском бюро Госкомитета по авиационной технике, которое располагалось на территории Уфимского агрегатного завода. Там участвовал в выполнении ОКР по созданию и внедрению первых отечественных электронных систем регулирования авиационных двигателей для ряда объектов, в том числе самолетов АН-24 и турбоагрегатов для ИЛ-18.

С 1966 г. трудовой и творческий путь А.Е. Козярука был связан с Ленинградом (Санкт-Петербургом). В период с 1966 по 1973 гг. – Институт электромеханики (ВНИИЭлектромаш). В 1972 г. защитил кандидатскую диссертацию по гребным электроприводам переменного тока для глубоководных объектов. С 1973 по 1989 гг. в АО «Электросила» руководил проектированием и участвовал в испытаниях и внедрении систем электродвижения судов активного ледового плавания и систем якорного позиционирования полупогружных буровых установок для работ по освоению континентального шельфа. С 1984 г. началась педагогическая деятельность А.Е. Козярука, сначала по совместительству в Ленинградском политехническом и электротехническом институтах (ЛЭТИ), а с 1989 г. – в горном институте. В 1988 г. А.Е. Козярук защитил докторскую диссертацию в совете ЛЭТИ. С 1989 по 2017 гг. заведовал кафедрой электрических машин и автоматизированного электропривода (ныне кафедра электроэнергетики и электромеханики) Санкт-Петербургского горного университета (СПГУ). С 2014 г. входил в состав редакционной коллегии журнала «Электротехнические системы и комплексы».

На его счету свыше 40 авторских свидетельств и патентов, часть из которых внедрена в промышленные образцы оборудования. За годы работы Анатолий Евтихиевич опубликовал более 250 научных статей. Вёл активную научно-общественную деятельность. Был организатором и участником многих всесоюзных и международных конференций по автоматизированному электроприводу. Являлся членом редколлегии различных журналов. До 2014 г. был членом экспертного совета по энергетике ВАК РФ, членом УМК УМО по образованию в энергетике и горному образованию. Являлся членом Академии электротехнических наук РФ. В 2003 г. А.Е. Козярук был награждён памятной медалью «300 лет Петербургу». За вклад в развитие науки и образования в 2005 г. ему присвоено звание «Заслуженный работник высшей школы РФ». Награжден медалью им. П.Н. Яблочкова в 2013 г. за вклад в развитие электротехники.

А.Е. Козярук поддерживал широкие научно-технические связи с научными школами электроприводчиков в странах СНГ. Ему всегда были присущи целеустремленность и трудолюбие, широкая эрудиция и доброжелательность. Память об Анатолии Евтихиевиче навсегда останется в сердцах его родных и друзей, коллег и учеников.



*Коллектив МГТУ им. Г.И. Носова,  
института энергетики  
и автоматизированных систем,  
редакции журнала «Электротехнические  
системы и комплексы»*

*Коллектив СПГУ,  
кафедры электроэнергетики и электромеханики*

# ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

ИЗДАЕТСЯ С ЯНВАРЯ 1996 Г.

№ 4(57), ДЕКАБРЬ 2022

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

### Ответственный редактор:

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

### Секция теории и практики автоматизированного электропривода:

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

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

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

### Секция электро- и теплоэнергетики:

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

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

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

### Секция энерго- и ресурсосбережения:

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

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

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

### Секция электроснабжения:

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

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

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

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

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

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

### Секция электротехнологий в промышленности:

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

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

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

### Секция мониторинга, контроля и диагностики электрооборудования:

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

**А.С. Карандаев** – проф., д-р техн. наук,  
ЮУрГУ (НИУ), г. Челябинск, Россия;

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

### Технические редакторы:

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

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

© ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2022

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 23.12.2022. Заказ 297. Тираж 500 экз.

Цена свободная.

# ELECTROTECHNICAL SYSTEMS AND COMPLEXES

PUBLISHED SINCE JAN., 1996

NO. 4(57), DEC., 2022

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.

### Section of Theory and Practice of Automated Electric Drive:

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

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

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

### Section of Power Engineering:

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

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

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

### Section of Energy- and Resources-Economy:

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

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

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

### Section of Electric Power Supply:

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

**A.L. Karyakin** – Senior Research Associate, D.Sc.  
(Engineering), UFMU, Ekaterinburg, Russia.

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

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

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

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

### Section of Industrial Electro Technology:

**A.M. Zyuzev** – Associate Professor, D.Sc.  
(Engineering), UrFU named after the first  
President of Russia B.N. Yeltsin,  
Ekaterinburg, Russia;

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

**I.V. Bochkarev** – Professor, D.Sc. (Engineering),  
KSTU, Bishkek, Kyrgyzstan.

### Section of Monitoring, Diagnostics and Control of Electric Equipment:

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

**A.S. Karandaev** – Professor, D.Sc. (Engineering),  
SUSU (NRU), Chelyabinsk, Russia;

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

### Technical Editors:

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

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

© FSBEI HE NMSTU, 2022

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: 23.12.2022. Order 297. Circulation: 500.

Open price.

**СОДЕРЖАНИЕ****ЭЛЕКТРО- И ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА ..... 4**

*Сафаралиев М.Х., Матренин П.В.,  
Кирьянова Н.Г., Гуломзода А.Х.*  
Среднесрочное прогнозирование  
электропотребления на основе искусственной  
нейронной сети в изолированных энергосистемах . 4

*Сенюк М.Д., Дмитриева А.А.*  
Разработка метода оценки динамической  
устойчивости энергосистем  
на основе применения теории  
искусственного интеллекта с учётом  
топологической связанности сети.....12

*Тарасов В.М., Патшин Н.Т., Петухова О.И.,  
Морщакин А.Э., Курбанов А.Р.*  
Исследование влияния первичного двигателя  
на устойчивость промышленных генераторов.....20

*Правикова А.А., Рулевский В.М.*  
Влияние частоты передачи напряжения  
по кабель-тросу на потери  
и массогабаритные параметры системы  
электропитания подводного аппарата.....29

*Панова Е.А., Новиков И.В., Сабирова Р.Р.*  
Сравнительный анализ методов расчета  
электрических параметров ЛЭП 110-220 кВ  
без грозотроса  
и с одним грозотросом .....36

**ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО  
ЭЛЕКТРОПРИВОДА.....42**

*Маклаков А.С., Николаев А.А., Радионов А.А.,  
Гасияров В.Р., Гилемов И.Г.*  
Схемы подключения к сети  
мощных рекуперативных электроприводов  
клетей прокатных станов .....42

*Греков Э.Л., Безгин А.С.*  
Прямое управление моментом двухфазного  
асинхронного электродвигателя .....54

*Харисов И.Р., Карякин А.Л.*  
Законы и способы управления тяговым усилием  
электроприводов магистрального электровоза....60

**ИНФОРМАЦИОННОЕ, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ  
И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ  
ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ.....69**

*Вечеркин М.В., Сарваров А.С., Самарина И.Г.,  
Романова И.П., Богачева И.Ю.*  
Моделирование аэродинамических характеристик  
центробежных вентиляторов  
с осевым направляющим аппаратом.....69

*Корниенко В.Д., Наркевич М.Ю., Логунова О.С.,  
Козлова А.Е., Зайцев И.П.*  
Методика сбора и обработки информации для  
контроля состояния территорий, зданий и  
сооружений на опасных производственных  
объектах металлургического предприятия .....76

*Васильев Г.В., Бердоносков В.Д.*  
Методика по эффективному применению  
гибридных моделей нейронных сетей  
для прогнозирования энергопотребления.....88

**СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ .....96****CONTENT****POWER ENGINEERING ..... 4**

*Safaraliev M.Kh., Matrenin P.V.,  
Kyrianova N.G., Ghulomzoda A.H.*  
Medium-Term Forecasting of Power  
Consumption Based on an Artificial  
Neural Network in Isolated Power Systems ..... 4

*Senyuk M.D., Dmitrieva A.A.*  
Development of a Method for Assessment  
the Dynamic Stability of Power Systems  
on the Basis of the Theory of Artificial  
Intelligence Application Taking into Account  
the Topological Connectivity of the Network ..... 12

*Tarasov V.M., Patshin N.T., Petukhova O.I.,  
Morshchakin A.E., Kurbanov A.R.*  
Influence of Primary Engine  
on Industrial Generator Stability..... 20

*Pravikova A.A., Rulevskiy V.M.*  
Influence of Voltage Transmission  
Frequency through the Rope-Cable  
on Losses, Weight and Size Parameters  
of the Underwater Vehicle Power Supply ..... 29

*Panova E.A., Novikov I.V., Sabirova R.R.*  
Comparative Analysis of Models for Calculating  
Electrical Parameters of 110-220 kV  
Transmission Lines without a Lightning Rod  
and with One Lightning Rod ..... 36

**THEORY AND PRACTICE OF AUTOMATED  
ELECTRIC DRIVE..... 42**

*Maklakov A.S., Nikolaev A.A., Radionov A.A.,  
Gasiyarov V.R., Gilemov I.G.*  
Grid Connection Circuits  
for Powerful Regenerative Electric  
Drives of Rolling Stands ..... 42

*Grekov E.L., Bezgin A.S.*  
Direct Torque Control by Two-Phase  
Asynchronous Electric Motor..... 54

*Kharisov I.R., Karyakin A.L.*  
Principles and Methods of Electric Power Drive  
Traction Control in Electric Locomotive ..... 60

**TECHNICAL SYSTEMS  
DATAWARE  
AND SOFTWARE ..... 69**

*Vecherkin M.V., Sarvarov A.S., Samarina I.G.,  
Romanova I.P., Bogacheva I.Yu.*  
Modeling the Aerodynamic Parameters  
of Centrifugal Fans  
with an Axial Distributor ..... 69

*Kornienko V.D., Narkevich M.Yu., Logunova O.S.,  
Kozlova A.E., Zaytsev I.P.*  
Methodology for Collecting and Processing  
Information to Monitor the State of the Territory,  
Buildings And Structures at Hazardous Production  
Facilities of a Metallurgical Enterprise ..... 76

*Vasilev G.V., Berdonosov V.D.*  
Methodology for Effective Application  
of Hybrid Models of Neural Networks  
for Energy Consumption Prediction ..... 88

**INFORMATION ABOUT THE AUTHORS..... 96**

## СРЕДНЕСРОЧНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ ИСКУССТВЕННОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ В ИЗОЛИРОВАННЫХ ЭНЕРГОСИСТЕМАХ

В условиях резко переменных климатических условий высокогорья, территориальной распределенности, дефицита генерирующих мощностей, дороговизны углеродного топлива и отсутствия больших накопителей энергии, обеспечивающих покрытие пиковых нагрузок, в горных изолированных энергосистемах (ИЭС) возрастает необходимость обеспечения балансовой надежности с учётом оптимального распределения ресурсов. Для обеспечения требуемой балансовой надежности необходима реализация достоверного прогнозирования электропотребления в среднесрочной перспективе для планирования загрузки генерирующего оборудования с учетом необходимого и достаточного покрытия нагрузки, стоимости генерации, экологичности и других критериев. Поэтому к точности и робастности прогноза нагрузки предъявляются повышенные требования. Проведено исследование влияния метеорологических факторов на среднесрочное прогнозирование электропотребления ИЭС Горно-Бадахшанской автономной области (ГБАО), расположенной в Республике Таджикистан, для которой характерны вышеперечисленные специфические свойства ИЭС. Для прогнозирования электропотребления с учетом метеорологических факторов использована нейросетевая модель. Чтобы повысить эффективность обучения модели, предложен подход, основанный на кластеризации метеорологических условий. Своя нейросетевая модель создается для каждого кластера, кроме того, обучена вспомогательная модель, которая относит текущие условия к одному из кластеров. Таким образом, вместо единой модели, которая учитывала бы все возможные условия, создана система из намного более простых моделей, что повышает интерпретируемость процедуры прогнозирования и снижает риск переобучения.

**Ключевые слова:** среднесрочное прогнозирование электропотребления, адаптивные модели машинного обучения, метеорологические условия, изолированная энергосистема, кластеризация

### ВВЕДЕНИЕ

Среднесрочное прогнозирование чрезвычайно важно для поставщиков энергии и других участников рынков производства, передачи и распределения электроэнергии. Это помогает принимать решения, в том числе о покупке и производстве электроэнергии в электроэнергетической системе. Основная роль прогнозирования электропотребления в такой системе заключается в повышении точности планирования производства и купли-продажи необходимого объема электроэнергии [1-3].

Большинство методов прогнозирования электропотребления посвящены краткосрочному прогнозированию (от нескольких минут до 24 часов), а не среднесрочному (от нескольких дней до нескольких месяцев). Как правило, методы прогнозирования электропотребления можно разделить на две широкие категории [4]: статистические методы и методы на основе машинного обучения, хотя граница между ними является нечеткой.

Традиционные статистические методы включают метод временных рядов [5, 6], метод фильтра Калмана [7], метод экспоненциального сглаживания [8] и т.д. Однако точность традиционных методов прогнозирования может быть недостаточно высокой на среднесрочную перспективу из-за нелинейных характеристик электропотребления для прогнозирования процессов с высокой степенью волатильности. Последнее особенно характерно для ИЭС из-за их небольшого размера относительно крупных региональных и объединенных энергосистем. Методы прогнозирования, основанные на машинном обучении, включают классические ис-

кусственные нейронные сети [9], метод опорных векторов (support vector machine, SVM) [10], нейронные сети с памятью [11] и множество других методов. По сравнению с традиционными методами, точность прогнозирования методов машинного обучения во многих случаях существенно выше, но оптимизация параметров каждой модели затруднена, что влияет на эффективность прогнозирования.

Одним из подходов к повышению точности прогнозов является использование дополнительных этапов фильтрации и предобработки данных, в том числе с помощью кластеризации. Кластеризация позволяет строить вместо единой модели для всех условий функционирования ряд отдельных моделей, каждая из которых лучше адаптирована к определенным метеорологическим условиям. При этом для текущих условий среди всех ретроспективных данных формируется выборка из наиболее похожих записей, затем на этих данных обучается модель. Чаще всего кластеризация метеорологических условий в задачах электроэнергетики связана с прогнозированием генерации возобновляемых источников энергии.

Кластеризация может быть использована и для фильтрации данных. В [12] авторы описывают применение кластеризации метеорологических параметров для обнаружения выбросов. При анализе электропотребления кластеризация также применяется. Например, для разделения потребителей по профилям электропотребления [13, 14].

В данной работе кластеризация применена для разделения выборки ретроспективных данных на несколько категорий, различающихся по метеорологическим условиям. Для каждого кластера создается своя модель прогнозирования нагрузки. Также отличием предложенного подхода является алгоритм выбора

оптимального числа предыдущих дней, метеорологические данные которых используются для кластеризации. Для этого применен алгоритм снижения размерности массива данных Principal Component Analysis (Анализ Главных Компонент) (PCA), который позволяет визуально оценить, как распределились кластеры в пространстве признаков. Также алгоритм PCA позволил упростить прогнозные модели за счет агрегирования метеорологических данных.

ОПИСАНИЕ ВЫБОРКИ ДАННЫХ

В Республике Таджикистан сектором электроэнергетики управляет Открытая акционерная холдинговая компания (ОАХК) «Барки Точик», которая является государственной собственностью. Предприятие контролирует электрические станции и сети, выработку, передачу и распределение электроэнергии в Республике Таджикистан, за исключением ГБАО. Так, с декабря 2002 г. сеть электроснабжения ГБАО перешла от компании «Барки Точик» к частной компании «Памир Энерджи» на основе Концессионного соглашения сроком на 25 лет и начала работать изолированно, то есть без связи с основной энергосистемой республики [15].

В настоящее время в управлении «Памир Энерджи» находятся 11 ГЭС и одна солнечная электростанция (СЭС) общей установленной мощностью 43,5 МВт, из которых более крупные – ГЭС «Памир-1» и «Хорог», а также несколько ДЭС малой мощности. ДЭС подключаются к системе в параллельную работу в основном зимой, когда в энергосистеме наблюдается нехватка электроэнергии [16].

Поскольку дефицит электроэнергии в ГБАО, вырабатываемой ГЭС, наблюдается только в холодный период (с ноября по март включительно) [17, 18], рассмотрены данные только за эти месяцы (рис. 1 и 2).

Основная гипотеза данного исследования заключается в возможности повысить точность среднесрочного прогнозирования электропотребления за счет использования метеорологических данных и кластеризации метеорологических условий.

Кроме того, в рассматриваемой энергосистеме нагрузка меняется в выходные дни, поэтому в выборку добавлен номер дня недели. Номера года, месяца и дня также рассмотрены в качестве признаков. Ниже приведен полный список признаков в исходной выборке данных:

- год;
- месяц;
- день;
- день недели;
- температура воздуха;
- относительная влажность воздуха;
- скорость ветра;
- облачность.

Электропотребление (среднесуточная мощность нагрузки) является целевой переменной.

Выборка содержит записи с шагом 1 сутки за 6 лет (2015–2020 гг.). Таким образом, выборка содержит 908 строк и 9 столбцов.

Коэффициенты корреляции между признаками и электропотреблением приведены в табл. 1. Видно, что наибольшая зависимость наблюдается между электропотреблением и годом и между электропотреблением и днем недели, но метеорологические факторы, такие как температура, влажность и скорость ветра, тоже оказывают влияние на электропотребление.

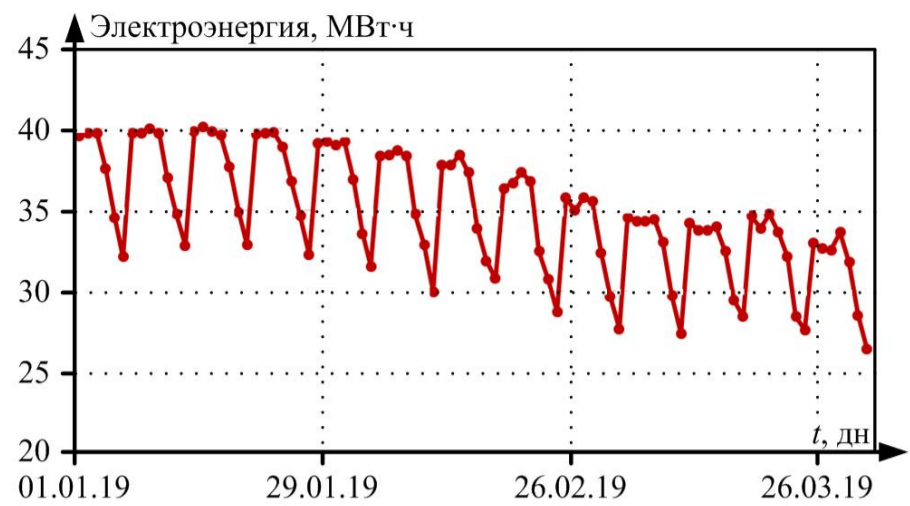


Рис. 1. Графики электропотребления за январь-март 2019 г.

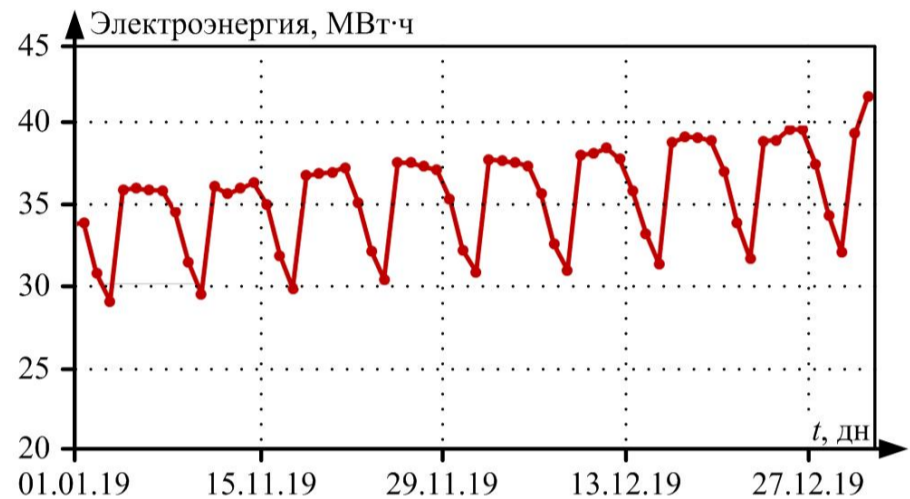


Рис. 2. Графики электропотребления за ноябрь-декабрь 2019 г.

Таблица 1

Коэффициент корреляции между признаками и электропотреблением

Признак	Коэффициент корреляции
Год	0,70
Месяц	-0,09
День	0,01
День недели	-0,51
Температура	-0,33
Влажность	0,20
Скорость ветра	-0,37
Облачность	0,01

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ

Необходимо построить модель среднесрочного (на неделю вперед) прогнозирования электропотребления энергосистемы:

$$P_i^* = f(W_{i-7}, W_{i-8}, \dots, W_{i-6-d}), \tag{1}$$

где  $P_i^*$  – прогнозируемое электропотребление в  $i$ -е сутки;  $f$  – модель;  $W_j$  – вектор значений используемых признаков в  $j$ -е сутки, включающий в себя и  $P_j$ ;  $d$  – число предыдущих дней, использованных для прогнозирования.

В работе не используются прогнозы метеорологических факторов, поскольку в этом случае система окажется зависимой от точности среднесрочных прогнозов метеопровайдеров. Для прогнозирования используются данные за предыдущие сутки (с учетом того, что горизонт планирования составляет неделю).

Точность прогноза оценивается на тестовой выборке с использованием метрик mean absolute error (MAE), mean absolute percentage error (MAPE) и root mean squared error (RMSE):

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |P_i - P_i^*|; \quad (2)$$

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{P_i - P_i^*}{P_i} \right|; \quad (3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - P_i^*)^2}, \quad (4)$$

где  $n$  – размер тестовой выборки в сутках;  $P$  – истинное значение электропотребления;  $P^*$  – прогнозное значение электропотребления.

#### КЛАСТЕРИЗАЦИЯ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ

При построении моделей машинного обучения необходимо сделать выбор: создавать единую модель, которая будет решать всю задачу целиком, или разбить задачу на этапы и создавать отдельные модели для каждой из них.

Создание единой модели позволяет выполнять ее обучение для достижения конечной цели, в то время как при разбиении задачи на этапы каждая модель строится для достижения подцели. Затем результаты объединения таких моделей могут оказаться не столь качественными, как при обучении единой модели, сфокусированной на конечном результате. С другой стороны, в задачах планирования и управления в электроэнергетике очень важна интерпретируемость моделей машинного обучения, гарантия их робастности и снижение риска неожиданного поведения [19].

Кроме того, нужно учитывать ограниченность выборки данных. Чем меньше выборка, тем менее надежными являются выводы, полученные с использованием сложных моделей. Разбиение задачи на части позволяет применять более простые модели на каждом этапе и контролировать их. Ограничение размера модели может сделать ее более устойчивой к переобучению, более робастной и повысить ее обобщающую способность [20].

Поэтому в данной работе использована следующая архитектура системы прогнозирования на базе машинного обучения:

- 1) уровень предобработки данных;
- 2) уровень кластеризации данных;
- 3) уровень прогнозирования, состоящий из  $m$  независимых нейронных сетей, по числу кластеров.

#### ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ

Суть предложенного подхода заключается в разбиении метеорологических условий на  $m$  кластеров с помощью машинного обучения без учителя (алгоритм  $k$ -means [21]). Для каждого кластера выполняется построение своей нейросетевой модели. При работе системы входные данные относятся к одному из кластеров, и затем для получения прогноза применяется та модель, которая была построена для этого кластера.

Такой подход имеет следующие преимущества:

- этап кластеризации выполняется без учителя, значит, по определению исключен риск подгонки под нужный результат;
- можно визуально проверить логичность результата кластеризации, применив после кластеризации метод главных компонент и визуализировав полученные кластеры на плоскости;
- построение разных моделей для отдельных метеорологических условий позволяет повысить точность прогноза, поскольку каждая модель оказывается сфокусированной на определенных условиях работы;
- отдельные модели могут быть более компактными, чем единая – следовательно, для их обучения и тестирования можно использовать меньше данных, а их работа будет более предсказуемой.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

##### 1. Предобработка данных.

Исходная выборка данных может быть записана как

$$\{(W_i, P_i)\}, i = 1 \dots n.$$

На этапе предобработки она переводится в следующий вид, соответствующий выражению (1):

$$\{(W_{i-7}, W_{i-8}, \dots, W_{i-6-d}, P_i)\}.$$

Число  $d$  определяет количество предыдущих суток, которые будут использоваться для построения прогноза. При  $d$ , равном 1, полученный датасет будет иметь 10 столбцов (9 признаков и целевую переменную), при  $d$  равном 2 – 19 и т.д.

Кроме того, на этапе предобработки данных выполняется Min-Max нормализация, чтобы все значения признаков оказались в диапазоне от 0 до 1.

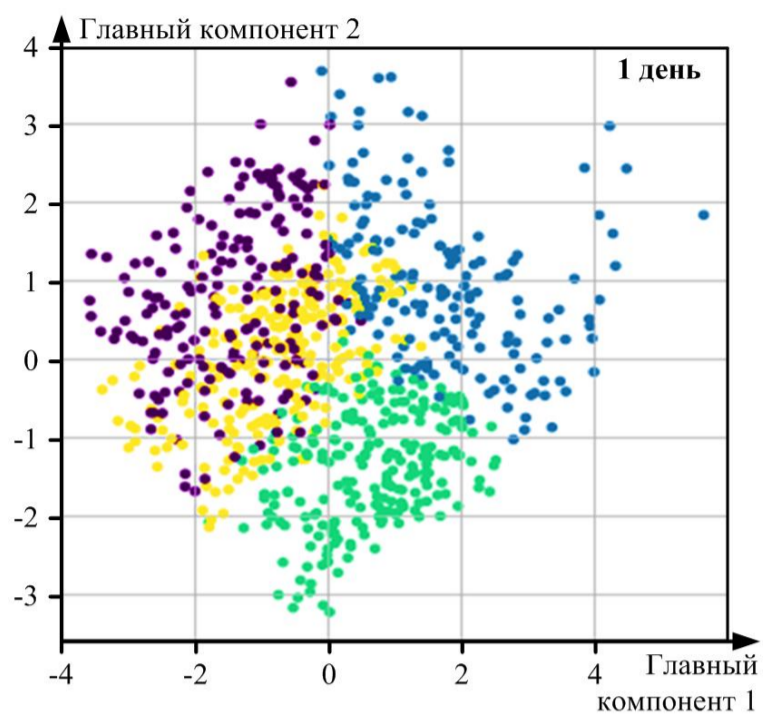
##### 2. Кластеризация.

Для кластеризации использован алгоритм  $k$ -средних, так как он является general-purpose алгоритмом. Чтобы проверить корректность кластеризации и выбрать наиболее подходящее число кластеров, в работе использован Principal Component Analysis (PCA) [22]. Кластеризация выполняется по признакам  $(W_{i-7}, W_{i-8}, \dots, W_{i-6-k})$ . Затем к данным применяется PCA с переводом размерности признаков в двумерную плоскость. Точки на плоскости затем отмечаются цветами в соответствии с метками кластеров. Четкость границ между полученными кластерами показывает, насколько кластеризация выполнена корректно.

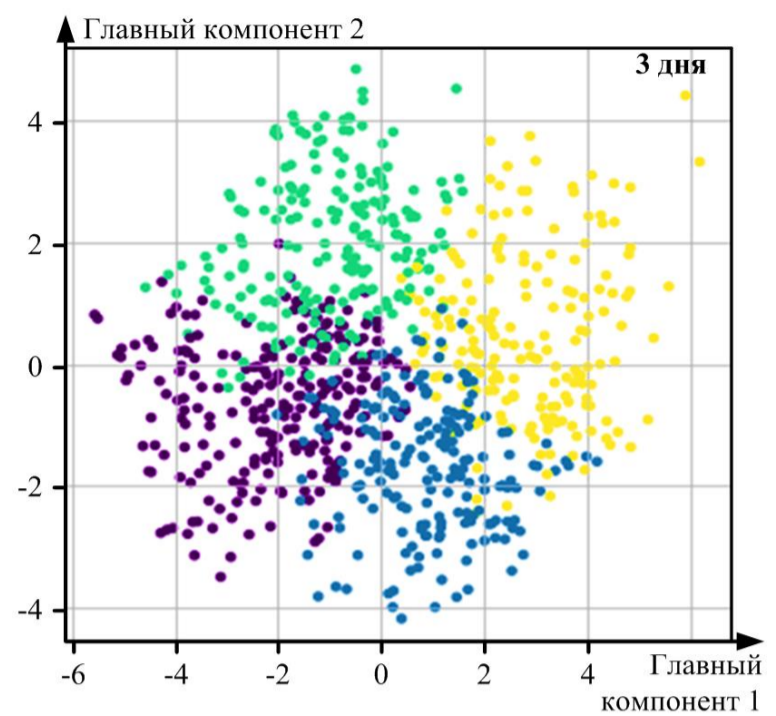
**Рис. 3** и **4** показывают полученные результаты. Изначально мы использовали 4 кластера, это количество выбрано исходя из визуального анализа результатов PCA. Но затем на этапе построения регрессионных моделей обнаружили, что три кластера дают лучший результат. Видно, что при числе используемых дней менее пяти границы между кластерами являются менее четкими. Использование более семи дней может привести к переобучению регрессионных моделей, поскольку признаков будет слишком много относительно числа дней в выборке данных.

Таким образом, на следующих этапах использованы посуточные данные за неделю и 3 или 4 кластера.

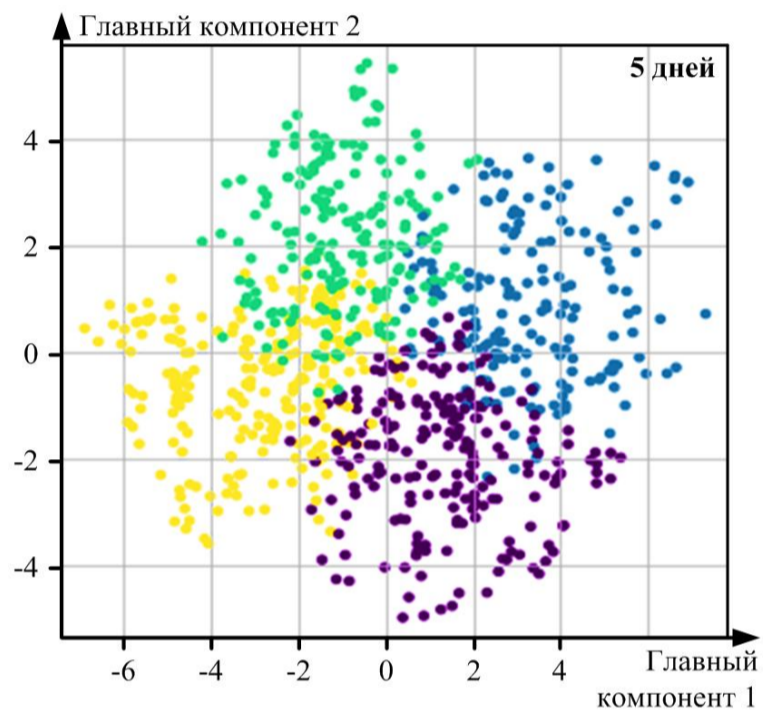




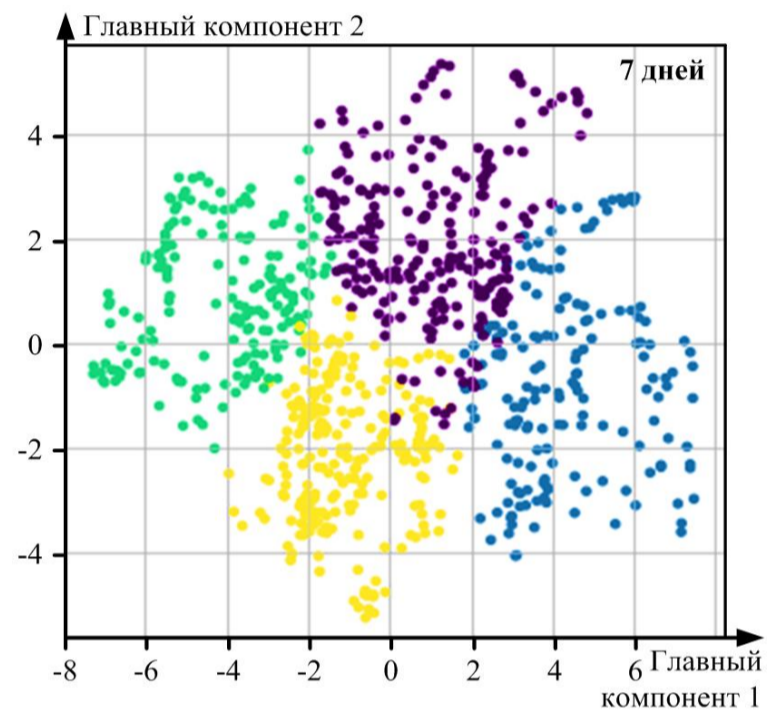
*a*



*б*



*в*



*г*

Рис. 3. Визуализация 4-х кластеров: *a* – данные за три дня; *б* – за четыре дня; *в* – за пять дней; *г* – за семь дней (цвет означает кластер)

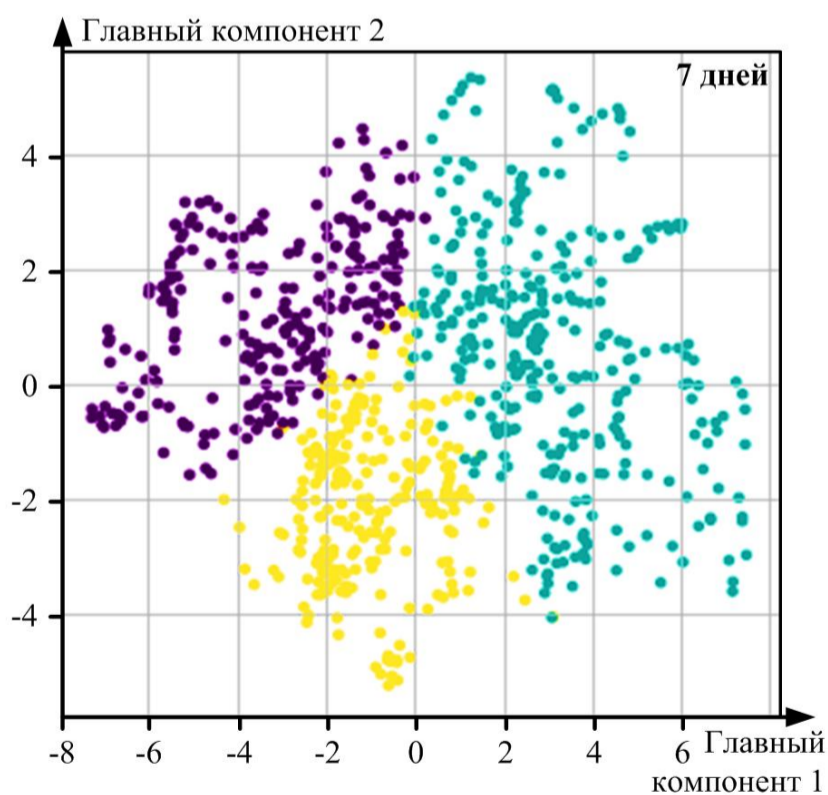


Рис. 4. Визуализация 3-х кластеров при использовании данных за семь дней

### 3. Прогнозирование.

Поскольку используется множество разнородных факторов, в качестве базового метода построения регрессионной модели выбрана искусственная нейронная сеть (ANN). Выборка данных не настолько большая,

чтобы использовать более сложные архитектуры, такие как сверточные нейронные сети или рекуррентные. Поэтому использован многослойный перцептрон следующего вида:

- 1) входной слой;
- 2) скрытый слой из 32 нейронов с функцией активации ReLU;
- 3) скрытый слой из 16 нейронов с функцией активации ReLU;
- 4) скрытый слой из 8 нейронов с функцией активации ReLU;
- 5) выходной нейрон с сигмоидальной функцией активации.

Обучение выполняется с помощью алгоритма Adam [23]. Модель реализована с помощью Python библиотек Keras и Tensorflow.

Проведено сравнение предложенного подхода с единой нейросетевой моделью (без учета кластеров), с авторегрессионной моделью (AR), не использующей метеорологические данные, и с линейной регрессией (LR), использующей метеорологические данные. Результаты показаны в табл. 2. В ней представлены результаты на тестовой части выборки (10% более новых данных, а 90% более старых использованы для обучения).

Результаты прогнозных моделей с использование метеорологических данных

Модель	Число кластеров	Номер кластера	MAE	MAPE	RMSE
			МВт	%	МВт
<b>ANN</b>	-	-	<b>1,023</b>	<b>7,48</b>	<b>1,27</b>
ANN	4	1	0,653	4,73	0,81
ANN	4	2	0,779	8,16	0,97
ANN	4	3	1,495	9,60	1,68
ANN	4	4	0,905	8,81	1,34
<b>ANN</b>	4	<b>средневзвешенное</b>	<b>0,939</b>	<b>7,70</b>	<b>1,19</b>
ANN		1	1,067	7,15	1,40
ANN	3	2	0,734	6,13	0,92
ANN	3	3	0,776	6,90	1,00
<b>ANN</b>	3	<b>средневзвешенное</b>	<b>0,846</b>	<b>6,67</b>	<b>1,09</b>
<b>LR</b>	-	-	<b>0,774</b>	<b>5,82</b>	<b>0,99</b>
LR	3	1	0,604	5,03	1,04
LR	3	2	0,751	4,86	0,73
LR	3	3	0,397	3,52	0,56
<b>LR</b>	3	<b>средневзвешенное</b>	<b>0,586</b>	<b>4,53</b>	<b>0,77</b>
<b>AR</b>	-	-	<b>0,803</b>	<b>6,11</b>	<b>0,96</b>

Из полученных результатов сравнения моделей можно сделать следующие заключения:

– использование кластеризации по метеорологическим условиям повышает точность как для линейной регрессии, так и для искусственных нейронных сетей; снижение ошибки составило для ANN с 1,023 МВт до 0,846 МВт (17 %), для LR с 0,774 до 0,586 (24 %);

– но в то же время, если число кластеров больше оптимального, может быть обратный эффект, поскольку в каждом из кластеров окажется недостаточно данных для обучения модели;

– использование метеорологических условий снижает ошибку прогноза, разница ошибки между авторегрессионной моделью, не использующей метеорологические параметры, и лучшей моделью, использующей их, составила 0,217 МВт (27 %);

– несколько неожиданным оказалось существенное преимущество линейной регрессии над нейросетевыми моделями.

Последний пункт можно объяснить двумя факторами:

1) использование признаков, полученных с помощью PCA, в качестве дополнительных входных признаков позволило во многом выполнить агрегирование метеорологических факторов еще до применения регрессионных моделей;

2) объем данных недостаточно велик для эффективного применения нейронных сетей, для их более эффективной работы, вероятно, требуются данные за период 10-20 лет.

Нужно подчеркнуть, что полученный результат позволяет создать надежную и очень простую модель на базе машинного обучения с минимальным использованием сложных и слабоконтролируемых методов машинного обучения.

Итоговая модель выглядит следующим образом.

1. На этапе построения прогнозных систем выполняется:

1) кластеризация алгоритмом k-means на три кластера;

2) применение PCA для формирования двух наиболее значимых признаков, агрегирующих метеорологические параметры;

3) построение для каждого кластера своей линейной регрессионной модели.

2. На этапе эксплуатации выполняется:

1) определение, к какому кластеру относятся текущие условия по данным метеорологических наблюдений в течение предыдущей недели;

2) применение PCA для получения агрегированных признаков;

3) применение линейной регрессионной модели для получения прогноза потребления.

На рис. 5 показано сопоставление истинного графика нагрузки и прогнозного для фрагмента тестовой выборки.

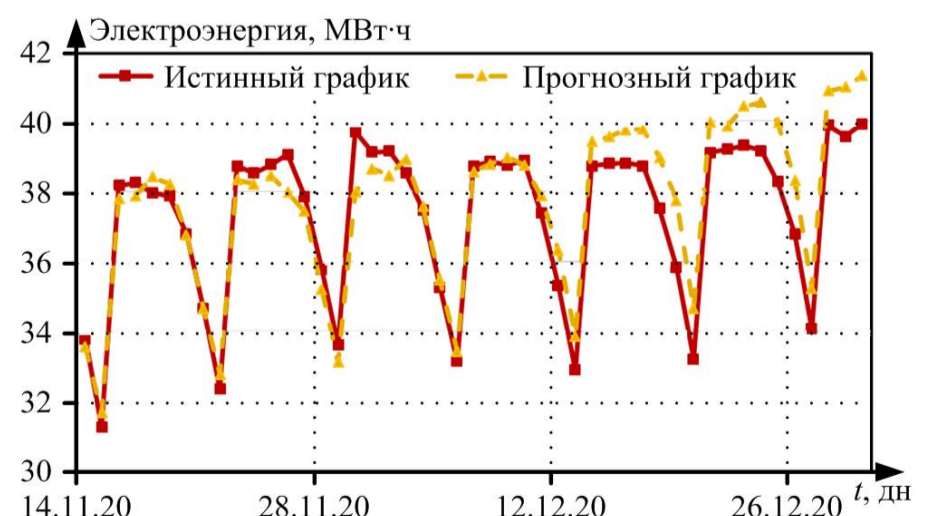


Рис. 5. Сравнение истинного и прогнозного графиков электропотребления

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе использованы посуточные данные за 2015-2020 гг. (ноябрь-март). Чтобы повысить точность прогнозирования электропотребления, в работе использованы метеорологические факторы и кластеризация условий. Использованы только ретроспективные данные, чтобы исключить зависимость от метеорологических прогнозов. На этапе предобработки данных применен метод разложения пространства признаков на главные компоненты, который, во-первых, позволяет проверить корректность кластеризации, во-вторых, агрегировать метеорологические признаки. Далее кластеризация позволяет сделать вместо одной модели, учитывающей все возможные условия работы энергосистемы, несколько более простых и более точных моделей. За счет кластеризации и PCA удалось при использовании линейных моделей получить более высокую точность, чем при использовании единой нейросетевой модели. Снижение MAE за счет кластеризации составило 0,19 МВт (MAE снижено на 24 %). Использование метеорологических условий позволило снизить ошибку прогноза на 0,22 МВт (27 %).

В результате средняя ошибка прогноза на тестовой части выборки данных составила 0,59 МВт, среднеквадратическая ошибка 0,77 МВт, средняя ошибка в процентах 4,5% по сравнению с авторегрессионной моделью без кластеризации и учета метеорологических факторов (MAE 0,80 МВт, RMSE 0,96 МВт, MAPE 6,11 %).

В дальнейшем планируется разработать модель более точной оценки снижения потребления ископаемого топлива за счет повышения точности прогнозирования нагрузки. А также исследовать возможность использования накопителей энергии для повышения гибкости управления электроэнергетической системой.

**Исследование выполнено при финансовой поддержке в рамках реализации программы развития НГТУ, научный проект №С22-15.**

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Medium term load forecasting for jordan electric power system using particle swarm optimization algorithm based on least square regression methods / M. Hattab, M. Ma'itah, T. Sweidan, M. Rifai // J. of Power and Energy Engineering. 2017. Vol. 5. Pp. 75-96. doi: 10.4236/jpee.2017.52005
2. Electricity load forecasting: a systematic review / I.K. Nti, M. Teimeh, O. Nyarko-Boateng, A. F. Adekoya // J. of Electrical Systems and Inf. Technol. 2020. Vol. 7(13). doi: 10.1186/s43067-020-00021-8
3. Abu-Shikhah N., Elkarmi F., Aloquili O. Medium-term electric load forecasting using multivariable linear and nonlinear regression // Smart Grid and Ren. Energy. 2011. Vol. 2(2). Pp. 126-135. doi: 10.4236/sgre.2011.22015
4. Hahn H., Meyer-Nieberg S., Pickl S. Electric load forecasting methods: Tools for decision making // European J. of Operational Research. 2009. Vol. 199(3). Pp. 902-907. doi: 10.1016/j.ejor.2009.01.062
5. Borges C.E., Penya Y.K., Fenandez I. Evaluating combined load forecasting in large power system and smart grids // IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2013. Vol. 9(3). Pp. 1570-1577. doi: 10.1109/TII.2012.2219063
6. Short-term power load forecasting, profile identification, and customer segmentation: a methodology based on periodic time series / M. Espinoza, C. Joye, R. Belmans, B. De Moor // IEEE Transactions on Power Systems. 2005. Vol. 20(3). Pp. 1622-1630. doi: 10.1109/TPWRS.2005.852123

7. Blind kalman filtering for short-term power load forecasting / S. Sharma, A. Majumdar, V. Elvira, É. Chouzenoux // IEEE Transactions on Power Systems. 2020. Vol. 35(6). Pp. 4916-4919. doi: 10.1109/TPWRS.2020.3018623
8. Arora S., Taylor J.W. Short-term forecasting of anomalous load using rule-based triple seasonal methods // IEEE Transactions on Power Systems. 2013. Vol. 28(3). Pp. 3235-3242. doi: 10.1109/TPWRS.2013.2252929
9. Multi-scale convolutional neural network with time-cognition for multi-step short-term power load forecasting / Z. Deng, B. Wang, Y. Xu, T. Xu // IEEE Access. 2019. Vol. 7. Pp. 88058-88071. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2926137
10. Chen B.-J., Chang M.-W., Lin Ch.-J. Load forecasting using support vector machines: a study on EUNITE competition 2001 // IEEE Transactions on Power Systems. 2004. Vol. 19(4). Pp. 1821-1830. doi: 10.1109/TPWRS.2004.835679
11. A short-term power load forecasting method using integrated CNN and LSTM network / S.H. Rafi, Nahid-Al-Masood, S.R. Deeba, E. Hossain // IEEE Access. 2021. Vol. 51. Pp. 32436-32448. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3060654
12. The impact of data filtration on the accuracy of multiple time-domain forecasting for photovoltaic power plants generation / S.A. Eroshenko, A.I. Khalyasmaa, D.A. Snegirev, V.V. Dubailova // Applied Sciences. 2020. Vol. 10(22). Art. 8265. doi: 10.3390/app10228265
13. Panapakidis I.P., Christoforidis G.C. Implementation of modified versions of the K-means algorithm in power load curves profiling // Sustainable Cities and Society. 2017. Vol. 35. Pp. 83-93. doi: 10.1016/j.scs.2017.08.002
14. Viola L.G. Clustering electricity usage profiles with K-means. URL: <https://towardsdatascience.com/clustering-electricity-profiles-with-k-means-42d6d0644d00> (дата обращения 15.09.2022).
15. Гуломзода А.Х., Сафаралиев М.Х., Люханов Е.А. Модифицированный способ синхронизации Microgrid с внешней изолированной энергосистемой // Электротехнические системы и комплексы. 2021. № 3(52). С. 72-80. doi: 10.18503/2311-8318-2021-3(52)-72-80
16. Разработка моделей среднесрочного прогнозирования электропотребления в изолированно работающих энергосистемах на основе ансамблевых методов машинного обучения / С.М. Асанова, Дж.С. Ахъев, С.А. Дмитриев, П.В. Матренин // Известия НТЦ единой энергетической системы. 2021. №1 (84). С. 32-39.
17. Адаптивные ансамблевые модели для среднесрочного прогнозирования выработки электроэнергии гидроэлектростанциями в изолированных энергосистемах с учётом изменений температуры / М.Х. Сафаралиев, П.В. Матренин, С.А. Дмитриев, Дж.С. Ахъев // Электротехнические системы и комплексы. 2022. 1(54). С. 38-45. doi: 10.18503/2311-8318-2022-1(54)-38-45
18. Разработка моделей среднесрочного прогнозирования притока воды для планирования выработки электроэнергии в изолированных энергосистемах / М.Х. Сафаралиев, С.Е. Кокин, С.А. Дмитриев, П.В. Матренин // Электричество. 2022. № 5. С. 58-68. doi: 10.24160/0013-5380-2022-5-58-68
19. Khalyasmaa A.I., Matrenin P.V., Eroshenko S.A. Inappropriate machine learning application in real power industry cases // International Journal of Electrical and Computer Engineering. 2022. Vol. 12(3). Pp. 3023-3032. doi: 10.11591/ijece.v12i3.pp 3023-3032
20. Improving accuracy and generalization performance of small-size recurrent neural networks applied to short-term load forecasting / P.V. Matrenin, V.Z. Manusov, A.I. Khalyasmaa, D.V. Antonenkov // Mathematics. 2020. Vol. 8(12). Art. 2169. doi: 10.3390/math8122169
21. Hartigan J.A., Wong M.A. Algorithm AS 136: A K-Means clustering algorithm // Journal of the Royal Statistical Society. Series C (Applied Statistics). 1979. Vol. 28(1). Pp. 100-108. doi: 10.2307/2346830

22. Principal manifolds for data visualization and dimension reduction / Gorban A.N., Kegl B., Wunsch D.C., Zinovyev A. Berlin: Springer, 2008. 361 p.

23. Kingma D.P., Ba J.L. Adam: A method for stochastic optimization. URL: <https://arxiv.org/pdf/1412.6980.pdf> (дата обращения 12.09.2022).

Поступила в редакцию 20 сентября 2022 г.

Принята к печати 13 октября 2022 г.

INFORMATION IN ENGLISH

MEDIUM-TERM FORECASTING OF POWER CONSUMPTION BASED ON AN ARTIFICIAL NEURAL NETWORK IN ISOLATED POWER SYSTEMS

Murodbek Kh. Safaraliev

Postgraduate Student, Research Engineer, Department of Automated Electrical Systems, Ural Federal University, Ural Power Engineering Institute, Yekaterinburg, Russia, murodbek\_03@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3433-9742>

Pavel V. Matrenin

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Department of Industrial Power Supply Systems, Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia, matrenin.2012@corp.nstu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5704-0976>

Natalya G. Kyrianova

Teaching Assistant, Department of Automated Power Systems, Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia, kyrianova.2010@corp.nstu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3145-8869>

Anvari H. Ghulomzoda

Postgraduate Student, Department of Automated Electric Power Systems, Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia, anvar\_4301@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4344-6462>

In the conditions of sharply variable highland climatic conditions, territorial distribution, generating capacity shortage, high cost of carbon fuel and the absence of large energy storage facilities to cover peak loads, it is necessary to ensure balance reliability in mountain isolated power systems (IES), taking into account the optimal resources allocation. To ensure the required balance reliability, it is necessary to implement reliable forecasting of power consumption in the medium term for planning the generating equipment load, taking into account the necessary and sufficient load coverage, generation costs, environmental friendliness and other criteria. Therefore, increased requirements are placed on the accuracy and robustness of the load forecast. A study of the meteorological factors influence on the medium-term forecasting of electricity consumption at the power plant in the Gorno-Badakhshan Autonomous Oblast (GBO), located in the Republic of Tajikistan, which is characterized by the above-mentioned specific properties. A neural network model was used to predict power consumption taking into account meteorological factors. In order to increase the effectiveness of model training, an approach based on clustering of meteorological conditions is proposed. Its own neural network model is created for each cluster, in addition, an auxiliary model has been trained, which relates the current conditions to one of the clusters. Thus, instead of a single model that would take into account all possible conditions, a system of much simpler models was created, which increases the interpretability of the forecasting procedure and reduces the risk of retraining.

**Keywords:** medium-term forecasting of power consumption, adaptive machine learning models, meteorological conditions, isolated power system, clustering

REFERENCES

1. Hattab M., Ma'itah M., Sweidan T., Rifai M. Medium Term Load Forecasting for Jordan Electric Power System Using Particle Swarm Optimization Algorithm Based on Least Square Regression Methods. *J. of Power and Energy Engineering*. 2017, vol. 5, Pp. 75-96. doi: 10.4236/jpee. 2017.52005
2. Nti I.K., Teimeh M., Nyarko-Boateng O., Adekoya A.F. Electricity load forecasting: a systematic review. *J. of Elec-*

- trical Systems and Inf. Technol. 2020, vol. 7(13). doi: 10.1186/s43067-020-00021-8
3. Abu-Shikhah N., Elkarmi F., Aloquili O. Medium-Term Electric Load Forecasting Using Multivariable Linear and Non-Linear Regression. *Smart Grid and Ren. Energy*. 2011, vol. 2, pp. 126-135. doi: 10.4236/sgre.2011.22015
4. Hahn H., Meyer-Nieberg S., Pickl S. Electric load forecasting methods: Tools for decision making. *European J. of Operational Research*. 2009, vol. 199, pp. 902-907. doi: 10.1016/j.ejor.2009.01.062
5. Borges C.E., Penya Y.K., Fenandez I. Evaluating combined load forecasting in large power system and smart grids. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2013, vol. 9(3), pp. 1570-1577. doi: 10.1109/TII.2012.2219063
6. Espinoza M., Joye C., Belmans R., De Moor B. Short-term power load forecasting, profile identification, and customer segmentation: a methodology based on periodic time series. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2005, vol. 20(3), pp. 1622-1630. doi: 10.1109/TPWRS.2005.852123
7. Sharma S., Majumdar A., Elvira V., Chouzenoux É. Blind kalman filtering for short-term power load forecasting. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2020, vol. 35(6), pp. 4916-4919. doi: 10.1109/TPWRS.2020.3018623
8. Arora S., Taylor J.W. Short-term forecasting of anomalous load using rule-based triple seasonal methods. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2013, vol. 28(3), pp. 3235-3242. doi: 10.1109/TPWRS.2013.2252929
9. Deng Z., Wang B., Xu Y., Xu T. Multi-scale convolutional neural network with time-cognition for multi-step short-term power load forecasting. *IEEE Access*. 2019, vol. 7, pp. 88058-88071. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2926137
10. Chen B.-J., Chang M.-W., Lin Ch.-J. Load forecasting using support vector machines: a study on EUNITE competition 2001. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2004, vol. 19(4), pp. 1821-1830. doi: 10.1109/TPWRS.2004.835679
11. Rafi S.H., Nahid-Al-Masood, Deeba S.R., Hossain E. A short-term power load forecasting method using integrated CNN and LSTM network. *IEEE Access*. 2021, vol. 51, pp. 32436-32448. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3060654

12. Eroshenko S.A., Khalyasmaa A.I., Snegirev D.A., Dubailova V.V. The impact of data filtration on the accuracy of multiple time-domain forecasting for photovoltaic power plants generation. *Applied Sciences*. 2020, vol. 10(22). Art. 8265. doi: 10.3390/app10228265
13. Panapakidis I.P., Christoforidis G.C. Implementation of modified versions of the K-means algorithm in power load curves profiling. *Sustainable Cities and Society*. 2017, vol. 35, pp. 83-93. doi: 10.1016/j.scs.2017.08.002
14. Viola L.G. Clustering electricity usage profiles with K-means. URL: <https://towardsdatascience.com/clustering-electricity-profiles-with-k-means-42d6d0644d00> (accessed 15 September 2022)
15. Ghulomzoda A.H., Safaraliev M.Kh., Lyukhanov E.A. Modified method for synchronizing Microgrid with an external isolated power system. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical systems and complexes], 2021, no. 3(45), pp. 72-80. (In Russian)
16. Asanova S.M., Ahyoev J.S., Dmitriev S.A., Matrenin P.V. Development of models for power consumption medium-term forecasting in isolated power systems based on ensemble methods of machine learning. *Izvestija NTC EDINOJ ENERGETICHESKOJ SISTEMY* [Proceedings of the STC of UNIFIED ENERGY SYSTEM], 2021, no. 1(84), pp. 32-39. (In Russian)
17. Safaraliev M.Kh., Matrenin P.V., Dmitriev S.A., Ahyoev J.S. Adaptive ensemble models for medium-term forecasting of power generation by hydropower plants in isolated power systems taking into account temperature changes. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical systems and complexes], 2022, no. 1(54), pp. 38-45. (In Russian). doi: 10.18503/2311-8318-2022-1(54)-38-45
18. Safaraliev M.Kh., Kokin S.E., Dmitriev S.A., Matrenin P.V. Development of medium-term water inflow forecasting models for planning electricity generation in isolated power systems. *Elektrichestvo* [Electricity], 2022, no.5, pp. 58-68. (In Russian). doi: 10.24160/0013-5380-2022-5-58-68
19. Khalyasmaa A.I., Matrenin P.V., Eroshenko S.A. Inappropriate machine learning application in real power industry cases. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*. 2022, vol. 12(3), pp. 3023-3032. doi: 10.11591/ijece.v12i3.pp 3023-3032
20. Matrenin P.V., Manusov V.Z., Khalyasmaa A.I., Antonenkov D.V. Improving accuracy and generalization performance of small-size recurrent neural networks applied to short-term load forecasting. *Mathematics*. 2020, vol. 8(12), Art. 2169. doi: 10.3390/math8122169
21. Hartigan J.A., Wong M.A. Algorithm AS 136: A K-Means Clustering Algorithm. *Journal of the Royal Statistical Society. Series C (Applied Statistics)*. 1979, vol. 28(1), pp. 100-108. doi: 10.2307/2346830
22. Gorban A.N., Kegl B., Wunsch D.C., Zinovyev A. *Principal Manifolds for Data Visualization and Dimension Reduction*. Springer, 2008. 361 p.
23. Kingma D.P., Ba J.L. Adam: A method for stochastic optimization. URL: <https://arxiv.org/pdf/1412.6980.pdf> (accessed 12 September 2022)

Среднесрочное прогнозирование электропотребления на основе искусственной нейронной сети в изолированных энергосистемах / М.Х. Сафаралиев, П.В. Матренин, Н.Г. Кирьянова, А.Х. Гуломзода // *Электротехнические системы и комплексы*. 2022. № 4(57). С. 4-11. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-4\(57\)-4-11](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-4(57)-4-11)

Safaraliev M.Kh., Matrenin P.V., Kyrianova N.G., Ghulomzoda A.H. Medium-Term Forecasting of Power Consumption Based on an Artificial Neural Network in Isolated Power Systems. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2022, no. 4(57), pp. 4-11. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-4\(57\)-4-11](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-4(57)-4-11)

Сенюк М.Д., Дмитриева А.А.

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

## РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОЦЕНКИ ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ЭНЕРГОСИСТЕМ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕОРИИ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА С УЧЁТОМ ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ СВЯЗАННОСТИ СЕТИ

Развитие современных электроэнергетических систем связано с цифровизацией и увеличением потока данных от объектов электроэнергетики к центрам управления. С другой стороны, увеличение доли возобновляемых источников энергии приводит к увеличению неопределённости электрических режимов и снижению суммарной инерции, что накладывает новые требования к быстрдействию процедуры оценки динамической устойчивости и противоаварийного управления. Применение традиционных детерминированных алгоритмов к анализу динамической устойчивости энергосистем в условиях ужесточающихся требований к быстрдействию могут оказаться неэффективными. Для преодоления недостатков традиционных методов оценки динамической устойчивости энергосистем могут быть использованы методы искусственного интеллекта. Данный класс методов обладает значительным быстрдействием обученных моделей и возможностью поиска закономерностей в данных, что делает его эффективным в условиях современных энергосистем. В работе представлены результаты разработки метода оценки динамической устойчивости энергосистемы на основе методов искусственного интеллекта с учётом топологической связанности электрической сети. Методика основана на применении алгоритма градиентного бустинга деревьев решений. Численное моделирование выполнено на модели IEEE39, реализованной в Matlab/Simulink, для реализации алгоритмов машинного обучения использована библиотека Scikit-learn языка программирования Python3. Для обучения алгоритма машинного обучения использовались углы нагрузок синхронных генераторов, уровни напряжения в узлах подключения синхронных генераторов к электрической сети, топология электрической сети, продолжительность и сопротивление короткого замыкания. В результате применения обученного алгоритма с учётом топологии электрической сети на тестовой выборке была получена точность в 91,5%. Точность работы на тестовой выборке без учёта топологической связанности элементов энергосистемы составила 81,6%.

**Ключевые слова:** динамическая устойчивость, искусственный интеллект, машинное обучение, математическое моделирование

### ВВЕДЕНИЕ

Использование алгоритмов искусственного интеллекта (ИИ) для решения задач проектирования, эксплуатации и управления электроэнергетическими системами (ЭЭС) стало возможным благодаря цифровизации отрасли и накоплению достаточных объёмов данных. На сегодняшний день алгоритмы ИИ находят для решения следующего спектра научных задач:

1. Оценка технического состояния оборудования [1].
2. Прогнозирование электропотребления [2].
3. Прогнозирование выработки мощности возобновляемых источников электроэнергии (ВИЭ) [3].
4. Настройка устройств управления режимом ЭЭС [4].
5. Оценивание состояния [5].
6. Идентификация возмущения в ЭЭС [6].

Однако на сегодняшний день при эксплуатации и управлении ЭЭС отдаётся предпочтение традиционным методам, в основе которых лежат детерминированные методы. С другой стороны, развитие методов ИИ с точки зрения быстрдействия, точности и масштабируемости способно предоставить качественно новый инструмент для анализа и управления электроэнергетическими режимами. Кроме того, активное внедрение синхронизированных векторных измерений (СВИ) [7] существенно увеличит поток информации от объектов электроэнергетики к центрам управления, что способствует увеличению времени работы традиционных подходов [8] к анализу электрических режимов.

В условиях цифровизации, увеличения потока данных в центры управления, а также возможных ограничений быстрдействия традиционных алгоритмов анализа и управления режимами ЭЭС методы ИИ могут предоставить новые инструменты и возможности. В частности, одним из возможных применений методов ИИ является оценка динамической устойчивости (ДУ) ЭЭС. Традиционными подходами к решению данной задачи являются:

1. Численное игнорирование дифференциально-алгебраической системы уравнений, описывающей динамическую модель ЭЭС.

2. Применение качественного метода анализа полной энергии ЭЭС (правило площадей) [9].

Данные подходы обладают недостатками, связанными со значительными временными затратами, необходимыми для численного дифференцирования математических моделей ЭЭС высокой размерности, и возможным снижением точности анализа ДУ качественным методом. Для преодоления недостатков традиционных подходов к оценке ДУ ЭЭС возможно применение методов ИИ, позволяющих значительно сократить время решения задачи при обеспечении заданной точности.

Целью данной статьи является разработка метода оценки ДУ ЭЭС на основе методов ИИ с учётом топологической связанности электрической сети.

### ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

В качестве исходных данных для задачи оценки ДУ ЭЭС могут применяться измерения, получаемые с трансформаторов тока (ТТ) и напряжения (ТН),

установленных на объектах электроэнергетики, и измерения, получаемые в ходе численного моделирования процессов, протекающих в имитационной модели исследуемого фрагмента электрической сети. Рассмотренные выше источники информации о состоянии ЭЭС имеют определённые достоинства и недостатки. Данные, поступающие с измерительных систем, обладают лучшей репрезентативностью фактического электрического режима ЭЭС с учётом влияния различных систем управления с их фактическими настройками. Цифровое моделирование ЭЭС позволяет рассмотреть совокупность электрических режимов, необходимых для противоаварийного и режимного управления. Оба вида исходных данных активно используются для формирования обучающих и тестовых выборок при решении задачи оценки ДУ на основе алгоритмов искусственного интеллекта (ИИ).

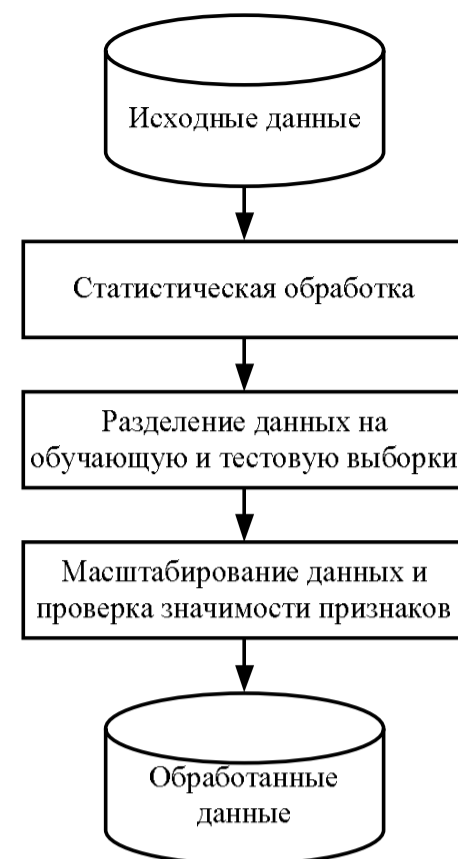
С точки зрения теории искусственного интеллекта, задача оценки УД может быть приведена к задаче бинарной классификации [10] с двумя классами: потеря ДУ и сохранение ДУ. Так как явление потери ДУ является на порядок более редким событием по сравнению с сохранением ДУ, то данные в выборках становятся несбалансированными, что имеет значительное влияние на процесс обучения и использование модели ИИ. В данных обучающей и тестовой выборок могут присутствовать шумы, выбросы и пропуски.

Важным этапом формирования обучающей и тестовой выборок является определение значимых признаков, оказывающих влияние на состояние класса (потеря ДУ или сохранение ДУ). В качестве признаков для задачи оценки ДУ могут применяться различные сигналы параметров электрического режима во временной области: скорость вращения ротора синхронного генератора (СГ), угол нагрузки, активная и реактивная мощности и т.д.

Также могут учитываться признаки в частотной области. Многие традиционные методы ИИ не рассчитаны на работу с сигналами во временной области. Для преодоления данной проблемы используется выделение из временной области двух характерных точек – до и после возмущения. Данная процедура уменьшает временной ряд до двух точек [11], что снижает общую размерность решаемой задачи и увеличивает скорость обучения и использования выбранной модели ИИ. Дальнейшее уменьшение размерности задачи может быть выполнено за счёт применения метода анализа главных компонент [12], разложения по сингулярным составляющим или линейного дискриминантного анализа. В исследовании [13] предложен метод для случайного перебора признаков с целью минимизации времени обучения выбранного алгоритма ИИ.

Общая схема подготовки данных выборки для обучения и тестирования алгоритма оценки ДУ на основе ИИ приведена на **рис. 1**.

Данные, полученные путём математического моделирования или с устройств регистрации параметров электрического режима работы реальной ЭЭС, содержат значительное число временных рядов, описывающих установившиеся или переходные процессы. Такая информация обозначена на **рис. 1** в качестве исходных данных.



**Рис. 1. Процесс формирования обучающей и тестовой выборок для оценки ДУ**

Первый этап обработки данных состоит в устранении шумов, выбросов и пропусков за счёт применения процедуры статистического анализа. Следующий этап заключается в разбиении всего объёма данных на тестовую и обучающую выборки. Далее выполняется центрирование и масштабирование данных. Заключительный этап подготовки данных связан с проверкой значимости признаков с помощью корреляционного анализа. Так как потеря ДУ является довольно редким событием в современных ЭЭС, то важной задачей при использовании алгоритма ИИ для анализа ДУ является подготовка синтетического набора данных за счёт проведения серии расчётов электромеханических переходных процессов на моделях ЭЭС. Серия расчётов выполняется при варьировании уровней нагрузок и генераций в узлах ЭЭС, а также мест, типов и длительности коротких замыканий (КЗ) [14]. Из полученных результатов выполняется выбор следующих данных: 10% – трёхфазные КЗ, 20% – двухфазные КЗ и 70% – однофазные КЗ [15]. Чаще всего в процессе моделирования может быть получена несбалансированная выборка с превалированием режимов с сохранением ДУ. В рамках разделения выборки на обучающую и тестовую выполняется стратифицированное случайное разделение с обеспечением сбалансированности данных.

Задача оценки ДУ ЭЭС может быть решена за счёт применения традиционных алгоритмов ИИ:

1. Метод опорных векторов.
2. Случайный лес.
3. Градиентный бустинг (ГБ).
4. Многослойный перцептрон.
5. Ансамблевые алгоритмы.
6. Алгоритмы глубокого обучения.
7. Алгоритмы обучения с подкреплением.

На сегодняшний день наиболее распространённым алгоритмом, используемым для оценки ДУ ЭЭС, является метод опорных векторов [16, 17]. В работе [18] были использованы модернизированные версии метода опорных векторов.

Алгоритм случайного леса (Random Forest) основан на использовании совокупности элементарных алгоритмов классификации, называемых деревьями

решений. Результат классификации каждого отдельного дерева берётся с заранее определённым в процессе обучения весом. Использование алгоритма случайного леса в задачах оценки ДУ описано в работах [19-21].

Другие алгоритмы ИИ также находят применение для оценки ДУ. В работе [22] был использован ГБ, авторы исследования [23] использовали ядерную регрессию, исследование [24] посвящено разработке алгоритма оценки ДУ на основе байесовского классификатора.

Ансамблевый алгоритм представляет собой совокупность элементарных (базовых) алгоритмов, общее решение алгоритма получается путём анализа решений каждого из базовых подалгоритмов. В ансамблевых алгоритмах выделяют следующие подмножества: алгоритмы бэггинга (bagging), бустинга (boosting) и стекирование. Алгоритмы бэггинга и бустинга используют результаты базовых алгоритмов, работающих независимо, а в алгоритме стекирования применяется модель второго уровня, которая обучается на данных базовых моделей. Ансамблевые алгоритмы нашли широкое применение в работах, направленных на оценку ДУ за счёт применения ИИ [25-27].

Глубокое обучение основано на разработке искусственных нейронных сетей (ИНС) с множеством слоёв различного типа. Основная сложность при использовании глубокого обучения связана с инициализацией слоёв, выбором функции активации, определением оптимальной скорости обучения и т.д. Использование глубокого обучения для оценки ДУ не предполагает решение задачи выбора признаков в отличие от других алгоритмов ИИ. В работах [28-30] для оценки ДУ ЭЭС предлагается использование ИНС.

На сегодняшний день существует значительное количество подходов к оценке ДУ ЭЭС на основе ИИ. Рассмотренные подходы реализуются с использованием различных алгоритмов ИИ и различных наборов признаков в обучающих выборках.

В общем случае ДУ СГ определяется:

1. Доаварийной активной мощностью, выдаваемой в ЭЭС.
2. Значением напряжения в точке присоединения к ЭЭС.
3. Импедансом от точки КЗ до точки присоединения к ЭЭС.
4. Законом автоматического регулятора активной мощности (АРВ).

В рассмотренных исследованиях для анализа ДУ использовались электрические и механические параметры режима работы СГ и не учитывалась топология ЭЭС, которая влияет не только на доаварийные параметры режима работы СГ, но и на характер развития послеаварийного переходного процесса.

#### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ XGBOOST И RANDOM FOREST ДЛЯ ОЦЕНКИ ДУ ЭЭС

Для решения задачи оценки ДУ СГ с учётом топологической связанности сети выбраны алгоритмы классификации XGBoost [31] и Random Forest [32] по следующим причинам:

1. Высокое быстродействие обученных алгоритмов.
2. Формализованная процедура обучения.
3. Устойчивость алгоритмов к пропускам данных и выбросам.

Алгоритм XGBoost основан на технике комбинации базовых классификаторов. В ходе работы алгоритма создаётся аддитивная композиция, в которой каждый последующий классификатор минимизирует общую ошибку модели. Классификаторы добавляются итеративно до достижения требуемой точности. При работе алгоритма результат классификации определяется суммой результатов базовых алгоритмов:

$$Y = \sum_{i=1}^K f_i(x_i), \quad (1)$$

где  $Y$  – результат классификации алгоритма XGBoost;  $f_i(x_i)$  – результат работы каждого базового классификатора;  $K$  – количество базовых классификаторов.

Для обучения каждого базового классификатора внутри композиции выполняется поиск минимума регуляризованной функции потерь [10], которая обеспечивает отсутствие переобучения алгоритма.

Алгоритм Random Forest использует ансамбль деревьев решений, итоговый результат классификации является усреднением решений всех деревьев в ансамбле:

$$A = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m a_i(x_i), \quad (2)$$

где  $A$  – результат классификации алгоритма Random Forest;  $a_i(x_i)$  – результат работы каждого дерева решений;  $m$  – количество деревьев решений в ансамбле.

#### ЧИСЛЕННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Численный эксперимент выполнен с использованием математического моделирования серии электро-механических переходных процессов в Matlab/Simulink, для реализации алгоритмов машинного обучения использована библиотека Scikit-learn языка программирования Python3.

#### ФОРМИРОВАНИЕ ВЫБОРКИ ДАННЫХ

Для формирования исходных данных для обучения и тестирования алгоритмов XGBoost и RandomForest использованы результаты численного моделирования, выполненные для тестовой схемы IEEE39, графика которой приведена на рис. 2. Подробное описание модели приведено в исследовании [33].

Для формирования выборки данных был смоделирован набор электро-механических переходных процессов при варьировании следующих переменных:

1. Мощности СГ (всего 9 СГ, СГ 1 моделирует внешнюю энергосистему и его устойчивость не анализируется) изменялись в диапазоне: 60, 80 и 100% от номинальных активных мощностей;
2. В каждом узле (всего 39 узлов) рассматривались однофазные, двухфазные и трёхфазные КЗ длительностью 0,15 секунд.
3. Рассматривались единичные ремонты каждой линии электропередачи (всего 37 линий).

Таким образом, общее количество электро-механических переходных процессов  $N$  составляет:

$$N = N_1 N_2 N_3 N_4 = 3 \cdot 3 \cdot 38 \cdot 37 = 12\ 654, \quad (3)$$

где  $N_1$  – количество вариантов загрузки СГ;  $N_2$  – количество типов КЗ;  $N_3$  – количество узлов, в которых моделируется КЗ (в узле 39 КЗ не моделируется);  $N_4$  – количество единичных ремонтов линий электропередачи.



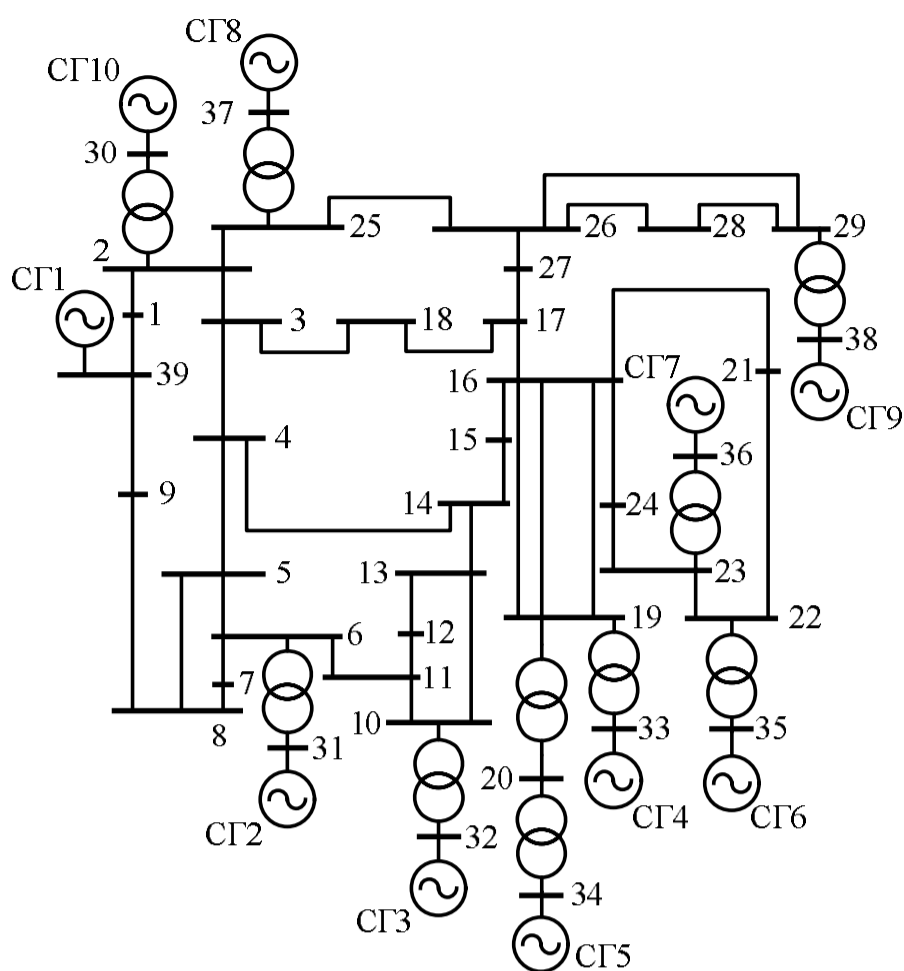


Рис. 2. Графика тестовой модели ЭЭС IEEE39

В результате выполнения серии электромеханических переходных процессов получена выборка данных, структура которой приведена в табл. 1.

Для выполнения расчётов 12 654-х электромеханических переходных процессов был использован компьютер с процессором Intel(R) Core(TM) i7-7700T CPU @ 2,90GHz. Вычисления выполнялись на видеокарте NVIDIA GeForce 940MX с использованием средства параллельных вычислений Parallel Computing Toolbox, входящих в Matlab.

Для анализа влияния каждого признака на результаты классификации выполнен анализ корреляции Спирмена. Результаты признаков с корреляцией к результату классификации по модулю менее 10% представлены на рис. 3. Так как для приведённых на рис. 3 признаков значение корреляции является незначительным, то они исключаются из выборки данных.

Таблица 1

Структура выборки данных

Атрибут выборки
Признак. Ремонт линии
Признак. Загрузки СГ (принимаются одинаковыми для всех СГ)
Признак. Узел КЗ
Признак. Сопротивление КЗ
Признак. Угол нагрузки СГ 2
...
Признак. Угол нагрузки СГ 10
Признак. Напряжение в точке подключения СГ2
...
Признак. Напряжение в точке подключения СГ10
Результат классификации. СГ с потерей ДУ

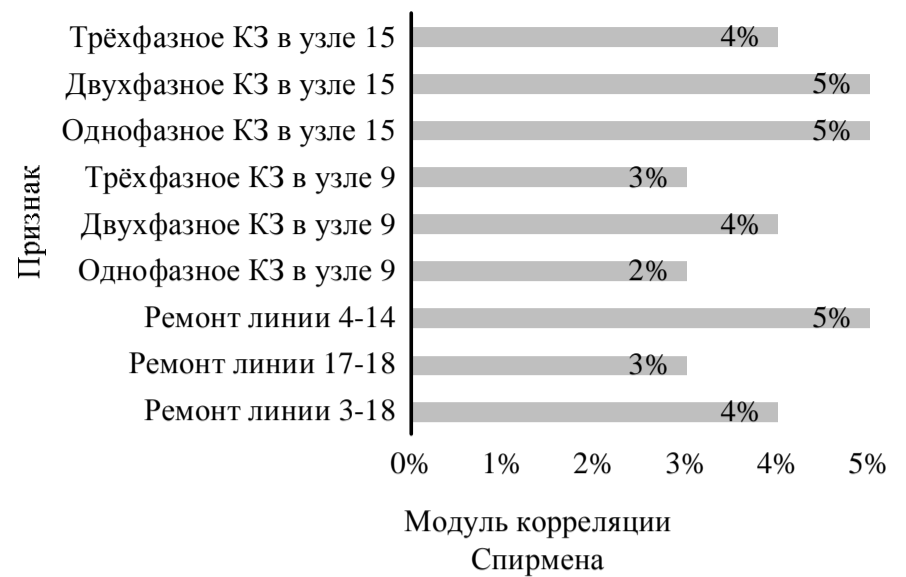


Рис. 3. Результаты корреляционного анализа данных

Для получения тестовой и обучающей выборки данных применялась процедура разделения общей выборки в соотношении 80%:20% (80% – обучающая выборка, 20% – тестовая выборка).

РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ АЛГОРИТМА XGBOOST

При обучении алгоритма XGBoost были получены следующие параметры модели:

1.  $L_1$  регуляризация, штраф на величины весовых функций [31] (базовое значение 0): 0,1.
2.  $L_2$  регуляризация, штраф на величины весовых функций [31] (базовое значение 0): 0,2.
3. Минимально требуемое уменьшение функции потерь при создании нового листа (базовое значение 0): 0,5.
4. Глубина дерева базового классификатора, определяет сложность модели и степень переобучения (базовое значение 3): 5.
5. Базовое значение вероятности отнесения строки данных к классу для бинарного случая, позволяет скорректировать падение точности вследствие несбалансированности классов (базовое значение 0,5): 0,8.
6. Число базовых классификаторов композиции, контролирует сложность модели: 50.
7. Темп градиентного спуска, контролирует возможность упустить локальные минимумы: 1.
8. Доля тренировочной выборки, случайно выбранная для обучения одного дерева (базовое значение 1): 0,8.

Значимость признаков для обученной модели приведена на рис. 4.

Наибольшую значимость для оценки ДУ тестовой ЭЭС с помощью алгоритма XGBoost имеет признак трёхфазного КЗ в узле 16, что объясняется наличием значительного числа связей узла 16 с другими узлами.

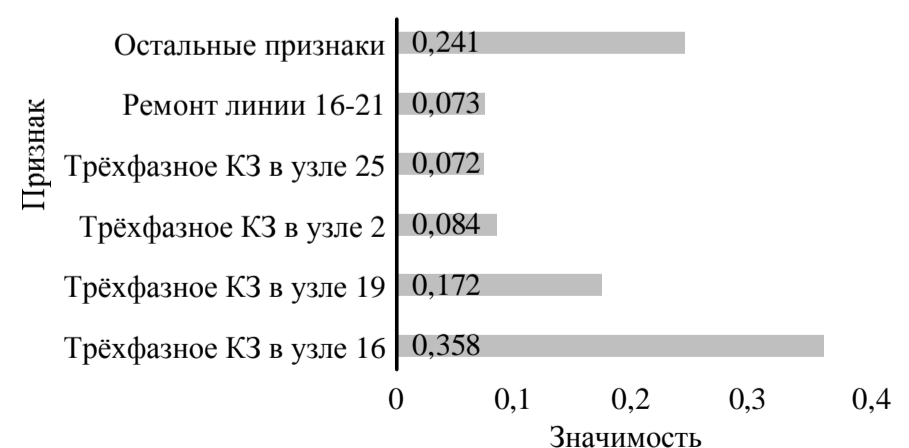


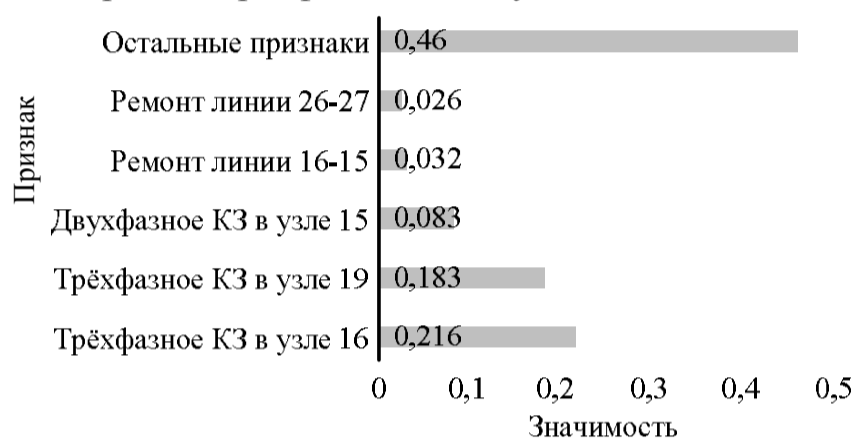
Рис. 4. Значимость признаков для алгоритма XGBoost

РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ АЛГОРИТМА RANDOM FOREST

При обучении алгоритма Random Forest были получены следующие параметры модели:

1. Число базовых классификаторов (базовое значение 100): 150.
2. Глубина дерева базового классификатора (базовое значение 1): 5.
3. Минимальная доля экземпляров данных для проведения расщепления (базовое значение 2 строки): 0,005.
4. Минимальная доля экземпляров данных, попадающая в лист (базовое значение 1 строка): 0,002.
5. Доля признаков тренировочной выборки, случайно выбранная для обучения одного дерева: 0,6.
6. Веса классов; в графе значения описаны веса для класса 0, вес класса 1 неизменен (базовое значение 1 для каждого класса): 6.

Значимость признаков для обученной модели приведена на **рис. 5**. Для алгоритма Random Forest наибольшая значимость для классификации потери ДУ имеет признак трёхфазного КЗ в узле 16.



**Рис. 5. Значимость признаков для алгоритма Random Forest**

СРАВНЕНИЕ АЛГОРИТМОВ

В **табл. 2** приведено сравнение результатов тестирования алгоритмов XGBoost и Random Forest.

Для оценки точности работы алгоритма использованы параметры «точность» (precision) и «полнота» (recall), которые определяются по следующим выражениям:

$$\text{precision} = \frac{tp}{tp + fp}, \quad (4)$$

$$\text{recall} = \frac{tp}{tp + fn}, \quad (5)$$

где  $tp$  – истинно-положительное решение;  $tn$  – истинно-отрицательное решение;  $fp$  – ложно-положительное решение;  $fn$  – ложно-отрицательное решение.

**Таблица 2**

Сравнение результатов тестирования обученных алгоритмов

Параметр	XGBoost	Random Forest
С учётом топологической связанности сети		
Точность	0,915	0,816
Точность средняя по классам	0,864	0,744
precision	0,898	0,847
recall	0,858	0,851
Без учёта топологической связанности сети		
Точность	0,806	0,801
Точность средняя по классам	0,817	0,711
precision	0,815	0,816

recall	0,824	0,801
--------	-------	-------

Для проверки гипотезы о влиянии топологической связанности электрической сети на результат работы используемых алгоритмов машинного обучения было проведено две серии численных экспериментов. В первой серии численных экспериментов обучение и тестирование алгоритмов выполнялось без добавления признака, описывающего топологию электрической сети. В этом случае была получена точность 80,6 и 80,1 % для алгоритмов XGBoost и Random Forest соответственно. Для второй серии опытов в набор данных был добавлен признак, описывающий топологию электрической сети. На тестовой выборке данных были получены значения точности в 91,5 и 81,6% для алгоритмов XGBoost и Random Forest соответственно. Увеличение точности оценки ДУ объяснимо физической природой влияния суммарного сопротивления от точки КЗ до исследуемого СГ [9].

Таким образом, в ходе численного эксперимента было доказано влияние топологической связанности электрической сети на точность работы рассматриваемых ИИ. Также было показано, что использование алгоритма XGBoost увеличивает точность классификации потери ДУ ЭЭС на 9,9% по сравнению с алгоритмом Random Forest.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлен алгоритм оценки ДУ ЭЭС на основе алгоритмов XGBoost и Random Forest с учётом топологической связанности электрической сети. Выполнен обзор существующих исследований, направленных на оценку ДУ ЭЭС с помощью методов машинного обучения.

Апробация выполнена на модели IEEE39. Для вычисления серии электромеханических процессов использован компьютер с процессором Intel(R) Core(TM) i7-7700T CPU @ 2,90GHz. Вычисления выполнялись на видеокарте NVIDIA GeForce 940MX с использованием средства параллельных вычислений Parallel Computing Toolbox, входящих в Matlab. В результате моделирования получена выборка данных из 12 654-х электромеханических переходных процессов.

В результате обучения были получены параметры алгоритмов XGBoost и Random Forest. Для тестовой выборки точность классификации потери ДУ для алгоритма XGBoost с учётом топологической связанности сети составляет 91,5%, для алгоритма Random Forest точность составила 81,6%. Учёт топологической связанности электрической сети позволяет увеличить точность алгоритмов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Khalyasmaa A.I., Senyuk M.D., Eroshenko S.A. High-Voltage Circuit Breakers Technical State Patterns Recognition Based on Machine Learning Methods // IEEE Transactions on Power Delivery. 2019. No. 4(34). Pp. 1747-1756. doi: 10.1109/TPWRD.2019.2921095
2. Electric vehicle charging load clustering and load forecasting based on long short term memory neural network / H. Wang, X. Huang, S. Gao, Z. Yang, T. Gao, Q. Zhao, H. Ding // 5th International Electrical and Energy Conference (CIEEC). IEEE, 2022. Pp. 3196-3200. doi: 10.1109/CIEEC54735.2022.9846570
3. Improved PV Forecasts for Capacity Firming / C. Keerthisinghe, E. Mickelson, D.S. Kirschen, N. Shih, S. Gibson // IEEE Access. 2020. Vol. 8. Pp. 152173-152182.

- doi: 10.1109/ACCESS.2020.3016956
4. Gelli R., Manimaran G. Anomaly Detection and Mitigation for Wide-Area Damping Control using Machine Learning // Power & Energy Society General Meeting (PESGM). IEEE, 2020. doi: 10.1109/PESGM41954.2020.9281615
  5. Hong G., Kim Y.-S. Supervised Learning Approach for State Estimation of Unmeasured Points of Distribution Network // IEEE Access. 2020. Vol. 8. Pp. 113918-113931. doi: 10.1109/ACCESS.2020.3003049
  6. Reduced Kernel Random Forest Technique for Fault Detection and Classification in Grid-Tied PV Systems / K. Dhibi, R. Fezai, M. Mansouri, M. Trabelsi, A. Kouadri, K. Bouzara, H. Nounou, M. Nounou // IEEE Journal of Photovoltaics. 2020. No. 6(10). Pp. 1864-1871. doi: 10.1109/JPHOTOV.2020.3011068
  7. The Accelerate Estimation Method of Power System Parameters in Static and Dynamic Processes / S. Beryozkina, M. Senyuk, A. Berdin, A. Dmitrieva, S. Dmitriev, P. Erokhin // IEEE Access. 2022. Vol. 10. Pp. 61522-61529. doi: 10.1109/ACCESS.2022.3181196
  8. Guest Editorial Big Data Analytics for Grid Modernization / T. Hong, C. Chen, J. Huang, N. Lu, L. Xie, H. Zareipour // IEEE Transactions on Smart Grid. 2016. No. 5(7). Pp. 2395-2396. doi: 10.1109/TSG.2016.2593358
  9. Kundur P. Power System Stability and Control. McGraw-Hill, Inc., New York, 1994.
  10. Алексеева В.А. Использование методов машинного обучения в задачах бинарной классификации // Автоматизация процессов управления. 2015. №. 3. С. 58-63.
  11. Time Series-Analysis Based Engineering of High-Dimensional Wide-Area Stability Indices for Machine Learning / R.T. Dabou, I. Kamwa, C.Y. Chung, C.F. Mugombozi // IEEE Access. 2021. Vol. 9. Pp. 104927-104939. doi:10.1109/ACCESS.2021.3099459
  12. Chen K. Indirect PCA Dimensionality Reduction Based Machine Learning Algorithms for Power System Transient Stability Assessment // Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia). IEEE, 2019. Pp. 4175-4179. doi: 10.1109/ISGT-Asia.2019.8881370
  13. Online transient stability margin prediction of power systems with wind farms using ensemble regression trees / D. Mi, T. Wang, M. Gao, C. Li, Z. Wang // International Transactions on Electrical Energy Systems. 2021. No. 11(31). doi: 10.1002/2050-7038.13057
  14. Non-parametric statistics-based predictor enabling online transient stability assessment / T. Liu, Y. Liu, L. Xu, J. Liu, J. Mitra, Y. Tian // IET Gener. Transm. Distrib. 2018. Vol. 12(21). Pp. 5761-5769. doi: 10.1049/iet-gtd.2018.5802.
  15. Power System Transient Stability Assessment Using Stacked Autoencoder and Voting Ensemble / P. Sarajcev, A. Kunac, G. Petrovic, M. Despalatovic // Energies. 2021. No. 14(11). 3148. doi: 10.3390/en14113148
  16. Transient Stability Assessment Method for Power System Based on SVM with Adaptive Parameters Adjustment / D. Shao, Y. Xu, S. Ma, Y. Jing, W. Sun, T. Zhou, J. Yang // 4th International Electrical and Energy Conference (CIEEC). IEEE, 2021. Pp. 1-6. doi: 10.1109/CIEEC50170.2021.9510574
  17. Support vector machines for transient stability analysis of large-scale power systems / L.S. Moulin, A.P.A. da Silva, M.A. El-Sharkawi, R.J. Marks // IEEE Transactions on Power Systems. 2004. No. 2(19). Pp. 818-825. doi: 10.1109/TPWRS.2004.826018
  18. Power System Transient Stability Assessment Based on Big Data and the Core Vector Machine / B. Wang, B. Fang, Y. Wang, H. Liu and Y. Liu // IEEE Transactions on Smart Grid. 2016. No. 5(7). Pp. 2561-2570. doi: 10.1109/TSG.2016.2549063
  19. Mukherjee R., De A. Development of an Ensemble Decision Tree-Based Power System Dynamic Security State Predictor // IEEE Systems Journal. 2020. No. 3(14). Pp. 3836-3843. doi: 10.1109/JSYST.2020.2978504
  20. A Comparative Analysis of Decision Trees, Support Vector Machines and Artificial Neural Networks for On-line Transient Stability Assessment / N.G. Baltas, P. Mazidi, J. Ma, F. de Asis Fernandez, P. Rodriguez // International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST). IEEE, 2018. Pp. 1-6. doi: 10.1109/SEST.2018.8495872
  21. Amraee T., Ranjbar S. Transient Instability Prediction Using Decision Tree Technique // IEEE Transactions on Power Systems. 2013. No. 3(28). Pp. 3028-3037. doi: 10.1109/TPWRS.2013.2238684
  22. Li N., Li B., Gao L. Transient Stability Assessment of Power System Based on XGBoost and Factorization Machine // IEEE Access. 2020. Vol. 8. Pp. 28403-28414. doi: 10.1109/ACCESS.2020.2969446
  23. Data-driven Transient Stability Assessment Based on Kernel Regression and Distance Metric Learning / X. Liu, Y. Min, L. Chen, X. Zhang and C. Feng // Journal of Modern Power Systems and Clean Energy. 2021. No. 1(9). Pp. 27-36. doi: 10.35833/MPCE.2019.000581
  24. Pannell Z., Ramachandran B., Snider D. Machine learning approach to solving the transient stability assessment problem // Texas Power and Energy Conference (TPEC). IEEE, 2018. Pp. 1-6. doi: 0.1109/TPEC.2018.8312089.
  25. A Unified Online Deep Learning Prediction Model for Small Signal and Transient Stability / S.K. Azman, Y.J. Isbeih, M.S.E. Moursi, K. Elbassioni // IEEE Transactions on Power Systems. 2020. No. 6(35). Pp. 4585-4598. doi: 10.1109/TPWRS.2020.2999102
  26. Power system transient stability assessment based on dimension reduction and cost-sensitive ensemble learning / F. Hang, S. Huang, Y. Chen, S. Mei // Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2). IEEE, 2017. Pp. 1-6. doi: 10.1109/EI2.2017.8245698.
  27. Li N., Li B., Gao L. Transient Stability Assessment of Power System Based on XGBoost and Factorization Machine // IEEE Access. 2020. Vol. 8. Pp. 28403-28414. doi: 10.1109/ACCESS.2020.2969446
  28. Power System Transient Stability Assessment Based on Voltage Phasor and Convolution Neural Network / J. Hou, C. Xie, T. Wang, Z. Yu, Y. Lü, H. Dai // International Conference on Energy Internet (ICEI). IEEE, 2018. Pp. 247-251. doi: 10.1109/ICEI.2018.00052
  29. Transient Stability Assessment of Power Systems Using Cost-sensitive Deep Learning Approach / Y. Zhou, W. Zhao, Q. Guo, H. Sun, L. Hao // 2nd Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2). IEEE, 2018. Pp. 1-6, doi: 10.1109/EI2.2018.8582047
  30. Real-Time Detection of Critical Generators in Power Systems: A Deep Learning HCP Approach / B. Shinde, S. Wang, P. Dehghanian, M. Babakmehr // Texas Power and Energy Conference (TPEC). IEEE, 2020. Pp. 1-6. doi: 10.1109/TPEC48276.2020.9042552
  31. Preventive control for power system transient security based on XGBoost and DCOPF with consideration of model interpretability / S. Zhang, D. Zhang, J. Qiao, X. Wang, Z. Zhang // CSEE Journal of Power and Energy Systems. 2021. No. 2(7). Pp. 279-294. doi: 10.17775/CSEEJPES.2020.04780
  32. Sizing Optimization and Energy Management Strategy for Hybrid Energy Storage System Using Multiobjective Optimization and Random Forests / M. Li, L. Wang, Y. Wang, Z. Chen // IEEE Transactions on Power Electronics. 2021. No. 10(36). Pp. 11421-11430. doi: 10.1109/TPEL.2021.3070393
  33. Subrahmanyam S.V., Jain S.K., Narayanan G. Real-time Simulation of IEEE 10-Generator 39-Bus System with Power System Stabilizers on Miniature Full Spectrum Simulator // International Conference on Sustainable Energy Technologies and Systems (ICSETS). IEEE, 2019. Pp. 161-166. doi: 0.1109/ICSETS.2019.8745001

Поступила в редакцию 30 сентября 2022 г.

Принята к печати 17 ноября 2022 г.

## DEVELOPMENT OF A METHOD FOR ASSESSMENT THE DYNAMIC STABILITY OF POWER SYSTEMS ON THE BASIS OF THE THEORY OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE APPLICATION TAKING INTO ACCOUNT THE TOPOLOGICAL CONNECTIVITY OF THE NETWORK

Mikhail D. Senyuk

Leading engineer, Department of Automated Electrical Systems, Ural Federal University, Ural Power Engineering Institute, Yekaterinburg, Russia. E-mail: mdsenuk@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5589-7922>

Anna A. Dmitrieva

Postgraduate Student, Department of Automated Electrical Systems, Ural Federal University, Ural Power Engineering Institute, Yekaterinburg, Russia. E-mail: anyapprox@gmail.com.

The development of modern electric power systems is associated with digitalization and an increase in the data flow from electric power facilities to the control centers. On the other hand, an increase in the renewable energy sources share leads to an increase in electrical modes uncertainty and a decrease in total inertia, which imposes new requirements on the speed of the procedure for assessing dynamic stability and emergency control. The application of traditional deterministic algorithms to the analysis of the dynamic stability of power systems in the presence of increased requirements for performance may turn out to be inefficient. To overcome the shortcomings of traditional methods for assessing the dynamic stability of power systems, artificial intelligence methods can be used. This class of methods has a significant speed of trained models and the ability to search for patterns in the data, which makes it effective in modern power systems. The paper presents the results of developing a method for assessing the dynamic stability of a power system based on artificial intelligence methods, taking into account the topological connectivity of the electrical network. The technique is based on the application of the gradient boosting algorithm for decision trees. Numerical simulation was performed on the IEEE39 model implemented in Matlab/Simulink; the Scikit-learn library of the Python3 programming language was used to implement machine learning algorithms. To train the machine learning algorithm the load angles of synchronous generators, voltage levels at the nodes connecting synchronous generators to the electrical network, the topology of the electrical network, the duration and resistance of the short circuit were used. As a result of applying the trained algorithm, taking into account the topology of the electrical network, an accuracy of 91.5% was obtained on the test sample. The accuracy on the test sample without taking into account the topological connectivity of the elements of the power system was 81.6%.

**Keywords:** transient stability, artificial intelligence, machine learning, mathematical modeling

## REFERENCES

1. Khalyasmaa A.I., Senyuk M.D., Eroshenko S.A. High-Voltage Circuit Breakers Technical State Patterns Recognition Based on Machine Learning Methods. *IEEE Transactions on Power Delivery* 2019, no. 4(34), pp. 1747-1756. doi: 10.1109/TPWRD.2019.2921095
2. Wang H., Huang X., Gao S., Yang Z., Gao T., Zhao Q., Ding H. Electric vehicle charging load clustering and load forecasting based on long short term memory neural network. 5<sup>th</sup> International Electrical and Energy Conference (CIEEC). IEEE, 2022, pp. 3196-3200. doi: 10.1109/CIEEC54735.2022.9846570
3. Keerthisinghe C., Mickelson E., Kirschen D.S., Shih N., Gibson S. Improved PV Forecasts for Capacity Firming. *IEEE Access*. 2020, vol. 8, pp. 152173-152182. doi: 10.1109/ACCESS.2020.3016956
4. Gelli R., Manimaran G. Anomaly Detection and Mitigation for Wide-Area Damping Control using Machine Learning. *Power & Energy Society General Meeting (PESGM)*. IEEE, 2020. doi: 10.1109/PESGM41954.2020.9281615
5. Hong G., Kim Y.-S. Supervised Learning Approach for State Estimation of Unmeasured Points of Distribution Network. in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 113918-113931, 2020.
6. Dhibi K., Fezai R., Mansouri M., Trabelsi M., Kouadri A., Bouzara K., Nounou H., Nounou M. Reduced Kernel Random Forest Technique for Fault Detection and Classification in Grid-Tied PV Systems. *IEEE Access*. 2020, no. 6(10), pp. 1864-1871. doi: 10.1109/JPHOTOV.2020.3011068
7. Beryozkina S., Senyuk M., Berdin A., Dmitrieva A., Dmitriev S., Erokhin P. The Accelerate Estimation Method of Power System Parameters in Static and Dynamic Processes. *IEEE Access*. 2022, vol. 10, pp. 61522-61529. doi: 10.1109/ACCESS.2022.3181196
8. Hong T., Chen C., Huang J., Lu N., Xie L., Zareipour H. Guest Editorial Big Data Analytics for Grid Modernization. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2016, no. 5(7), pp. 2395-2396. doi: 10.1109/TSG.2016.2593358
9. Kundur P. *Power System Stability and Control*. McGraw-Hill, Inc., New York, 1994.
10. Alekseeva V. A. Use of machine learning methods in binary classification problems. *Avtomatizatsiya protsessov upravleniya* [Automation of control processes]. 2015, no. 3, pp. 58-63. (In Russian)
11. Dabou R.T., Kamwa I., Chung C.Y., Mugombozi C.F. Time Series-Analysis Based Engineering of High-Dimensional Wide-Area Stability Indices for Machine Learning. *IEEE Access*. 2021, vol. 9, pp. 104927-104939. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3099459
12. Chen K. Indirect PCA Dimensionality Reduction Based Machine Learning Algorithms for Power System Transient Stability Assessment. *Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia)*. IEEE, 2019, pp. 4175-4179. doi: 10.1109/ISGT-Asia.2019.8881370
13. Mi D., Wang T., Gao M., Li C., Wang Z. Online transient stability margin prediction of power systems with wind farms using ensemble regression trees. *International Transactions on Electrical Energy Systems*. 2021, no. 11(31). doi: 10.1002/2050-7038.13057
14. Liu T., Liu Y., Xu L., Liu J., Mitra J., Tian, Y. Non-parametric statistics-based predictor enabling online transient stability assessment. *IET Gener. Transm. Distrib.* 2018, vol. 12(21), pp. 5761-5769. doi: 10.1049/iet-gtd.2018.5802
15. Sarajcev P., Kunac A., Petrovic G., Despalatovic M. Power System Transient Stability Assessment Using Stacked Auto-encoder and Voting Ensemble. *Energies*. 2021, no. 14(11), 3148. doi: 10.3390/en14113148
16. Shao D., Xu Y., Ma S., Jing Y., Sun W., Zhou T., Yang J. Transient Stability Assessment Method for Power System Based on SVM with Adaptive Parameters Adjustment. 4<sup>th</sup> International Electrical and Energy Conference (CIEEC). IEEE,

- 2021, pp. 1-6. doi: 10.1109/CIEEC50170.2021.9510574
17. Moulin L.S., da Silva A.P.A., El-Sharkawi M.A., Marks R.J. Support vector machines for transient stability analysis of large-scale power systems. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2004, no. 2(19), pp. 818-825. doi: 10.1109/TPWRS.2004.826018
  18. Wang B., Fang B., Wang Y., Liu H., Liu Y. Power System Transient Stability Assessment Based on Big Data and the Core Vector Machine. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2016, no. 5(7), pp. 2561-2570. doi: 10.1109/TSG.2016.2549063
  19. Mukherjee R., De A. Development of an Ensemble Decision Tree-Based Power System Dynamic Security State Predictor. *IEEE Systems Journal*. 2020, no. 3(14), pp. 3836-3843. doi: 10.1109/JSYST.2020.2978504
  20. Baltas N.G., Mazidi P., Ma J., de Asis Fernandez F., Rodriguez P. A Comparative Analysis of Decision Trees, Support Vector Machines and Artificial Neural Networks for On-line Transient Stability Assessment. *International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST)*. IEEE, 2018, pp. 1-6. doi: 10.1109/SEST.2018.8495872
  21. Amraee T., Ranjbar S. Transient Instability Prediction Using Decision Tree Technique," in *IEEE Transactions on Power Systems*. 2013, no. 3(28), pp. 3028-3037. doi: 10.1109/TPWRS.2013.2238684
  22. Li N., Li B., Gao L. Transient Stability Assessment of Power System Based on XGBoost and Factorization Machine. *IEEE Access*. 2020, vol. 8, pp. 28403-28414. doi: 10.1109/ACCESS.2020.2969446
  23. Liu X., Min Y., Chen L., Zhang X., Feng C. Data-driven Transient Stability Assessment Based on Kernel Regression and Distance Metric Learning. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*. 2021, no. 1(9), pp. 27-36. doi: 10.35833/MPCE.2019.000581
  24. Pannell Z., Ramachandran B., Snider D. Machine learning approach to solving the transient stability assessment problem. *Texas Power and Energy Conference (TPEC)*. IEEE, 2018, pp. 1-6. doi: 0.1109/TPEC.2018.8312089
  25. Azman S.K., Isbeih Y.J., Moursi M.S.E., Elbassioni K. A Unified Online Deep Learning Prediction Model for Small Signal and Transient Stability. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2020, no. 6(35), pp. 4585-4598. doi: 10.1109/TPWRS.2020.2999102
  26. Hang F., Huang S., Chen Y., Mei S. Power system transient stability assessment based on dimension reduction and cost-sensitive ensemble learning. *Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)*. IEEE, 2017, pp. 1-6. doi: 10.1109/EI2.2017.8245698
  27. Li N., Li B., Gao L. Transient Stability Assessment of Power System Based on XGBoost and Factorization Machine. *IEEE Access*. 2020, vol. 8, pp. 28403-28414. doi: 10.1109/ACCESS.2020.2969446
  28. Hou J., Xie C., Wang T., Yu Z., Lü Y., Dai H. Power System Transient Stability Assessment Based on Voltage Phasor and Convolution Neural Network. *International Conference on Energy Internet (ICEI)*. IEEE, 2018, pp. 247-251. doi: 10.1109/ICEI.2018.00052
  29. Zhou Y., Zhao W., Guo Q., Sun H., Hao L. Transient Stability Assessment of Power Systems Using Cost-sensitive Deep Learning Approach. *2<sup>nd</sup> Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)*. IEEE, 2018, pp. 1-6, doi: 10.1109/EI2.2018.8582047
  30. Shinde B., Wang S., Dehghanian P., Babakmehr M. Real-Time Detection of Critical Generators in Power Systems: A Deep Learning HCP Approach. *Texas Power and Energy Conference (TPEC)*. IEEE, 2020, pp. 1-6. doi: 10.1109/TPEC48276.2020.9042552
  31. Zhang S., Zhang D., Qiao J., Wang X., Zhang Z. Preventive control for power system transient security based on XGBoost and DCOPF with consideration of model interpretability. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*. 2021, no. 2(7), pp. 279-294. doi: 10.17775/CSEEJPES.2020.04780
  32. Li M., Wang L., Wang Y., Chen Z. Sizing Optimization and Energy Management Strategy for Hybrid Energy Storage System Using Multiobjective Optimization and Random Forests. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2021, no. 10(36), pp. 11421-11430. doi: 10.1109/TPEL.2021.3070393
  33. Subrahmanyam S.V., Jain S.K., Narayanan G. Real-time Simulation of IEEE 10-Generator 39-Bus System with Power System Stabilizers on Miniature Full Spectrum Simulator. *International Conference on Sustainable Energy Technologies and Systems (ICSETS)*. IEEE, 2019, pp. 161-166. doi: 0.1109/ICSETS.2019.8745001

Сенюк М.Д., Дмитриева А.А. Разработка метода оценки динамической устойчивости энергосистем на основе применения теории искусственного интеллекта с учётом топологической связанности сети // *Электротехнические системы и комплексы*. 2022. № 4(57). С. 12-19. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-4\(57\)-12-19](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-4(57)-12-19)

Senyuk M.D., Dmitrieva A.A. Development of a Method for Assessment the Dynamic Stability of Power Systems on the Basis of the Theory of Artificial Intelligence Application Taking into Account the Topological Connectivity of the Network. *Elektrotechnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2022, no. 4(57), pp. 12-19. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-4\(57\)-12-19](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-4(57)-12-19)

Тарасов В.М., Патшин Н.Т., Петухова О.И., Морщакин А.Э., Курбанов А.Р.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПЕРВИЧНОГО ДВИГАТЕЛЯ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ПРОМЫШЛЕННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

Современные условия рыночной экономики приводят к необходимости расширения крупными промышленными предприятиями собственных электростанций. Это выражается в увеличении единичных установленных мощностей и числа синхронных генераторов. Возможность использования на ряде предприятий тяжелой промышленности попутных газов, пригодных для утилизации, а также дешевизна природного газа создают благоприятные условия для строительства современных электростанций относительно невысокой мощности. Поэтому получают распространение генераторы, приводимые газовыми турбинами, газовыми утилизационными бескомпрессорными турбинами и газопоршневыми двигателями. Однако увеличение числа генераторов местных электростанций приводит к усложнению аварийных режимов работы. Так, не исключен островной режим работы, который требует тщательного прогнозирования. Следовательно, возникает необходимость исследования возможных переходных и установившихся режимов с целью анализа результирующей устойчивости. Для этого была получена методика расчета переходных электромеханических режимов, учитывающая вид первичных двигателей и характеристик регуляторов скорости и активной мощности. На базе данного алгоритма получено программное обеспечение, позволяющее рассчитывать переходные процессы, по их результатам оценивать влияние первичного двигателя на результирующую устойчивость системы электроснабжения, а также разрабатывать систему мероприятий с целью ее повышения. Алгоритм предусматривает разработку математических моделей синхронных генераторов с учетом действия автоматических регуляторов первичных двигателей и их динамических свойств. Большинство существующих математических моделей синхронных генераторов и методов расчета переходных режимов разработаны применительно к турбогенераторам с паровыми турбинами. Данная работа освещает вопросы математического моделирования синхронных генераторов, приводимых во вращение газовыми турбинами, газопоршневыми двигателями и газовыми утилизационными бескомпрессорными турбинами, с целью исследования переходных электромеханических процессов и разработки мероприятий по повышению результирующей устойчивости источников энергии в различных эксплуатационных режимах.

**Ключевые слова:** синхронный генератор, математическая модель, программный комплекс, автоматический регулятор скорости, параллельная работа, газотурбинная электростанция, газопоршневая электростанция

### ВВЕДЕНИЕ

Исследование переходных электромеханических процессов (ПЭМП) систем электроснабжения промышленных предприятий (СЭСПП) является одной из важнейших задач, решаемых как на стадии проектирования объекта, так и в процессе эксплуатации с целью выбора электрооборудования, уставок релейной защиты и автоматики (РЗА), анализа процесса самозапуска электродвигателей и для оценки результирующей устойчивости синхронных генераторов (РУСГ) в целом. Особую актуальность эта задача приобретает в условиях расширения металлургическими предприятиями собственной энергетической базы, сопровождающегося внедрением таких объектов малой энергетики, как газотурбинные (ГТЭС), парогазовые (ПГЭС), газопоршневые электростанции (ГПЭС), а также газовые утилизационные бескомпрессорные турбины (ГУБТ), что характерно как для отечественных, так и зарубежных предприятий [1-4].

До настоящего времени методы расчета ПЭМП и, следовательно, математические модели элементов систем электроснабжения были в основном ориентированы на крупные энергосистемы с электростанциями большой мощности [5-8]. В связи с этим в основном разработаны математические модели синхронных турбогенераторов (СТГ), приводимых паровыми турбинами (ПТ), с учетом регуляторов скорости и активной мощности [9-11]. В условиях распространения объек-

тов малой энергетики таких моделей недостаточно. С целью расчета и анализа ПЭМП разнообразие первичных двигателей (ПД) в составе различных электростанций СЭСПП, имеющих в своем составе источники распределенной генерации (ИРГ) и специфичную нагрузку [12, 13], требует разработки математических моделей СТГ с учетом закона действия автоматического регулятора скорости и активной мощности (АРСиАМ). Помимо этого, необходимо принимать в расчет действие РЗА, которое может существенно влиять на область допустимых режимов малоинерционных турбин [14] и весьма ее ограничивать. В связи с этим были разработаны математические модели СТГ, приводимых первичными двигателями различного вида [15-19].

В наши дни существует значительное количество методов расчета ПЭМП в СЭСПП, основанных на методах численного интегрирования дифференциальных уравнений движения. В данной работе в основу расчета положена методика, включающая методы последовательных интервалов и последовательного эквивалентирования, представленные в [18, 19]. При таком подходе первоначально определяются параметры начального режима. Далее исследуемый промежуток времени разбивается на определенное число интервалов, задается возмущение, и на каждом шаге в расчетную схему СТГ вводятся переходной (сверхпереходной) ЭДС за переходным (сверхпереходным) сопротивлением и углом ротора относительно вектора напряжения связи с питающей энергосистемой. Изменение угла ротора, характеризующего РУСГ, зависит от ускорения вала, возникающего при небалансе электромагнитной и механической мощностей на валу. В свою очередь, механический

момент и мощность турбины зависят от рода ПД и особенностей действия АРСиАМ. Данный подход для расчета ПЭМП положен в основу разработанного программного комплекса (ПК). Общие подходы при исследовании ПЭМП приведены в работах [17, 19].

Математическое моделирование синхронных генераторов, приводимых различными первичными двигателями, с целью анализа переходных процессов

Поскольку с целью расчета ПЭМП был принят метод численного интегрирования, то разработанные математические модели учитывают данный подход. Так, в их основу положено уравнение движения ротора СТГ. Дополнительно для всех рассматриваемых видов турбин был проведен анализ действия АРСиАМ и составлены соответствующие уравнения, учитывающие постоянные инерции системы регулирования, а также выбранный закон, поскольку параллельная работа и возможный островной режим могут предъявлять противоположные требования к системе. При параллельной работе с электроэнергетической системой большой мощности ИРГ, как правило, работают по закону постоянства выдаваемой активной мощности, у некоторых из них даже трудно обеспечить коэффициент статизма характеристик АРСиАМ. Поэтому островной режим, который может внезапно возникнуть, должен быть предварительно рассчитан и генераторы должны быть для него предназначены согласно техническим характеристикам. При островном режиме основным требованием, предъявляемым к машинам, является обеспечение допустимого уровня частоты при обеспечении потребителей активной мощностью. При этом возникает необходимость применения вторичного регулирования частоты, связанного с изменением уставки АРСиМ, что не всегда позволяют обеспечить системы регулирования объектов распределенной генерации.

Кроме того, при дефиците активной мощности в энергоузле резерв по регулированию исчерпывается и турбина работает как нерегулируемая, что также требует коррекции математической модели с учетом характеристик ПД.

Внедрение ГТЭС требует исследования анализа влияния СТГ, приводимых газовыми турбинами, на РУСГ СЭСПП. С этой целью было выполнено математическое моделирование СТГ в составе ГТЭС.

Для СТГ, ПД которого представляет собой газовую турбину с одним валом, вращающим ротор и компрессор, небаланс мощностей на валу может быть определен по следующей формуле [19]:

$$\Delta P = P_T \left( \frac{\omega}{\omega_{ном}} \right) - P_{Пер} - P_K - P_C - P_{Ac} + P_{Рот} + P_{Стат} + P_{Газ} + P_{Пер}, \quad (1)$$

где  $P_T$  – механическая мощность турбины;  $P_{Пер}$  – изменение мощности турбины, обусловленное действием АРСиАМ;  $P_K$  – мощность, потребляемая компрессором;  $P_C$  – синхронная электромагнитная мощность;  $P_{Пер}$  – знакопеременная мощность;  $P_{Рот}$  – мощность, обусловленная потерями в обмотках возбуждения и демпферных контурах;  $P_{Ac}$  – демпферная электромагнитная мощность, вырабатываемая в режимах асин-

хронного хода;  $P_{Газ}$  – мощность, обусловленная действием газовых объемов в камере сгорания и между камерой и турбиной;  $P_{Стат}$  – мощность, обусловленная потерями в обмотках статора;  $\omega$  – текущая угловая частота вращения вала ГТУ;  $\omega_{ном}$  – номинальная угловая частота вращения вала ГТУ.

В ПЭМП изменение углов роторов СТГ, возникающее вследствие небаланса мощностей на валу турбины, приводит к изменению скорости вращения вала компрессора, подающего сжатый воздух в камеру сгорания. В настоящее время в ГТЭС применяются осевые турбокомпрессоры, мощность которых в зависимости от изменения частоты вала определяется по формуле [19]

$$P_K = \frac{\omega}{\omega_{ном}} \left( 0,13 + (1 - 0,13) \left( \frac{\omega}{\omega_{ном}} \right)^2 \right). \quad (2)$$

Поскольку компрессор имеет вентиляторный момент сопротивления на валу, то изменение скорости приводит к изменению производительности механизма, подающего нагретый воздух под давлением в камеру сгорания. При пренебрежении изменением температуры и давления изменение производительности происходит по соотношению

$$G_K = G_{K0} \left( \frac{\omega}{\omega_0} \right)^{1,25}, \quad (3)$$

где  $G_K$ ,  $G_{K0}$  – производительность компрессора в текущий момент времени и при  $\omega_{ном}$ .

Поскольку весовой расход топлива в ГТЭС мал по сравнению с расходом воздуха, то им можно пренебречь. В этом случае расход газа турбиной  $G_T$  можно принять равным производительности компрессора. Поэтому уравнение мощности нерегулируемой ГТУ при изменении скорости и неизменных иных параметрах выглядит следующим образом [19]:

$$P_T = \frac{P_{T0}}{G_{T0}} \left( 2 - \frac{\omega}{\omega_{ном}} \right) G_{T0} \left( \frac{\omega}{\omega_{ном}} \right)^{1,25} = P_{T0} \left( 2 - \frac{\omega}{\omega_{ном}} \right) \left( \frac{\omega}{\omega_{ном}} \right)^{1,25}, \quad (4)$$

где  $G_{T0}$  – расход воздуха через турбину при  $\omega_{ном}$ ;  $P_{T0}$  – мощность ГТУ в начальный момент.

Если учесть данные соотношения, то получим выражение для определения небаланса мощностей на валу нерегулируемой одновальной ГТУ при любом ПЭМП. Это актуально при расчете РУСГ в случае дефицита активной мощности. Мощность, обусловленную действием АРСиАМ  $P_{Пер}$ , в этом случае необходимо принять равной нулю.

Современные ГТЭС обеспечены АРСиАМ, которые при отклонении скорости вала или мощности от номинальной воздействуют на орган, управляющий подачей топлива в камеру сгорания. При наличии таких регуляторов в уравнении мощность турбины принимается равной начальному значению в установившемся режиме, предшествующем ПЭМП, а мощность

АРСиАМ представлена зависимостью мощности турбины от скорости с учетом соответствующих постоянных времени. Также необходимо учесть мощность, обусловленную действием газовых объемов  $P_{\text{Газ}}$ , ухудшающую процесс регулирования в одновальной установке. Система АРСиАМ в составе одновальной ГТУ состоит из гидродинамического регулятора скорости (РС), измеряющего число оборотов агрегата, и сервомотора, управляющего клапанами впуска газа в камеру сгорания. При всяком нарушении равновесия между моментами турбины и СТГ данная система регулирования поддерживает скорость вращения в соответствии с уставкой. Регулирование осуществляется с жесткой или гибкой обратной связью. В ходе расчета ПЭМП также разбивается на  $n$  интервалов. При наличии жесткой обратной связи изменение мощности турбины за счет действия регулятора на  $P_{\text{Газ}}$ -м интервале определится как [19]

$$\Delta P_{P(n)} = \frac{\Delta \delta_{(n)}}{360 f_{\text{НОМ}}} \cdot \frac{P_{\text{ТНОМ}}}{\sigma T_s} \cdot \left( 1 + \frac{\Delta \delta_{(n)}}{\Delta t \cdot \omega_{\text{НОМ}}} \right) - \frac{\Delta t}{T_s} \cdot \frac{1 + \frac{\Delta \delta_{(n)}}{\Delta t \omega_{\text{НОМ}}}}{1 + \frac{\Delta \delta_{(n-1)}}{\Delta t \omega_{\text{НОМ}}}} \cdot P_{\text{Пер}(n-1)}, \quad (5)$$

$$P_{\text{Пер}(n)} = P_{\text{Пер}(n-1)} + \Delta P_{P(n)}, \quad (6)$$

где  $f_{\text{НОМ}}$  – номинальная частота сети;  $P_{\text{ТНОМ}}$  – номинальная мощность турбины;  $\Delta t$  – выбранный временной интервал;  $\sigma$  – степень неравномерности АРСиАМ;  $P_{\text{Пер}(n)}$  – суммарное изменение мощности турбины за счет действия РС на  $n$ -м интервале;  $\Delta \delta_{(n)}$  – изменение угла ротора на  $n$ -м интервале времени;  $P_{\text{Пер}(n-1)}$  – суммарное изменение мощности турбины за счет действия АРСиАМ на  $(n-1)$ -м интервале;  $T_s$  – постоянная времени сервомотора.

Кроме гидродинамических РС и сервомотора в состав АРСиАМ с гибкой обратной связью может входить гидродинамический изодром и рычаг обратной связи. Для такой системы уравнение изменения мощности за счет действия РС определяется как [19]

$$\Delta P_{P(n)} = \frac{P_{\text{ТНОМ}}}{T_k T_s} (\delta_{(n)} - \delta_0) \frac{\Delta t}{\omega_{\text{НОМ}}} \times \left( 1 + \frac{\Delta \delta_{(n)}}{\Delta t \cdot \omega_{\text{НОМ}}} \right), \quad (7)$$

где  $T_k$  – постоянная времени изодрома;  $\delta_0$  – значение угла ротора в начальный момент времени.

В отличие от одновальных двухвальная ГТУ состоит из двух независимых валов. При этом компрессор низкого давления (КНД) и турбина низкого давления (ТНД) расположены на одном валу с СТГ и вращаются на всех рабочих режимах с постоянной частотой, например 3000 об/мин. Компрессор высокого давления (КВД) и турбина высокого давления (ТВД) находятся на свободном валу с изменяющейся частотой вращения.

Для СТГ, ПД которого является газовая ТНД, небаланс мощностей на валу определяется по формуле

$$\Delta P_{\text{ТНД}} = P_{\text{ТНД}} \left( \frac{\omega_{\text{НД}}}{\omega_{\text{ОНД}}} \right) - P_{\text{ПерТНД}} - P_{\text{КНД}} - \Delta P_{\text{ТНД}} - P_C - P_{\text{Ac}} + P_{\text{ГазТНД}} + P_{\text{Пер}} + P_{\text{Рот}} + P_{\text{Стат}}, \quad (8)$$

где  $P_{\text{ТНД}}$  – механическая мощность ТНД;  $P_{\text{ПерТНД}}$  – мощность, обусловленная действием РС вала низкого давления;  $P_{\text{КНД}}$  – мощность, потребляемая КНД;  $\Delta P_{\text{ТНД}}$  – мощность, обусловленная изменением массового расхода ТВД;  $P_{\text{ГазТНД}}$  – мощность, обусловленная действием газовых объемов в камере сгорания и между камерой и турбиной низкого давления;  $\omega_{\text{НД}}$  – текущая скорость вращения вала турбины;  $\omega_{\text{ОНД}}$  – номинальная скорость вращения вала.

Небаланс мощностей вала ТВД может быть определен из следующего выражения:

$$\Delta P_{\text{ВД}} = P_{\text{ТВД}} \left( \frac{\omega_{\text{ВД}}}{\omega_{\text{ОВД}}} \right) - P_{\text{ПерВД}} - P_{\text{КВД}} + \Delta P_{\text{КНД}} + P_{\text{ГазВД}}, \quad (9)$$

где  $P_{\text{ТВД}}$  – механическая мощность ТВД;  $P_{\text{ПерВД}}$  – мощность, обусловленная действием РС вала высокого давления;  $P_{\text{КВД}}$  – мощность, потребляемая КВД;  $P_{\text{ГазВД}}$  – мощность, обусловленная действием газовых объемов в камере сгорания и между камерой и ТВД;  $\Delta P_{\text{КНД}}$  – мощность, обусловленная изменением мощности КНД.

Знакопеременный и апериодические моменты, обусловленные потерями в обмотках статора и ротора, синхронная и асинхронная мощности определяются аналогично ПТ.

В ПЭМП, например в случае трехфазного короткого замыкания (ТКЗ), начинает резко увеличиваться скорость вращения ротора СТГ, а следовательно, вала ТНД и КНД, что приводит к изменению массового расхода КНД и затем массового расхода КВД. Это, в свою очередь, вызывает увеличение скорости вращения вала ТВД и массового расхода рабочей среды ТВД. Изменение массового расхода ТНД в зависимости от изменения массового расхода ТВД выражается следующим уравнением:

$$\Delta G_{\text{ТНД}} = \Delta G_{\text{ТВД}}. \quad (10)$$

При этом изменение мощности ТНД от изменения массового расхода ТВД можно вычислить с помощью соотношения [19]

$$\Delta P_{\text{ТНД}} = P_{\text{ТНД0}} - \left[ \frac{G_{\text{ТНД0}} - G_{\text{ТВД0}} \left( 1 - \left( \frac{\omega_{\text{ВД}}}{\omega_{\text{ВД0}}} \right)^{1,25} \right)}{G_{\text{ТНД0}}} \right] \omega_{\text{НД}}. \quad (11)$$

Система РС газовых турбин в составе двухвальной ГТУ состоит из электрических датчиков частоты вра-



щения, измеряющих число оборотов валов ТНД и ТВД, электромеханических преобразователей и гидродинамических золотников и сервомоторов, управляющих клапанами впуска газа в камеры сгорания. Данная система имеет два контура регулирования. Контур регулирования частоты вращения вала ТНД включает воздействие на топливные клапаны как камеры сгорания низкого давления (КСНД), так и камеры сгорания высокого давления (КСВД), а контур регулирования частоты вращения вала ТВД – лишь на топливные клапаны КСВД.

Рассмотрим регулирование частоты вращения вала ТНД контуром регулирования низкого давления. Электрический датчик частоты вращения вала ТНД отслеживает частоту вращения вала и передает соответствующий сигнал в блок измерения частоты электрической части системы регулирования, где они преобразуются в постоянное напряжения, линейно зависящее от частоты вращения. Далее они передаются через функциональный измерительный преобразователь, с помощью которого устанавливается требуемая неравномерность регулирования.

При измерении угла  $\delta$  в электрических градусах

$$\Delta P_{p(n)НД} = \frac{P_{НТНД}}{\sigma T_s} \frac{\Delta \delta_{(n)}}{360 f_0} \left( 1 + \frac{\Delta \delta_{(n)}}{\Delta t \omega_{0НД}} \right) - \frac{\Delta t \beta}{T_s} P_{p(n-1)НД} \frac{\left( 1 + \frac{\Delta \delta_{(n)}}{\Delta t \cdot \omega_{0НД}} \right)}{\left( 1 + \frac{\Delta \delta_{(n-1)}}{\Delta t \cdot \omega_{0НД}} \right)}. \quad (12)$$

Аналогичным способом осуществляется регулирование частоты вращения вала ТВД контуром регулирования высокого давления. Но регулируемым параметром является частота вращения вала ТВД –  $\omega_{ВД}$ .

Следующими по распространенности видов ИРГ являются ГПЭС. Они также распространены в СЭСПП. В этом случае небаланс мощностей на валу определяется как [19]

$$\Delta P = P_e \left( \frac{\omega}{\omega_0} \right) - P_{Пер} - P_C - P_{Ac} + P_{Пер} + P_{Рот} + P_{Стат}, \quad (13)$$

где  $P_e$  – эффективная мощность двигателя;

Эффективная мощность нерегулируемого газопоршневого двигателя (ГПД), снимаемая с коленчатого вала и используемая для вращения ротора СТГ, при изменении угловой частоты вращения и неизменных иных параметрах имеет вид

$$P_e = \frac{H g_{Ц} \eta_e i_D \omega}{\tau_D \pi}, \quad (14)$$

где  $H$  – теплотворная способность топлива;  $g_{Ц}$  – цикловая подача топлива;  $\eta_e$  – эффективный КПД;  $i_D$  – число цилиндров в двигателе;  $\tau_D$  – тактность двигателя.

При математическом моделировании СТГ в составе ГПЭС рассмотрены система прямого действия, со-

стоящая из прецизионного РС, а также система регулирования на базе электронных блоков. Особенность первого способа регулирования заключается в том, что РС напрямую связан с клапаном подачи топлива в двигатель. При этом перемещение муфты регулятора пропорционально перемещению клапана подачи топлива. Изменение мощности, обусловленное действием регулятора, в этом случае [19]

$$P_{Пер(n)} = \frac{P_{ДНОМ}}{\sigma} \left( 1 + \frac{\Delta \delta_{(n)}}{\Delta t \omega_{НОМ}} \right) \left( \frac{\Delta \delta_{(n)}}{\Delta t \omega_{НОМ}} \right), \quad (15)$$

где  $P_{ДНОМ}$  – номинальная мощность двигателя.

Второй вид регулирования позволяет осуществлять управление ГПД регулированием оборотов двигателя или регулированием нагрузки.

Измерение оборотов ГПД осуществляется с помощью двух датчиков. Первый представляет собой вращающееся кодирующее устройство, соединённое с распределительным валом. Другой датчик частоты вращения является индукционным бесконтактным датчиком, установленным около шестерни распределительного вала.

Система РС ГПД применяется при отклонении скорости ротора СТГ от заданной. При регулировании оборотов ГПД справедливо соотношение

$$T p \eta = s, \quad (16)$$

где  $T$  – постоянная времени ПИД-контроллера;  $p = \Delta / \Delta t$  – оператор;  $\eta = \Delta t_K / t_{K0}$  – изменение времени открытия газового клапана;  $s = \Delta \delta / \Delta t$  – скольжение.

После преобразования были получены математические модели ГПД при регулировании оборотами двигателя [19]:

$$P_{Пер(n)} = \frac{P_{ДНОМ}}{T} \left( 1 + \frac{\Delta \delta_{(n)}}{\Delta t \omega_{НОМ}} \right) \frac{\delta_{(n)} - \delta_0}{\omega_{НОМ}}. \quad (17)$$

В нормальных режимах работы, не сопровождающихся изменением скорости вращения ротора, применяется система регулирования нагрузки, СТГ работает на постоянство выдачи активной мощности. В этом случае справедливо

$$T p \eta = \rho, \quad (18)$$

где  $\rho = \Delta p / \Delta t$  – изменение нагрузки.

В режиме управления нагрузкой фактическая нагрузка  $P_{(n)}$  двигателя сравнивается с опорным значением  $P_0$ . Разница между этими сигналами подается на вход ПИД-контроллера. Изменение мощности двигателя за счет действия регулятора составит

$$P_{Пер(n)} = \frac{P_{ДНОМ}}{T} \left( 1 + \frac{\Delta \delta_{(n)}}{\Delta t \omega_{НОМ}} \right) \frac{P_{(n)} - P_0}{\omega_{НОМ}}. \quad (19)$$

Еще одним способом повышения энергоэффективности работы СЭСПП является применение газовых утилизационных бескомпрессорных турбин (ГУБТ). Для СТГ, первичным двигателем которого является ГУБТ, небаланс мощностей имеет вид

$$\Delta P = P_T \left( \frac{\omega}{\omega_{ном}} \right) - P_{Пер} - P_C - P_{Ac} + P_{Пер} + P_{Рот} + P_{Стат} \quad (20)$$

Активная мощность нерегулируемой ГУБТ при изменении скорости и неизменных иных параметрах определяется соотношением

$$P_T = P_{Т0} \left( 2 - \frac{\omega}{\omega_{ном}} \right). \quad (21)$$

Современные ГУБТ обеспечены РС, которые при отклонении скорости вала от номинальной воздействуют на орган, управляющий подачей энергоносителя в турбину. При наличии таких регуляторов мощность турбины может быть принята равной исходной, а мощность регулятора определится как [19]

$$\Delta P_{P(n)} = \frac{P_{Тном}}{\sigma T_P} \frac{(\Delta \delta_{(n)})^2}{360 f_{ном} \Delta t \omega_{ном}} \times \left( 1 + \frac{\Delta \delta_{(n)}}{\Delta t \omega_{ном}} \right) - \frac{\Delta t}{T_P} P_{Пер(n-1)} \frac{1 + \frac{\Delta \delta_{(n)}}{\Delta t \omega_{ном}}}{1 + \frac{\Delta \delta_{(n-1)}}{\Delta t \omega_{ном}}}, \quad (22)$$

где  $T_P$  – постоянная времени АРСиАМ.

Интерес вызывает зависимость механической мощности от частоты сети для нерегулируемых ГТУ и ГПД, что важно при исследовании лавины частоты при дефиците активной мощности при выходе на раздельную работу.

Следует отметить, что все три перечисленных вида ИРГ являются малоинерционными. Это благоприятно сказывается на режимах пуска и набора нагрузки. Однако при существенных изменениях напряжения со стороны питающей энергосистемы или выхода в островной режим такие машины могут испытывать нежелательные механические усилия. В связи с этим большинство заводов-изготовителей предпочитает давать строгие ограничения по параметрам режима, при которых данные установки могут работать. Так, в ряде случаев не допускаются островные режимы работы, и при возникновении такового машины могут отключиться защитой. В некоторых случаях снижение напряжения на выводах обмотки статора не должно быть ниже 10-20 % с целью избегания недопустимых толчков при сбросе электромагнитной тормозной мощности. Как показывает эксплуатация, при наличии разветвленной электрической сети это выливается в большое количество отключений малоинерционных ИРГ и приводит к экономическим потерям. Также существует ряд ограничений по возможной поддерживаемой скорости, что влияет на возможность островных режимов. Поэтому все разработанные модели должны быть скорректированы с учётом заводских режимных ограничений [20, 21].

С учетом приведенных соотношений разработан алгоритм расчета ПЭМП с целью определения РУСГ. На базе алгоритма разработан ПК, с помощью которого проводился вычислительный эксперимент. Оцени-

вались токи при различной удаленности ТКЗ относительно СТГ и изменяющихся временах отключения короткого замыкания.

РЕАЛИЗАЦИЯ РАЗРАБОТАННОГО АЛГОРИТМА  
В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ «КАТРАН»  
НА ПРИМЕРЕ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

В качестве исследуемого объекта был принят абстрактный энергоузел, имеющий СЭСПП сложной конфигурации. В состав узла входили СТГ с различными ПД, синхронные и асинхронные двигатели с вентиляторным моментом сопротивления на валу, обобщенные нагрузки питаемых цехов, а также элементы электрической сети. Узел имел связь с энергосистемой бесконечной мощности. Использование реального энергоузла не представлялось возможным, поскольку в действующих СЭСПП, как правило, имеются СТГ не со всеми возможными ПД. Как правило, в узел ставятся однотипные ИРГ и выход на островную работу происходит в упрощенных условиях.

Расчет выполнялся программным путем по заданным каталожным данным элементов, величинам активных и реактивных нагрузок с учетом их изменения во времени. Пример интерфейса приведен для части исследуемого энергоузла на **рис. 1**.

В ходе исследований рассматривались точки ТКЗ с различной электрической удаленностью относительно исследуемых СТГ. Исследования проводились для СТГ в составе ГУБТ, ГПЭС и ГТЭС.

В качестве примера приведены результаты расчета ПЭМП в виде изменения углов роторов во времени для СТГ в составе ГПЭС. Моделировалось короткое замыкание длительностью 0,2 с и его ликвидация. Изменение угла ротора приведено на **рис. 2**, как видим из рисунка, режим устойчив. На **рис. 3** и **4** приведено изменение активной мощности, выдаваемой генератором в сеть, и действия регулятора скорости.

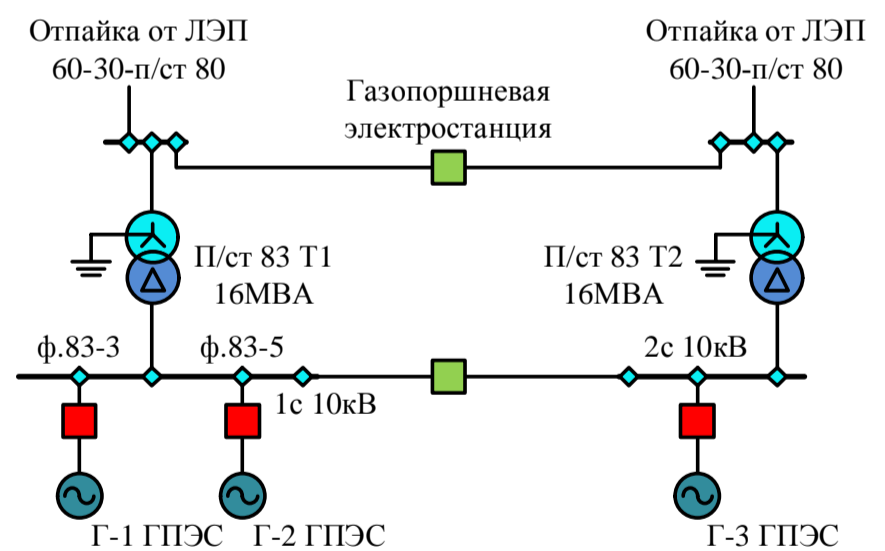


Рис. 1. Главное рабочее окно программы

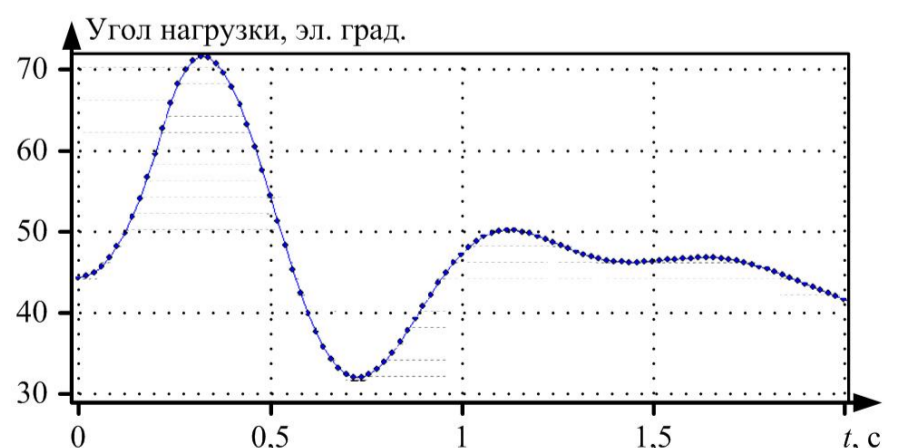


Рис. 2. Изменение угла ротора СТГ с ГПД

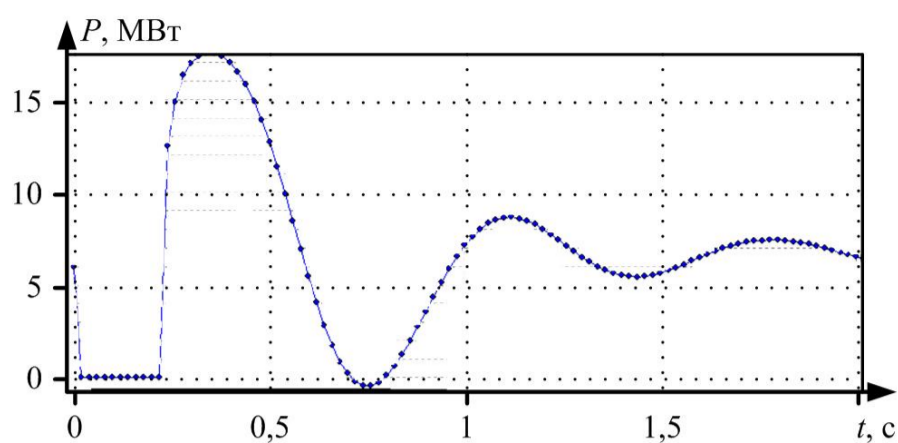


Рис. 3. Изменение активной мощности СТГ с ГПД

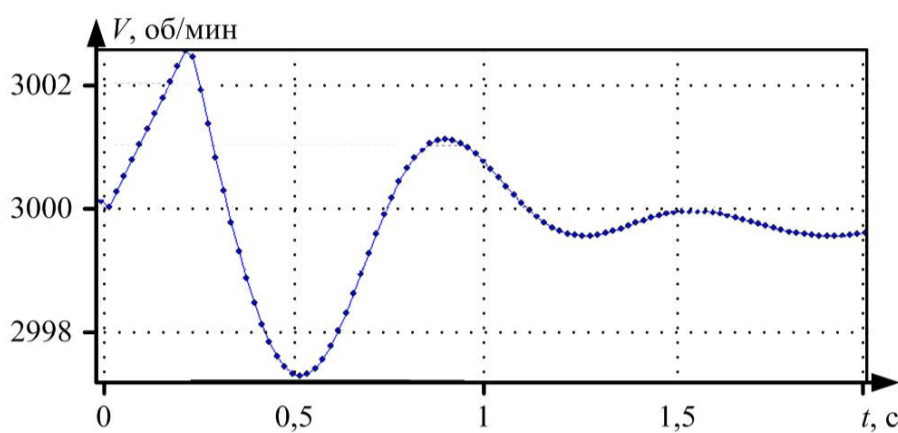


Рис. 4. Изменение скорости СТГ с ГПД

Результаты расчетов показали, что наибольшим запасом РУСГ обладает СТГ, приводимый во вращение ГТУ с центробежным РС, гидродинамическими сервомотором и изодромом и рычагом обратной связи. При этом повышается устойчивость параллельно работающим СТГ, приводимых другими ПД. Наименьшим запасом РУСГ обладает СТГ, приводимый ГУБТ, у которой используется в качестве РС мембранно-ленточный датчик. Также можно сделать вывод, что при малой удаленности точки ТКЗ и значительном времени его отключения РУСГ можно увеличить за счет увеличения степени нечувствительности РС при любом роде ПД.

Как было отмечено ранее, современные ГТЭС и ГПЭС имеют высокую степень защиты, отключающую СТГ от сети даже при электрически удаленных ТКЗ. Таким образом, заводы-изготовители, с одной стороны, перестраховываются от возможных механических повреждений турбины, с другой стороны, как показывает эксплуатация, при разветвленной электрической сети отключения могут быть избыточны, что существенно снижает экономические показатели работы электрической сети. Поэтому математические модели и все полученные результаты должны учитывать специфику защиты на каждой установке.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Авторами разработаны математические модели регулируемых СТГ в составе ГТЭС, ГПЭС и ГУБТ. Получены модели нерегулируемых установок. Данные модели учитывают влияние рода первичного двигателя и их АРСиАМ на параметры ПЭМП и позволяют исследовать аварийные режимы при параллельной работе с энергосистемой и островном режиме.

2. С учетом данных математических моделей разработан алгоритм анализа РУСГ в аварийных режимах при параллельной и автономной работе с энергосистемой.

3. Предложенные математические модели СТГ и алгоритм использованы в разработанном ПК, предназначенном для анализа РУСГ СЭСПП, в том числе при выходе промышленных электростанций на автономную с энергосистемой работу. Данный ПК позволяет исследовать влияние СТГ, приводимых турбинами различного рода, как на РУСГ, так и на устойчивость синхронной и асинхронной нагрузки, подключенной непосредственно к шинам генераторного напряжения. Имеется возможность прогнозирования эксплуатационных режимов и разработки соответствующих мероприятий, что повысит надежность электроснабжения потребителей.

4. На базе разработанным авторами ПК были проведены расчеты РУСГ, приводимых различными первичными двигателями. Расчеты проводились при условии различной удаленности точки короткого замыкания с различной степенью нечувствительности РС в зависимости от времени его отключения.

5. Результаты проведенных расчетов показали, что наибольшим запасом результирующей устойчивости обладают СТГ, приводимые во вращение ГТУ с центробежным РС, гидродинамическими сервомотором, изодромом и рычагом обратной связи. Наименьшим запасом устойчивости обладают СТГ, приводимые ГУБТ.

6. ПК, разработанный на основе данного алгоритма и математических моделей, может быть использован при прогнозировании ПЭМП в СЭСПП, имеющих в своем составе разнородные ИРГ.

7. ИРГ имеют дополнительные защиты от понижения напряжения и повышения частоты в энергосистеме, существенно ограничивающие возможность их использования. Это должно быть учтено при составлении математических моделей источников.

#### Список источников

1. Ачитаев А.А., Удалов С.Н., Юманов М.С. Повышение запаса регулировочной способности генераторов в энергетических системах с распределенной генерацией // Электротехника. Электротехнология. Энергетика: сборник научных трудов VII Международной научной конференции молодых ученых. Новосибирск: НГТУ, Межвузовский центр содействия научной и инновационной деятельности студентов и молодых ученых Новосибирской области, 2015. С. 8-10.
2. Power System Stability Enhancement Using FACTS Controllers in Multimachine Power Systems / Y. Welhazi, T. Guesmi, I.B. Jaoued, H.H. Abdallah // Journal of Electrical Systems. 2014. No. 10-3. Pp. 276-291.
3. Perzhabinsky S.M., Karamov D.N., Achitaev A.A. A Model of Reliability Optimization of a Stand-Alone Electric Power System with Constraints on Dynamic Stability of the Wind Turbine // Journal of Siberian Federal University. Engineering and Technologies. 2021. No. 1(14). Pp. 55-71. doi: 10.17516/1999-494X-0288
4. Satheesh A., Manigandan T. Maintaining Power System Stability with Facts Controller using Bees Algorithm and NN // Journal of Theoretical and Applied Information Technology. 2013. No. 1(49). Pp. 38-47.
5. Жданов П.С. Вопросы устойчивости энергетических систем. М.: Энергия, 1979. 456 с.
6. Мелешкин Г.А., Меркурьев Г.В. Устойчивость энергосистем: монография. Кн. 1. СПб.: НОУ "Центр подготовки кадров энергетики", 2006. 369 с.

7. Кимбарк Э. Синхронные машины и устойчивость электрических систем. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1960. 392 с.
8. Hazarika D. New method for monitoring voltage stability condition of a bus of an interconnected power system using measurements of the bus variables // IET Generation, Transmission & Distribution. 2012. No. 10(6). Pp. 977-985. doi: 10.1049/iet-gtd.2011.0786.
9. Kothari D.P., Nagrath I.J. Power System Engineering. Second Edition. New Delhi: Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, 2008.
10. Совалов С.А., Семенов В.А. Противоаварийное управление в энергосистемах. М.: Энергоатомиздат, 1988. 416 с.
11. Андерсон П., Фуад А. Управление энергосистемами и устойчивость: пер. с англ. / под ред. Я.Н. Лугинского. М.: Энергия, 1980. 568 с.
12. Validation of diagnostic monitoring technical state of iron and steel works transformers / V.R. Khramshin, A.A. Nikolayev, S.A. Evdokimov, Y.N. Kondrashova, T.P. Larina // Proceedings of the IEEE North West Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference, (EIConRusNW). IEEE, 2016. Pp. 596-600. doi: 10.1109/EIConRusNW.2016.7448253
13. Kornilov G.P., Panova E.A., Varganova A.V. The Algorithm of Economically Advantageous Overhead Wires Cross Section Selection Using Corrected Transmission Lines Mathematical Models // Procedia Engineering. 2015. Vol. 129. Pp. 951-955. doi:10.1016/j.proeng.2015.12.142
14. Комплексная оценка эффективности токовых и дистанционных защит в сетях 110-220 кВ в условиях Магнитогорского энергетического узла / Б.И. Заславец, В.А. Игуменцев, Н.А. Николаев, А.В. Малафеев, О.В. Буланова, Ю.Н. Ротанова, Е.А. Панова // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2011. №15(232). С. 14-21.
15. Анализ допустимости режима потери возбуждения синхронного генератора в условиях промышленной системы электроснабжения сложной конфигурации / О.В. Газизова, А.П. Соколов, Н.Т. Патшин, Ю.Н. Кондрашова // Электротехнические системы и комплексы. 2019. №2(43). С. 12-18. doi: 10.18503/2311-8318-2019-2(43)-12-18
16. Оценка регулирующего эффекта выпрямительной нагрузки для определения параметров установившихся режимов систем электроснабжения промышленных предприятий / Н.А. Николаев, О.В. Буланова, А.В. Малафеев, Ю.Н. Кондрашова, В.М. Тарасов // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2011. №4. С. 115-118.
17. Газизова О.В., Малафеев А.В., Кондрашова Ю.Н. Определение предельных параметров режимов для обеспечения успешной ресинхронизации объектов распределенной генерации в условиях предприятия черной металлургии // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2016. Т. 16. №4. С. 12-22. doi: 10.14529/power160402
18. Буланова О.В. Расчет показателей статической устойчивости систем электроснабжения крупных промышленных предприятий, имеющих в своем составе собственные электростанции // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2006. №2 (14). С. 37-40.
19. Тарасов В.М. Повышение эффективности управления эксплуатационными режимами систем электроснабжения промышленных предприятий с резкопеременной нагрузкой: дис. ... канд. техн. наук, 05.09.03 / Тарасов Владимир Маркелович. Магнитогорск, 2012. 179 с.
20. Гуревич Ю.Е., Илюшин П.В. Особенности расчетов режимов в энергорайонах с распределенной генерацией: монография. Н. Новгород: НИУ РАНХиГС, 2018. 280 с.
21. Илюшин П.В., Куликов А.Л. Автоматика управления нормальными и аварийными режимами энергорайонов с распределенной генерацией: монография. Н. Новгород: НИУ РАНХиГС, 2019. 364 с.

Поступила в редакцию 30 сентября 2022 г.

Принята к печати 28 октября 2022 г.

## INFORMATION IN ENGLISH

### INFLUENCE OF PRIMARY ENGINE ON INDUSTRIAL GENERATOR STABILITY

Vladimir M. Tarasov

Ph.D., Associate Professor, Department of Industrial Power Supply, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Nikolaj T. Patshin

Ph.D., Associate Professor, Department of Industrial Power Supply, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Olga I. Petukhova

Ph.D., Associate Professor, Department of Industrial Power Supply, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Aleksandr E. Morshchakin

Master's Degree Student, Department of Industrial Power Supply, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Aleksandr R. Kurbanov

Undergraduate Student, Department of Industrial Power Supply, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Modern conditions for a market economy lead to the need to expand power plants at large industrial enterprises. This is expressed in an increase in single installed capacities and the

number of synchronous generators. The possibility of using vehicles at a number of heavy gas industry, suitable for disposal, as well as cheapness of natural gas create favorable conditions for

the construction of modern power plants with relatively low capacity. Therefore, the generators driven by gas turbines, top-pressure recovery turbines and gas piston engines are widespread. However, an increase in the number of generators of local power plants leads to the complication of emergency operating modes. So, the island mode of operation, which requires careful forecasting, is not excluded. Therefore, there is a need to study possible transitional and established regimes in order to analyze the resulting stability. For this, a methodology for calculating transitional electromechanical modes was obtained, taking into account the type of primary engines and the characteristics of speed and active power regulators. On the basis of this algorithm, software has been obtained that allows you to calculate the transition processes and according to their results, to evaluate the influence of the primary engine on the resulting stability of the power supply system, as well as develop a system of measures in order to increase it. The algorithm provides for the development of mathematical models of synchronous generators, taking into account the action of automatic regulators of primary engines and their dynamic properties. Most of the existing mathematical models of synchronous generators and methods for calculating transition modes are developed in relation to turbo generators with steam turbines. This paper deals with the issues of mathematical modeling of synchronous generators brought into rotation by gas turbines, gas piston engines and top-pressure recovery turbines, in order to study transitional electromechanical processes and develop measures to increase the resulting stability of energy sources in various operational regimes.

**Keywords:** synchronous generator, mathematical model, software complex, automatic speed control, parallel operation, gas turbine power station, gas piston power plant

REFERENCES

1. Achitayev A.A., Udalov S.N., Yumanov M. S. Increase of an inventory of adjusting ability of generators in power systems with distributed Generation. *Elektrotehnika. Elektrotehnologiya. Energetika: sbornik nauchnykh trudov VII Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii molodyh uchenykh* [Electricalengineering. Electrotechnology. Power engineering. Collection of scientific papers of the VII International scientific conference of young scientists]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2015, pp 8-10. (In Russian)
2. Welhazi Y., Guesmi T., I Jaoued.B., H Abdallah.H. Power System Stability Enhancement Using FACTS Controllers in Multimachine Power Systems. *J. Electrical Systems*. 2014, no. 10-3, Pp. 276-291.
3. Perzhabinsky S.M., Karamov D.N., Achitayev A.A. A Model of Reliability Optimization of a Stand-Alone Electric Power System with Constraints on Dynamic Stability of the Wind Turbine. *Journal of Siberian Federal University. Engineering and Technologies*. 2021, vol. 14, no. 1(14), pp. 55-71. doi: 10.17516/1999-494X-0288
4. Satheesh A. Manigandan T. Maintaining Power System Stability with Facts Controller using Bees Algorithm and NN. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*. 2013, no. 1(49), pp. 38-47.
5. Zhdanov P.S. *Voprosy ustojchivosti energeticheskikh sistem* [Issues of power systems stability]. Moscow, Energy Publ., 1979. 456 p. (In Russian)
6. Meleshkin G.A., Merkurjev G.V. *Ustojchivost energosistem* [Stability of power systems]. Book 1. St. Petersburg, Center for training of energy personnel Publ., 2006. 369 p. (In Russian)
7. Kimbark E. *Sinhronnyye mashiny i ustojchivost elektricheskikh sistem* [Synchronous machines and stability of electrical systems]. Moscow-Leningrad, Gosenergoizdat Publ., 1960. 392 p. (In Russian)
8. Hazarika D. New method for monitoring voltage stability condition of a bus of an interconnected power system using measurements of the bus variables. *IET Generation, Transmission & Distribution*. 2012, no. 10(6), pp. 977-985. doi: 10.1049/iet-gtd.2011.0786
9. Kothari D.P., Nagrath I.J. *Power System Engineering*. Second Edition. New Delhi, Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, 2008.
10. Sovalov S.A., Semenov V.A. *Protivoavarijnoe upravlenie v energosistemah* [Antiemergency control in power supply systems]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 2005. 416 p. (In Russian)
11. Anderson P., Fuad A. *Upravlenie energosistemami i ustojchivost* [Energy Systems and Stability]. Moscow, Energy Publ., 1980. 568 p. (In Russian)
12. Khrumshin V.R., Nikolayev A.A., Evdokimov S.A., Kondrashova Y.N., Larina T.P. Validation of diagnostic monitoring technical state of iron and steel works transformers. *Proceedings of the IEEE North West Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference, (EIConRusNW)*. IEEE, 2016, pp. 596-600. doi: 10.1109/EIConRusNW.2016.7448253
13. Kornilov G.P., Panova E.A., Varganova A.V. The Algorithm of Economically Advantageous Overhead Wires Cross Section Selection Using Corrected Transmission Lines Mathematical Models. *Procedia Engineering*. 2015, vol. 129, pp. 951-955. doi:10.1016/j.proeng.2015.12.142
14. Zaslavets B.I., Igumenshchev V.A., Nikolaev N.A., Malafeev A.V., Bulanova O.V., Rotanova Yu.N., Panova E.A. A comprehensive assessment of the effectiveness of current and distance protection in networks of 110-220 kV in the conditions of the Magnitogorsk Energy Node. *Vestnik YUzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika* [Bulletin of the South Ural State University. Series "Power Engineering"], 2011, no. 15 (232), pp. 14-21. (In Russian)
15. Gazizova O.V., Sokolov A.P., Patshin N.T., Kondrashova Yu.N. Analysis of the permissibility of the mode of excitation of a synchronous generator in the conditions of an industrial system of power supply complex configuration. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2019, no. 2(43), pp. 12-18. (In Russian). doi.org/10.18503/2311-8318-2019-2(43)-12-18
16. Nikolaev N.A., Bulanova O.V., Malafeev A.V., Kondrashova Yu.N., Tarasov V.M. Evaluation of the regulating effect of rectifying load to determine the parameters of the steady modes of power supply systems of industrial enterprises. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Elektromekhanika* [Russian Electromechanics], 2011, no. 4, pp. 115-118. (In Russian)
17. Gazizova O.V., Malafeyev A.V., Kondrashova Yu.N., Determination of limit mode parameters to ensure successful resynchronization of distributed generation units at iron and steel works. *Vestnik YUzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika* [Bulletin of the South Ural State University. Series "Power Engineering"], 2016, vol. 16, no. 4, pp. 12-22. (In Russian). doi: 10.14529/power160402
18. Bulanova O.V. Calculation of indicators of static stability of power supply systems of large industrial enterprises that contain their own power plants. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2006, no. 2 (14), pp. 37-40. (In Russian)
19. Tarasov V.M. *Povyshenie effektivnosti upravleniya ekspluatatsionnymi rezhimami sistem elektrosnabzheniya promyshlennykh predpriyatiy s rezkoperemennoy nagruzkoy. Kand. Diss.* [Improving the efficiency of operating regimes of power supply systems for industrial enterprises with a sharply variable load. Kand. Diss.]. Magnitogorsk, 2012. 179 p. (In Russian)

20. Gurevich Yu.E., Ilyushin P.V. *Osobennosti raschetov rezhimov v energo rayonakh s raspredelennoy generatsiey* [Features of calculations of modes in energy ranges with distributed generation]. Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod branch of the Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration Publ., 2018. 280 p. (In Russian)
21. Ilyushin P.V., Kulikov A.L. *Avtomatika upravleniya normalnymi i avariynymi rezhimami energo rayonov s raspredelennoy generatsiey* [Automation of the control of normal and emergency modes of energy regions with distributed generation]. Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod branch of the Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration Publ., 2019. 364 p. (In Russian)
- 

Исследование влияния первичного двигателя на устойчивость промышленных генераторов / В.М. Тарасов, Н.Т. Патшин, О.И. Петухова, А.Э. Морщакин, А.Р. Курбанов // *Электротехнические системы и комплексы*. 2022. № 4(57). С. 20-28. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-4\(57\)-20-28](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-4(57)-20-28)

Tarasov V.M., Patshin N.T., Petukhova O.I., Morshchakin A.E., Kurbanov A.R. Influence of Primary Engine on Industrial Generator Stability. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2022, no. 4(57), pp. 20-28. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-4\(57\)-20-28](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-4(57)-20-28)

---

Правикова А.А., Рулевский В.М.

Томский университет систем управления и радиоэлектроники

## ВЛИЯНИЕ ЧАСТОТЫ ПЕРЕДАЧИ НАПРЯЖЕНИЯ ПО КАБЕЛЬ-ТРОСУ НА ПОТЕРИ И МАССОГАБАРИТНЫЕ ПАРАМЕТРЫ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ПОДВОДНОГО АППАРАТА

В статье описана методика расчета входного понижающего трансформатора подводной части системы электропитания телеуправляемого подводного аппарата. Рассмотренная методика позволяет для конкретной структуры, мощности и требуемых массогабаритных показателей системы электропитания телеуправляемого подводного аппарата, а также длины и электрических параметров кабель-троса определить максимально возможную частоту передачи напряжения по кабель-тросу, что, в свою очередь, помогает обоснованно выбрать частоту передачи. Кроме того, было показано, что увеличение частоты передачи напряжения по кабель-тросу до 10 кГц ведет к уменьшению массы входного понижающего трансформатора подводной части системы электропитания телеуправляемого подводного аппарата более чем в 2 раза. Нежелательным последствием увеличения частоты питающего напряжения является увеличение реактивной (емкостной) составляющей тока кабель-троса. Компенсация реактивной составляющей тока осуществляется с помощью индуктивностей намагничивания трансформаторов бортовой и подводной частей системы. Рассмотрено проявление волнового эффекта в кабель-тросе системы электропитания телеуправляемого подводного аппарата при повышении частоты передачи напряжения. Приведено условие представления кабель-троса как цепи с распределенными параметрами и приведена методика расчета токов и напряжений в любой точке линии. Исследован характер изменения амплитуды напряжения вдоль кабель-троса. Проведено математическое моделирование системы электропитания телеуправляемого подводного аппарата с кабель-тросом, передающим мощность свыше 65 кВт на расстояние до 11 км при частоте 10 кГц, в результате которого получены графики напряжения в начале и конце кабель-троса, подтвержден нелинейный характер изменения амплитуды напряжения вдоль линии.

**Ключевые слова:** телеуправляемый подводный аппарат, система электропитания, кабель-трос, напряжение, частота, трансформатор, перегрев, потери

### ВВЕДЕНИЕ

В последние годы телеуправляемые подводные аппараты (ТПА) применяются для решения ряда практических и научно-исследовательских задач, таких как разведка полезных ископаемых, проведение геологических исследований на морском дне, монтаж подводных сооружений, очистка погружных платформ, прокладка трубопроводов и кабелей, взрывные работы, поиск повреждений, поисковые операции, картографирование и съемка дна [1-3]. Система электропитания (СЭП) ТПА во многом определяет работоспособность подводного аппарата. Обеспечение энергией ТПА осуществляется через кабель-трос от бортовой части СЭП. Анализ вариантов построения СЭП ТПА [4, 5] показывает, что передача энергии по кабель-тросу на переменном токе повышенной частоты обеспечивает увеличение удельных характеристик СЭП ТПА.

Частота напряжения при передаче энергии по кабель-тросу оказывает непосредственное влияние на параметры системы. В частности, увеличение частоты влечет за собой уменьшение массогабаритных показателей подводной части (ПЧ) СЭП ТПА. Это происходит за счет того, что 80% от общей массы ПЧ СЭП составляет входной трехфазный понижающий трансформатор, а как известно, массогабаритные показатели трансформаторов значительно улучшаются с увеличением частоты [6]. В зависимости от структуры, мощности и требуемых массогабаритных показателей СЭП ТПА, а также электрических параметров и длины кабель-троса выбор частоты сводится к определению такого значения, при котором выполняются требования по перегреву, потерям и массогабаритным показателям трансформатора.

Кабель-трос также является важной частью СЭП и определяет характеристики всей системы в целом. Следовательно, определение основных электрических параметров кабель-троса необходимо для разработки СЭП. Задача усложняется тем, что погонные емкость и индуктивность кабеля не указываются в технической документации производителей и не стандартизированы в технической литературе [7]. Кроме того, увеличение частоты передачи энергии по кабель-тросу приводит к появлению в линии волновых эффектов, что тоже необходимо рассмотреть при выборе частоты.

### МЕТОДИКА РАСЧЕТА ТРАНСФОРМАТОРА ПОДВОДНОЙ ЧАСТИ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ

Согласно закону электромагнитной индукции напряжение, приложенное к первичной обмотке, находится по формуле [8]:

$$U_1 = 4K_\phi B_m S_c W_1 f, \quad (1)$$

где  $K_\phi=1,11$  для синусоидального напряжения;  $B_m$  – амплитуда индукции, Тл;  $S_c$  – сечение сердечника, см<sup>2</sup>;  $W_1$  – число витков первичной обмотки;  $f$  – частота прикладываемого напряжения, Гц.

Согласно формуле (1) при неизменном напряжении  $U_1$ , приложенном к первичной обмотке, с увеличением частоты  $f$  необходимо уменьшать магнитную индукцию  $B_m$ , сечение сердечника  $S_c$  или количество витков  $W_1$ , что во всех трех случаях приведет к уменьшению массогабаритных показателей трансформаторов. Этим объясняется улучшение массогабаритных показателей трансформатора при увеличении частоты [6].

В качестве сердечников входного понижающего трансформатора ПЧ СЭП используются магнитопроводы ГМ 54ДС из аморфных и нанокристаллических

сплавов [9]. Для магнитопровода ГМ54ДС вводится немагнитный разрезной зазор для получения линейной кривой намагничивания. Немагнитный зазор фиксируется, за счет чего удается получить заданную величину магнитной проницаемости.

Удельные магнитные потери магнитопровода ГМ54ДС определяются по формуле [9]

$$P = 75(\ln \mu)^{-2,3} f^{1,48} B_m^{1,85}, \quad (2)$$

где  $P$  – удельные магнитные потери (потери в стали), Вт/м<sup>3</sup>;  $\mu$  – относительная магнитная проницаемость;  $f$  – частота, Гц;  $B_m$  – магнитная индукция, Тл.

Увеличение частоты питающего напряжения приводит также к нежелательным последствиям в виде увеличения реактивной (емкостной) составляющей тока кабель-троса, которая в СЭП ТПА компенсируется индуктивностью намагничивания трансформатора ПЧ СЭП. Индуктивность намагничивания трансформатора определяется по формуле [10]:

$$L_\mu = \frac{\mu_0 \mu W_1^2 S_c}{l}, \quad (3)$$

где  $\mu_0$  – магнитная постоянная, Гн/м;  $\mu$  – относительная магнитная проницаемость;  $S_c$  – площадь поперечного сечения, м<sup>2</sup>;  $l$  – длина средней магнитной линии сердечника, м.

Эквивалентная упрощенная схема замещения одной фазы кабель-троса и индуктивностей намагничивания трансформаторов при двухсторонней компенсации представлена на **рис. 1**.

Эквивалентная индуктивность компенсации находится по формуле

$$L_{\mu\Sigma} = \frac{L'_{\mu1\gamma} L_{\mu2\gamma}}{L'_{\mu1\gamma} + L_{\mu2\gamma}}, \quad (4)$$

где  $L'_{\mu1\gamma}$  – индуктивность намагничивания трансформатора бортовой части, приведенная ко вторичной стороне;  $L_{\mu2\gamma}$  – индуктивность намагничивания трансформатора подводной части, приведенная к первичной стороне.

Для компенсации реактивной составляющей тока кабель-троса должно выполняться соотношение (условие резонанса токов):

$$X_C = X_L. \quad (5)$$

При двухсторонней компенсации примем  $L'_{\mu1\gamma} = L_{\mu2\gamma} = L_\mu = 2L_{\mu\Sigma}$ , тогда согласно (5) получим выражение

$$L_\mu = \frac{1}{2C_{\text{ЛЭП}} (\pi f)^2}, \quad (6)$$

где  $C_{\text{ЛЭП}}$  – рабочая емкость ТПЖ кабель-троса.

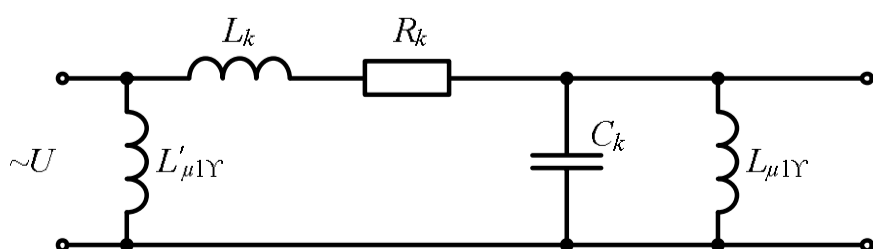


Рис. 1. Схема замещения жилы кабель-троса и индуктивностей намагничивания трансформаторов

После подстановки в выражение (3)  $W_1$  из формулы (1) и  $L_\mu$  из формулы (6) получаем выражение для магнитной индукции, при которой обеспечивается компенсация реактивной составляющей тока кабеля:

$$B_m = \frac{U_1 \pi}{4K_\phi} \sqrt{\frac{2\mu_0 \mu C_{\text{ЛЭП}}}{l S_c}}. \quad (7)$$

Как видно из формулы (7), магнитная индукция не зависит от частоты передачи тока по кабель-тросу, а зависит только от емкости кабель-троса, типоразмера и относительной магнитной проницаемости сердечника.

На **рис. 2** приведена зависимость магнитной индукции от относительной магнитной проницаемости.

Как уже говорилось выше, при проектировании трансформаторов учитываются требования к трансформаторам по потерям и перегреву. Перегрев трансформатора определяется по формуле

$$\Delta T = \frac{P_\Sigma}{k_T S_T}, \quad (8)$$

где  $P_\Sigma$  – суммарные потери в трансформаторе, Вт;  $k_T$  – коэффициент теплоотдачи;  $S_T$  – эффективная поверхность охлаждения, см<sup>2</sup>.

Согласно (8), с уменьшением массогабаритных показателей, а именно эффективной поверхности охлаждения, перегрев увеличивается.

Методика расчета трансформатора ПЧ СЭП ТПА включает вычисление индуктивности намагничивания трансформатора, магнитной индукции, количества витков обмоток, потерь и перегрева трансформатора согласно формулам (2) – (8).

Если полученные в процессе расчета значения перегрева и потерь мощности больше заданных значений, следует провести вторую итерацию расчета для другого габаритного размера сердечника. Из вышесказанного можно сделать вывод, что для каждого типоразмера сердечника существует максимально допустимая частота передачи тока по кабель-тросу.

Значения максимальной частоты для нескольких типоразмеров сердечника ГМ54ДС для СЭП ТПА с кабель-тросом КГО (3×5,6+1×3Е)-300/100, передающим мощность свыше 65 кВт на расстояние до 11 км, представлены в **табл. 1**. Как видно из **табл. 1**, представляется возможным выбрать частоту передачи напряжения 10 кГц для типоразмеров К150×90×30, К170×100×30 при относительной магнитной проницаемости  $\mu=30$ .

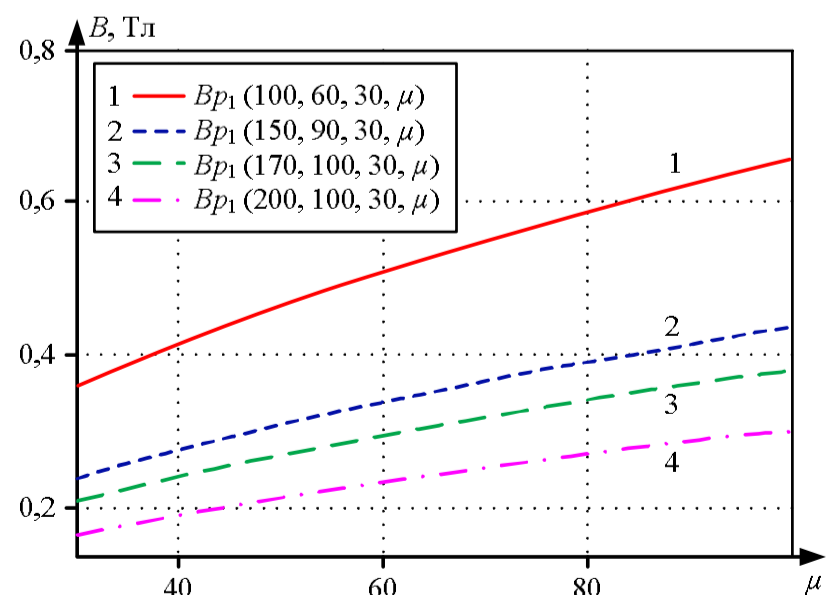


Рис. 2. Зависимость магнитной индукции от относительной магнитной проницаемости сердечника для различных типоразмеров



Таблица 1  
Максимально допустимая частота при разных значениях относительной магнитной проницаемости для нескольких типоразмеров сердечника, кГц

Типоразмер	K100×60×30	K150×90×30	K170×100×30
$\mu=30$	6,8	10,2	11,5
$\mu=60$	5,8	8,6	9,7
$\mu=90$	-	7,7	8,8
$\mu=140$	-	6,8	7,7

КАБЕЛЬ-ТРОС КАК СИСТЕМА  
С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Кабель-трос при рассмотрении электромагнитных процессов в СЭП ТПА может рассматриваться как система с сосредоточенными либо распределенными параметрами. В первом случае кабель-трос представлен параметрами цепи (сопротивлением  $R$ , емкостью  $C$ , индуктивностью  $L$ ), которые сосредоточены в определенных участках цепи. Схема замещения кабель-троса в этом случае приведена на рис. 3.

Однако такое представление кабель-троса не всегда оправдано, как, например, для случая, когда длина волны сигнала в кабеле соизмерима с линейными размерами линии [11]. В этом случае кабель рассматривается как цепь с распределенными параметрами. Такую цепь еще называют длинной линией.

В цепях с распределенными параметрами напряжения и токи являются функциями двух переменных – пространственной координаты и времени, а как следствие, непрерывно изменяются вдоль линии от точки к точке.

Практическим условием учета распределенности параметров вдоль линии является [12]:

$$l \geq (0,01 - 0,05)\lambda, \quad (9)$$

где  $l$  – длина кабель-троса;  $\lambda=c/f$  – длина волны, км;  $c$  – скорость света;  $f$  – частота, Гц.

Применительно к СЭП ТПА при  $f=1$  кГц длина волны  $\lambda=300$  км, кабель-трос длиной  $l=11$  км рассматривается как цепь с сосредоточенными параметрами. При  $f=10$  кГц длина волны  $\lambda=30$  км, следовательно, кабель-трос длиной  $l=11$  км представляет собой цепь с распределенными параметрами [13].

Для однородной цепи с распределенными параметрами при установившемся синусоидальном процессе напряжение и ток в любой точке линии определяются выражениями [14]

$$\begin{cases} \dot{I} = \dot{I}_1 \operatorname{ch} \gamma x - \frac{\dot{U}_1}{Z_c} \operatorname{sh} \gamma x; \\ \dot{U} = \dot{U}_1 \operatorname{ch} \gamma x - \dot{I}_1 \cdot Z_c \operatorname{sh} \gamma x, \end{cases} \quad (10)$$

где  $\dot{I}_1, \dot{U}_1$  – ток и напряжение в начале линии;  $x$  – расстояние от начала линии, км;  $\gamma=\sqrt{Z_0 Y_0}$  – коэффициент распространения линии, 1/км;  $Z_0=r_0+j\omega L_0$ , Ом/км;  $Y_0=g_0+j\omega C_0$ , См/км;  $r_0$  – продольное сопротивление линии на единицу длины, Ом/км;  $g_0$  – поперечная проводимость линии на единицу длины, См/км;  $L_0$  – индуктивность линии на единицу длины, Гн/км;  $C_0$  – емкость линии на единицу длины, Ф/км;  $Z_c=\sqrt{Z_0/Y_0}$  – волновое (характеристическое) сопротивление, Ом.

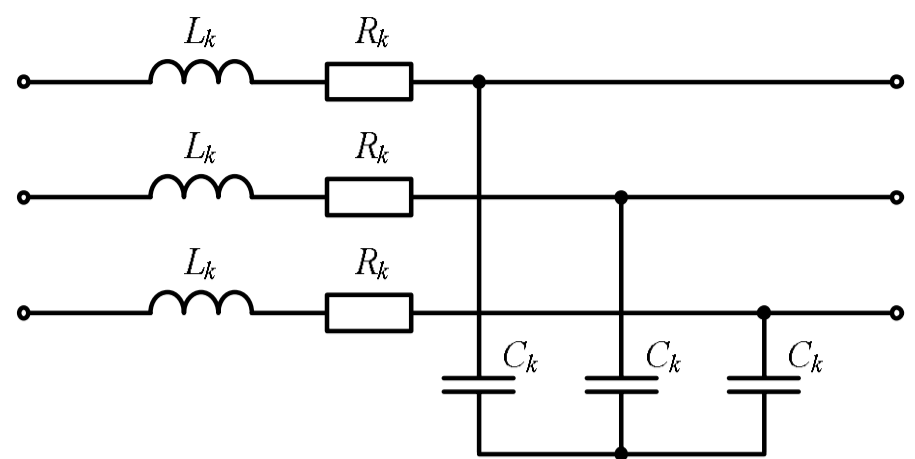


Рис. 3. Схема замещения трехжильного кабель-троса

При проведении численных экспериментов принимались следующие параметры системы:  $f=10$  кГц;  $r_0=4,75$  Ом/км;  $g_0=5 \cdot 10^{-11}$  См/км;  $L_0=0,3$  мГн/км;  $C_0=0,06$  мкФ/км.

Напряжение в начале и в конце линии, рассчитанное по формуле (10), показано на рис. 4.

Напряжение вдоль линии изменяется нелинейно. Характер изменения амплитуды напряжения вдоль кабель-троса объясняется возникновением падающих и отраженных волн:

$$\dot{U} = \dot{U}_{\text{отр}} + \dot{U}_{\text{пад}} = \dot{A}_1 e^{\gamma x} + \dot{A}_2 e^{-\gamma x}, \quad (11)$$

где  $\dot{A}_1, \dot{A}_2$  – постоянные интегрирования, которые определяются из граничных условий через напряжение и ток в конце линии:

$$\begin{cases} \dot{A}_1 = 0,5(\dot{U} - iZ_c) e^{-\gamma l}; \\ \dot{A}_2 = 0,5(\dot{U} + iZ_c) e^{\gamma l}, \end{cases} \quad (12)$$

где  $\dot{I}, \dot{U}$  – ток и напряжение в конце линии;  $l$  – длина линии, км.

Графики падающей и отраженной волн напряжения в конце линии, их алгебраическая сумма и напряжение в конце линии, рассчитанные по формуле (10), приведены на рис. 5. Как видно из рис. 5, алгебраическая сумма падающей и отраженной волн и напряжение в конце линии, рассчитанное по формуле (10), совпадают, что подтверждает правильность расчетов.

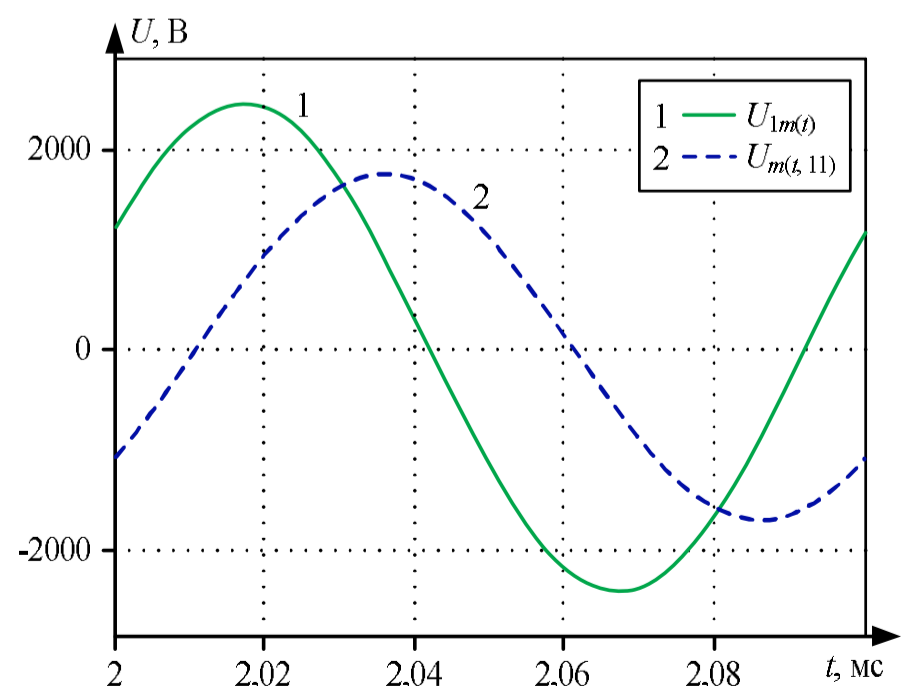


Рис. 4. Напряжения в начале и в конце кабель-троса

Таблица 3

Сравнительный расчет входного понижающего трансформатора ПЧ СЭП ТПА при частотах 1 и 10 кГц

Параметры расчета	Частота 1 кГц	Частота 10 кГц
Длина кабеля, км	8	11
Типоразмер сердечника	ГМ54ДС-140 К200×100×30	ГМ54ДС-30 К150×90×30
Потери трансформатора, Вт	34	86
Перегрев трансформатора, °С	10	43
Вес трансформатора, кг	4,6	2

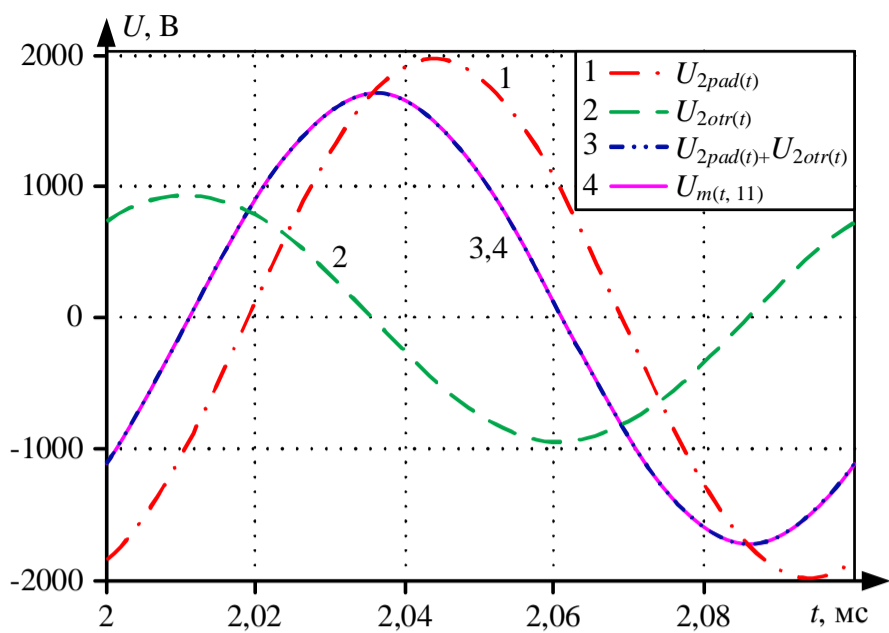


Рис. 5. Падающая и отраженная волна напряжения в конце линии, их алгебраическая сумма и напряжение в конце линии

Проведенные исследования позволяют учитывать эффект длинной линии в кабель-тросе и применять приведенные методы для расчета систем электропитания в случае передачи энергии по кабель-тросу [13].

Падающая волна затухает к концу линии, что обусловлено присутствием потерь в ней, а отражённая волна затухает в обратном направлении. Эти явления являются причиной нелинейного характера изменения амплитуды напряжения вдоль линии.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ВХОДНОГО ТРАНСФОРМАТОРА ПОДВОДНОЙ ЧАСТИ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ

Результаты расчета трансформатора ГМ54ДС К150×90×30 ПЧ СЭП ТПА с кабель-тросом КГО (3×5,6+1×3Е)-300/100, передающим мощность свыше 65 кВт на расстояние до 11 км, в виде перегрева  $\Delta T$ , потерь мощности  $\Delta P$  и веса трансформатора  $G$  при частоте передачи напряжения 10 кГц и относительной магнитной проницаемости  $\mu=30$  приведены в табл. 2.

Приведенные в табл. 2 результаты расчеты показывают, что при частоте 10 кГц оптимальным типоразмером сердечника является К150×90×30.

В работах [6,15] рассматривалась СЭП ТПА с кабель-тросом КГ(3×8,0+3×200В)240-90, передающим мощность свыше 65 кВт на расстояние до 8 км с передачей энергии по кабель-тросу на частоте 1 кГц.

Предлагается провести сравнительный расчет входных понижающих трансформаторов ПЧ СЭП ТПА для выявления влияния на систему повышения частоты передачи напряжения по кабель-тросу. Расчётные параметры трансформаторов ПЧ СЭП ТПА для частот 1 и 10 кГц и разных кабель-тросов приведены в табл. 3.

Таблица 2

Результаты расчета трансформатора подводной части ГМ54ДС при частоте 10 кГц

Типоразмер	К150×90×30	К170×100×30	К200×100×30
Потери мощности, Вт	86	90	93
Перегрев трансформатора, °С	43	36	27
Вес трансформатора, кг	2	2,5	4

Приведенные в табл. 3 результаты расчета трансформатора показывают, что при частоте 10 кГц масса входного понижающего трансформатора ПЧ СЭП ТПА снижается более чем в 2 раза, соответственно, уменьшаются и массогабаритные параметры всей ПЧ СЭП ТПА. При этом увеличивается перегрев трансформатора, но возможно обеспечить значение, не превышающее допустимую температуру перегрева.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ПРИ ЧАСТОТЕ 10 кГц

Имитационная модель СЭП ТПА с кабель-тросом КГО (3×5,6+1×3Е)-300/100, передающим мощность свыше 65 кВт на расстояние до 11 км, создана в среде Matlab Simulink. Для рассмотрения волновых эффектов в линии кабель-трос представлен одиннадцатью ячейками, каждая из которых содержит Г-образную структуру (рис. 3).

Имитационная модель СЭП ТПА с кабель-тросом КГО (3×5,6+1×3Е)-300/100, передающим мощность свыше 65 кВт на расстояние до 11 км, представлена на рис. 6. Принятые обозначения: VT1, VT2, VT3 – повышающие трансформаторы бортовой части СЭП; блок Cable – схема замещения кабель-троса, представленная ячейками; VT4-VT9 – понижающие трансформаторы ПЧ СЭП; VD1, VD2 – выпрямители ПЧ.

В результате моделирования были измерены напряжения в начале и конце кабель-троса, графики представлены на рис. 7. При моделировании СЭП ТПА принимались допущения: пассивные элементы идеальны, диоды идеальны, трансформаторы представляются пропорциональным звеном.

Графики на рис. 7 качественно совпадают с графиками, представленными на рис. 4, где напряжение в конце кабель-троса рассчитано по формуле (10). Форма напряжения в конце кабель-троса на рис. 7 может быть объяснена влиянием выпрямителя. Моделирование подтверждает появление волновых эффектов в кабель-тросе при частоте передачи 10 кГц.

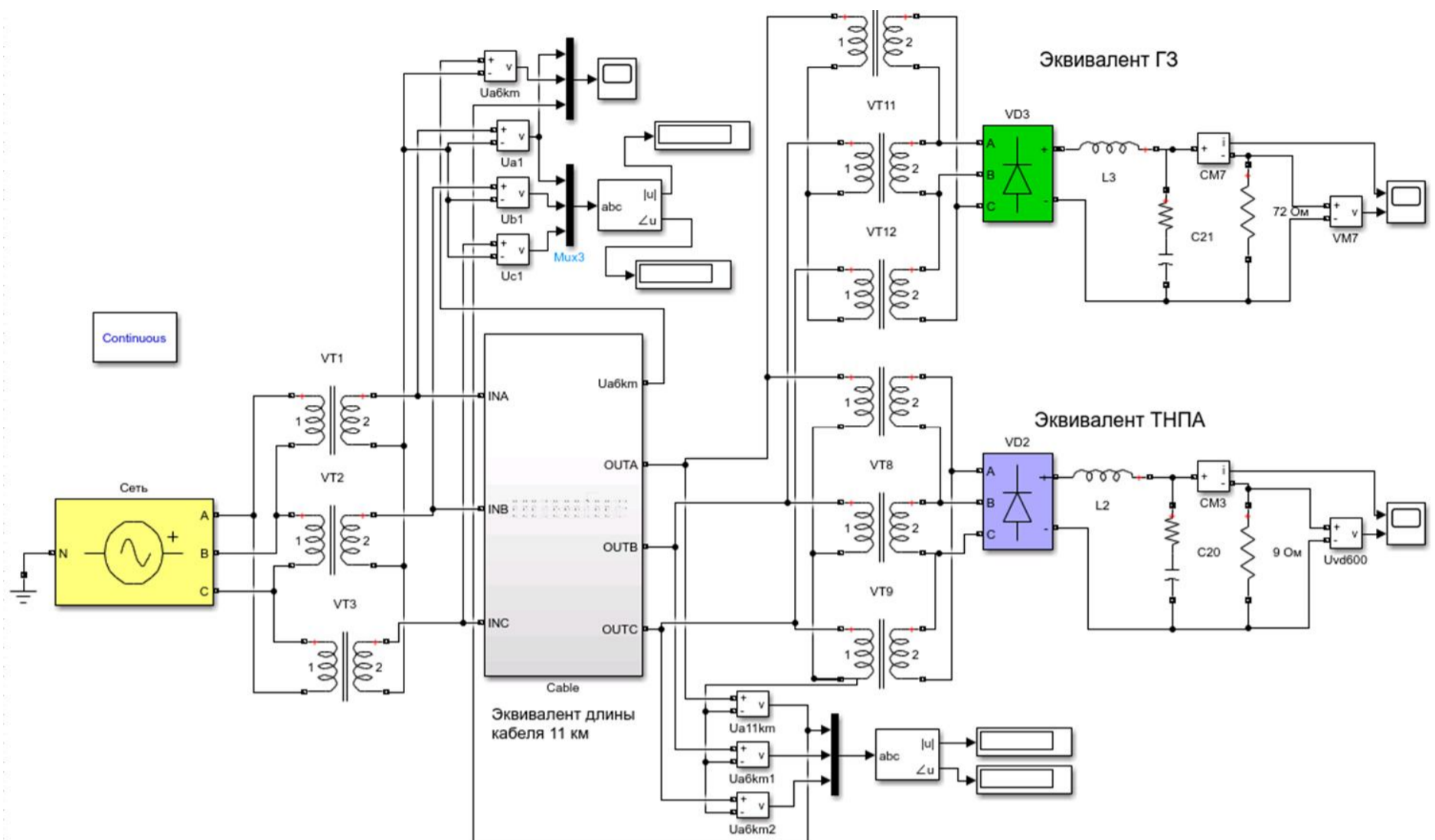


Рис. 6. Имитационная модель системы электропитания

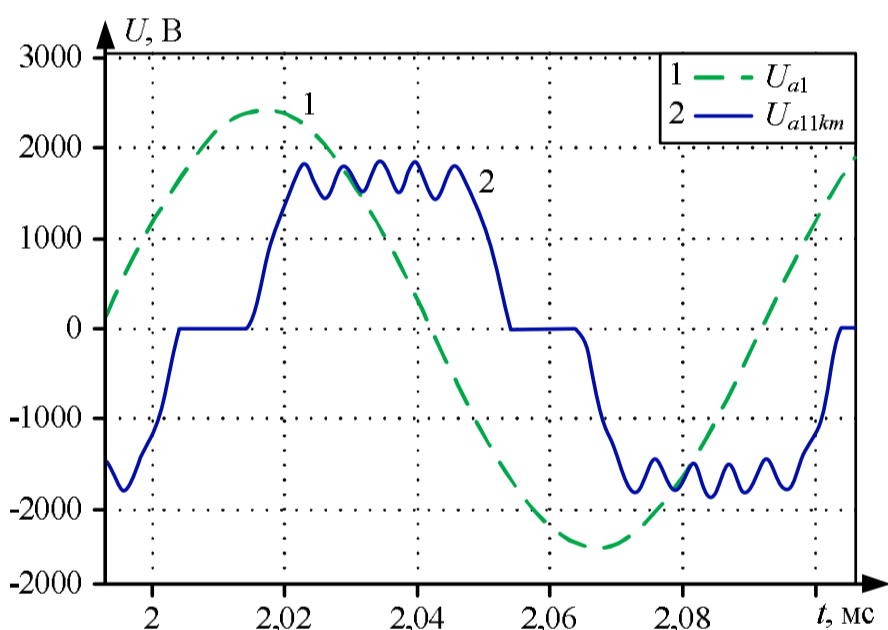


Рис. 7. Напряжения в начале и конце кабель-троса, полученные в результате моделирования

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, описанная методика расчета трансформатора позволяет обоснованно выбрать частоту передачи напряжения по кабель-тросу. Для СЭП ТПА с кабель-тросом КГО (3×5,6+1×3E)-300/100, передающим мощность свыше 65 кВт на расстояние до 11 км, такой частотой является 10 кГц. Показано, что при частоте 10 кГц масса входного понижающего трансформатора ПЧ СЭП ТПА снижается более чем в 2 раза по сравнению с СЭП с передачей энергии на частоте 1 кГц.

Проведенные исследования позволяют учитывать волновые эффекты в кабель-тросе и рассчитать напряжения и токи в любой точке линии. Проведено моделирование СЭП ТНПА с кабель-тросом КГО (3×5,6+1×3E)-300/100, передающим мощность свыше 65 кВт на расстояние до 11 км. График напряжения в конце кабель-троса, полученный при моделировании,

качественно совпал с таким же графиком, полученным с помощью расчета.

*Статья написана в рамках выполнения работы FEWM-2020-0046 «Фундаментальные основы и методология создания высокоэффективного энергопреобразования для систем космического и морского назначения на базе интеллектуальных силовых модулей сверхвысокой степени интеграции».*

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ястребов В.С. Телеуправляемые подводные аппараты. Ленинград: Судостроение, 1973, 199 с.
2. Ignatova A.M. Underwater Vehicles for Geological Research. Gelendzhik: Yuzhmorgeologia, 1990.
3. Underwater robotics: surface cleaning technics, adhesion and locomotion systems / Н. Albitar, К. Dandan, А. Ananiev, I. Kalaykov // International Journal of Advanced Robotic System. 2016. No. 13(1). Pp. 1-14. doi: 10.5772/62060
4. Рулевский В.М., Дементьев Ю.Н., Бубнов О.В. Системы электропитания подводных аппаратов // Известия Томского политехнического университета. 2004. №5(307). С. 120–123.
5. Мишин В.Н., Рулевский В.М., Юдинцев А.Г. Системы электропитания телеуправляемых подводных аппаратов переменного тока мощностью свыше 10 кВт // Известия Томского политехнического университета. 2013. №4(322). С. 107–110.
6. Рулевский В.М. Методика определения оптимального напряжения и частоты переменного тока в трехфазном кабель-тросе системы электропитания подводного аппарата // Доклады ТУСУР. 2019. №2(22). С. 121–127. doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-2-121-127
7. Определение погонных электротехнических параметров нефтепогружного кабеля / А.С. Глазырин, Ю.Н. Исаев, С.Н. Кладиев, А.П. Леонов, И.В. Раков, С.В. Колесников, С.В. Ланграф, А.А. Филипас В.А., Копырин, Р.Н. Хамитов, В.З. Ковалев, А.В. Лавринович // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг ресурсов. 2021.

- №6(332). С. 186-197. doi: 10.18799/24131830/2021/06/3249
8. Мелешин В.И. Транзисторная преобразовательная техника. М.: Техносфера, 2006. 632 с.
  9. Официальный сайт НПП Гаммамет. <http://www.gammamet.ru/index.php/ru/gm/comp-fix> (дата обращения: 28.08.2022)
  10. Бальян Р. Х. Трансформаторы для радиоэлектроники. М.: Советское радио, 1971. 720 с.
  11. Нейман Л.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники. Л.: Энергия, 1967. 517 с.
  12. Черкашин М.В., Бабак Л.И. Линии передачи и согласующие цепи для СВЧ МИС: учебное пособие. Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2010. 54 с.
  13. Правикова А.А. Кабель как цепь с распределенными параметрами в системе электропитания телеуправляемого подводного аппарата // Труды XIV Всероссийской научной конференции молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации» (НТИ-2020), г. Новосибирск, 30 ноября - 4 декабря. Новосибирск, 2020. С. 56-60.
  14. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. М.: Высшая школа, 1996. 623 с.
  15. Рулевский В.М. Энергоэффективные системы электропитания глубоководных телеуправляемых подводных аппаратов: дис. ... д-ра техн. наук: 05.09.03 / Рулевский Виктор Михайлович. Томск, 2019. 352 с
- Поступила в редакцию 21 сентября 2022 г. Принята к печати 12 ноября 2022 г.

## INFORMATION IN ENGLISH

### INFLUENCE OF VOLTAGE TRANSMISSION FREQUENCY THROUGH THE ROPE-CABLE ON LOSSES, WEIGHT AND SIZE PARAMETERS OF THE UNDERWATER VEHICLE POWER SUPPLY

Aleksandra A. Pravikova

Postgraduate Student, Head of Reliability Sector, Research Institute of Automation and Electromechanics TUSUR, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russia, bezruchenko@niiam.tomsk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0474-2912>

Victor M. Rulevskiy

D.Sc. (Engineering), Associate Professor, Rector of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russia. E-mail: rulevsky@niiam.tomsk.ru, rector@tusur.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3546-3921>

The article describes a method for calculating the step-down transformer of an underwater part in a remote-controlled underwater vehicle supply system. The chosen technique allows determining the maximum frequency of voltage to transmit the power through the rope-cable. In addition, it was shown that an increase in the frequency of voltage along the rope-cable up to 10 kHz leads to a decrease in the weight and size parameters of the input step-down transformer for the underwater part of the power supply by more than 2 times. An undesirable consequence of increasing the frequency of the supply voltage is an increase in the reactive (capacitive) component of the rope-cable current. Compensation of the reactive component of the current is performed using the magnetization inductances within the transformers of the onboard and underwater parts of the power supply. The manifestation of the wave effect in the rope-cable of the power supply with an increase in the frequency of voltage transmission is considered. A condition for representing a rope-cable as a distributed parameterline is given. A method for calculating currents and voltages at any point of the line is presented. The nature of the change in the voltage amplitude along the rope-cable has been investigated. Mathematical modeling of the power supply of the remote-controlled underwater vehicle with a rope-cable, with power rating over 65 kW for a distance of up to 11 km at a frequency of 10 kHz was carried out. The voltage waveforms were obtained at the beginning and at the end of the rope-cable. The non-linear nature of voltage change along the line was confirmed.

**Keywords:** remote-controlled underwater vehicle, power supply, rope-cable, voltage, frequency, transformer, overheating, losses

#### REFERENCES

1. Yastrebov V.S. *Telepravlyaemye podvodnye apparaty*. [Remote-controlled underwater vehicles]. Leningrad, Ship building Publ., 1973. 199 p. (In Russian)
2. Ignatova A.M. Underwater Vehicles for Geological Research. Gelendzhik, Yuzhmorgeologia Publ., 1990.
3. Albitar H., Dandan K., Ananiev A., Kalaykov I. Underwater robotics: surface cleaning technics, adhesion and locomotion systems. *International Journal of Advanced Robotic System*. 2016, no. 13(1), pp. 1-14. doi: 10.5772/62060
4. Rulevskiy V.M., Dementev Yu.N., Bubnov O.V. Power supply systems for alternating current underwater vehicles above 10 kW. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*. [Proceedings of Tomsk Polytechnic University], 2004, vol. 307, no. 5, pp. 120-123. (In Russian)
5. Mishin V.N., Rulevskiy V.M., Yudinzev A.G. Power supply systems for remote-controlled alternating current underwater vehicles above 10 kW. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*. [Proceedings of Tomsk Polytechnic University], 2013, vol. 322, no. 4, pp. 107-110. (In Russian)
6. Rulevskiy V.M. Calculation of optimal alternating current voltage and frequency in a three-phase rope-cable power supply system of an underwater vehicle. *Doklady TUSUP* [Reports of TUSUP], 2019, no. 2(22), pp. 121-127. (In Russian). doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-2-121-127
7. Glazyrin A.S., Isaev Yu.N., Kladiev S.N., Leonov A.P., Rakov I.V., Kolesnikov S.V., Langraf S.V., Filipas A.A., Kopyrin V.A., Khamitov R.N., Kovalev V.Z., Lavrinovich A.V. Calculation of linear electrical parameters of an oil-submersible cable. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*. [Proceedings of Tomsk Polytechnic University], 2021, vol. 332, no. 6, pp. 186-197. (In Russian) doi:
8. Meleshin V.I. *Tranzistornaya preobrazovatel'naya tekhnika* [Solid state converter equipment]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2006. 632 p. (In Russian)
9. NPP Gammamet: <http://www.gammamet.ru/index.php/ru/gm/comp-fix> (accessed 28 August 2020)
10. Balyan R.Kh. *Transformatory dlya radioelektroniki*. [Transformers for radio electronics]. Moscow, Soviet Radio Publ., 1971. 720 p. (In Russian)
11. Nejman L.R., Demirchyan K.S. *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki*. [Fundamentals of electrical engineering]. Leningrad, Energy Publ., 1967. 517 p. (In Russian)
12. Cherkashin M.V., Babak L.I. *Linii peredachi i soglasuyusc-*

- chie tsepi dlya SVCH MIS* [Transmission lines and matching circuits for SVCH MIS]. Tomsk, Tomsk State University of Radio electronic control systems, 2010. 54 p. (In Russian)
13. Pravikova A.A. Cable as a circuit with distributed parameters in the power supply system of a remote-controlled underwater vehicle. *Trudy XIV Vserossiiskoy nauchnoy konferentsii molodyh uchenykh "Nauka. Tehnologii. Innovatsii" (NTI-2020)*. [Proceedings of XIV All-Russian scientific conference of young scientists "Science. Technology. Innovations" (NTI-2020)]. Novosibirsk, 2020, pp. 56-60. (In Russian)
14. Bessonov L.A. *Teoreticheskiye osnovy elektrotehniki* [Fundamentals of electrical engineering]. Moscow, High school, 1996. 623 p. (In Russian)
15. Rulevskiy V.M. *Energoeffektivnyye sistemy elektropitaniya glubokovodnykh teleupravlyaemykh podvodnykh apparatov: Doct. Diss.* [Energy efficient power supply systems for remote-controlled deep-water vehicles. Doct. Diss.]. Tomsk, 2019. 352 p. (In Russian)

Правикова А.А., Рулевский В.М. Влияние частоты передачи напряжения по кабель-тросу на потери и массогабаритные параметры системы электропитания подводного аппарата // *Электротехнические системы и комплексы*. 2022. № 4(57). С. 29-35. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-4\(57\)-29-35](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-4(57)-29-35)

Pravikova A.A., Rulevskiy V.M. Influence of Voltage Transmission Frequency through the Rope-Cable on Losses, Weight and Size Parameters of the Underwater Vehicle Power Supply. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2022, no. 4(57), pp. 29-35. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-4\(57\)-29-35](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-4(57)-29-35)

Панова Е.А., Новиков И.В., Сабирова Р.Р.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЛЭП 110-220 кВ БЕЗ ГРОЗОТРОСА И С ОДНИМ ГРОЗОТРОСОМ

Поскольку промышленные системы электроснабжения характеризуются сравнительно короткими линиями 110-220 кВ, высокой плотностью нагрузки и преобладанием разомкнутых участков сети над замкнутыми, а существующие модели ЛЭП и алгоритмы ОМП ориентированы на моделирование сетей энергосистем, в связи с чем не позволяют достаточно точно установить место возникновения КЗ в условиях системы промышленного электроснабжения, поэтому актуальным является совершенствование методов дистанционного ОМП. Существующие методы моделирования не дают достаточной точности результатов в сетях промышленного электроснабжения 110-220 кВ. Поэтому актуальным является сравнение способов моделирования воздушных линий электропередач без грозотроса и с одним грозотросом. В работе были рассмотрены три метода моделирования: метод симметричных составляющих, метод расчета по справочным данным и метод расчета с помощью комбинированной схемы замещения. Каждый из рассмотренных методов обладает своими недостатками и преимуществами. Представленная комбинированная схема замещения сочетает в себе достоинства методов фазных координат и симметричных составляющих. Это позволяет учесть несимметрию расположения проводов, а также с помощью этого метода возможен расчет опоры ЛЭП любой конфигурации и любыми проводами. В ходе расчета был проведен анализ на примере двух опор П110-3В+4 без троса и АМ110-3Ф4 с 1 тросом с различным сечением проводов. Результаты расчета с помощью комбинированной схемы замещения дали величины по прямой последовательности, идентичные с полученными другими методами. Наибольшее отличие параметров одноцепной ЛЭП получилось при использовании проводов сечением 240 мм<sup>2</sup>. Рассчитанная с помощью комбинированной схемы замещения емкость нулевой последовательности отличается от вычисленной другими методами примерно в 2 раза.

**Ключевые слова:** линия электропередачи, однофазное короткое замыкание, система электроснабжения, симметричные составляющие, фазные координаты, схема замещения, удельное сопротивление, емкость, определение места повреждения, грозозащитный трос

### ВВЕДЕНИЕ

Одними из наиболее частых видов повреждения в сети с эффективно заземленной нейтралью являются однофазные короткие замыкания. Успешное и быстрое устранение такого повреждения и восстановление нормальной схемы системы электроснабжения возможно только при точном определении места повреждения. Исключение составляют случаи, когда однофазное короткое замыкание было ликвидировано действием режимной автоматики. Фактическое определение места повреждения затрудняется в связи с переходом со стеклянных изоляторов ЛЭП на полимерные. Повреждение на полимерном изоляторе можно обнаружить только при подъеме на опору линии электропередачи. Это существенно увеличивает сроки обнаружения места повреждения. Все это в целом сказывается на надежности системы электроснабжения и питания потребителей. Даже в системах промышленного электроснабжения при сравнительно небольшой длине линии электропередачи напряжением 110 кВ обнаружение и ликвидация повреждения может занимать до 8-10 часов. При этом следует отметить, что существующие методики дистанционного определения места повреждения ориентированы в основном на сети энергосистем. Такие сети характеризуются протяженными линиями электропередачи напряжением 110 кВ и выше и сложнзамкнутым характером сети. Системы же промышленного электро-

снабжения характеризуются высокой концентрацией нагрузки, сравнительно короткими линиями электропередачи напряжением 110 кВ и преобладанием разомкнутых участков сети над замкнутыми.

Для дистанционного определения места повреждения на линиях электропередачи применяются различные подходы. Так, авторами [1] предложена алгоритмическая модель линии электропередачи, которая позволяет оценить некоторые параметры, моделируемые ЛЭП по известным наблюдаемым параметрам режима на участке сети с двусторонним питанием. Похожий подход использован авторами в работе [2] для определения места повреждения в сети с многосторонним питанием. Авторы предлагают использовать для дистанционного места повреждения терминалы локации Бреслер. В работе [3] авторы предлагают специальное реле сопротивления, работа которого основана на принципе нейронных сетей, для обнаружения места повреждения. Следует отметить, что предложенные в данных работах подходы для дистанционного места определения места повреждения требуют установки дополнительного аппаратного обеспечения на линиях электропередачи. Все это связано с дополнительными затратами, что особенно актуально при большом количестве линий электропередачи 110 кВ на распределительном устройстве подстанции.

Намного с меньшими затратами связаны расчётные методы определения места повреждения по параметрам аварийного режима. Однако точность таких методов будет зависеть от способа задания линии электропере-

дачи и точности задания параметров этой линии [4]. Так, авторы [5] предлагают использовать сочетание волнового метода и нейросетевых алгоритмов. В работе [6] авторами предложена модель ЛЭП в пространстве состояний, разработанная в MATLAB/Simulink, которая позволяет анализировать до аварийные и аварийные режимы ее работы и на основе анализа матрицы эквивалентных параметров сети судить о виде и месте возникновения повреждения.

В данной работе представлена комбинированная схема замещения линий электропередачи, ориентированная в первую очередь на сети систем промышленного электроснабжения.

#### КОМБИНИРОВАННАЯ СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ

Комбинированная схема замещения объединяет в себе два метода моделирования ЛЭП, что упрощает задачи получения исходных данных для заданного участка линии. Комбинированная схема позволяет моделировать ЛЭП с помощью метода фазных координат, а оставшуюся сеть в симметричных составляющих.

С помощью метода симметричных составляющих достаточно просто выполнить расчеты несимметричных аварийных режимов. Однако он основывается на модели расчетов, которые усредняют расстояния между проводами и тросами, что не позволяет учесть такие факторы, как несимметричное расположение проводников ЛЭП относительно друг друга и грозозащитного провода. Для этого целесообразно использовать метод фазных координат, который предполагает представление эквивалентной схемы любого элемента в виде матрицы  $3 \times 3$ , то есть составление трехфазной схемы замещения.

Для определения места повреждения особое внимание требуется уделять определению отдельных электрических параметров, таких как индуктивность, в том числе взаимная индуктивность, и емкость проводников. В [7] авторы показывают вывод формул для нахождения полного сопротивления для ЛЭП с различным расположением проводящих элементов, с учетом и без учета грозозащитного троса. В работе [8] дано определение емкостной проводимости с помощью комбинированной схемы замещения и показан подробный вывод формул.

Сопротивления ЛЭП по прямой, обратной и нулевой последовательности:

$$\begin{aligned} \dot{Z}_1 = \dot{Z}_2 = \\ = \frac{1}{3} \left( \dot{Z}_{AA} + \dot{Z}_{BB} + \dot{Z}_{CC} - (\dot{Z}_{AB} + \dot{Z}_{BC} + \dot{Z}_{CA}) \right); \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \dot{Z}_0 = \\ = \frac{1}{3} \left( \dot{Z}_{AA} + \dot{Z}_{BB} + \dot{Z}_{CC} + 2(\dot{Z}_{AB} + \dot{Z}_{BC} + \dot{Z}_{CA}) \right), \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \dot{Z}_{ij} = r_{ii} + r_3 + j0,1451g \frac{D_3}{\rho_{п.э}}, \quad (i = j); \\ \dot{Z}_{ij} = r_3 + j0,1451g \frac{D_3}{D_{ij}}, \quad (i \neq j), \end{aligned} \quad (3)$$

где  $\dot{Z}_{ii}$  – полное сопротивление фазного провода;  $\dot{Z}_{ij}$  – полное сопротивление взаимной индукции между проводами фаз  $i$  и  $j$ ;

$r_{ii}$  – удельное активное сопротивление провода, Ом/км;  $r_3$  – сопротивление, учитывающее потери активной мощности в земле от протекающего в ней тока (принимается равным 0,05 Ом/км);

$D_3$  – глубина расположения обратного провода (принимается равной 935 м), м;  $\rho_{п.э}$  – эквивалентный радиус провода (0,95 от действительного радиуса), м;

$D_{ij}$  – расстояние между проводящими элементами, м.

Выполнив расчеты по выражениям, представленным в [8], получим матрицу, диагональные элементы которой представляют собой полные сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательности одноцепной линии электропередачи с одним грозозащитным тросом. Эти полные сопротивления будут иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} \dot{Z}_{1(T)} = \dot{Z}_{2(T)} = \\ = \frac{1}{3} \left( \dot{Z}_{AA} + \dot{Z}_{BB} + \dot{Z}_{CC} - (\dot{Z}_{AB} + \dot{Z}_{BC} + \dot{Z}_{CA}) \right); \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \dot{Z}_{0(T)} = \frac{1}{3} \left( \dot{Z}_{AA} + \dot{Z}_{BB} + \dot{Z}_{CC} + 2(\dot{Z}_{AB} + \dot{Z}_{BC} + \dot{Z}_{CA}) - \right. \\ \left. - \frac{(\dot{Z}_{AT} + \dot{Z}_{BT} + \dot{Z}_{CT})^2}{\dot{Z}_{TT}} \right); \end{aligned} \quad (5)$$

где  $\dot{Z}_{TT}$  – сопротивление проводника молниезащиты;  $\dot{Z}_{iT}$  и  $\dot{Z}_{Tj}$  – полное сопротивление взаимной индукции между проводами фазы  $i$  и грозотросом.

Потенциальные коэффициенты в симметричных составляющих [1]:

$$\begin{aligned} \alpha_1 = \alpha_2 = \\ = \frac{1}{3} \left( \alpha_{AA} + \alpha_{BB} + \alpha_{CC} - (\alpha_{AB} + \alpha_{BC} + \alpha_{CA}) \right); \end{aligned} \quad (6)$$

$$\alpha_0 = \frac{1}{3} \left( \alpha_{AA} + \alpha_{BB} + \alpha_{CC} + 2(\alpha_{AB} + \alpha_{BC} + \alpha_{CA}) \right), \quad (7)$$

где  $\alpha_{ii}$  – собственный потенциальный коэффициент;  $\alpha_{ij}$  – взаимный потенциальный коэффициент.

Зная потенциальные коэффициенты, можно определить поперечную емкость ЛЭП:

$$C = \frac{1}{\alpha}. \quad (8)$$

Грозозащитный трос оказывает влияние только на емкость нулевой последовательности и подтверждает правильность полученных уравнений. Емкость прямой и обратной последовательности одноцепной ЛЭП без грозозащитного троса равна емкости ЛЭП с грозозащитным тросом и определяется по (6) и (8).

Потенциальный коэффициент нулевой последовательности для одноцепной ЛЭП с грозозащитным тросом:

$$\begin{aligned} \alpha_{0(T)} = \frac{1}{3} \left( \alpha_{AA} + \alpha_{BB} + \alpha_{CC} + \right. \\ \left. + 2(\alpha_{AB} + \alpha_{BC} + \alpha_{CA}) - \frac{(\alpha_{AT} + \alpha_{BT} + \alpha_{CT})^2}{\alpha_{TT}} \right), \end{aligned} \quad (10)$$

где  $\alpha_{TT}$  – собственный потенциальный коэффициент проводника молниезащиты;

$\alpha_{Tj}$  и  $\alpha_{Tj}$  – потенциальный коэффициент взаимной индукции между проводами фазы  $i$  и молниеотводом.

ОЦЕНКА УДЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЛЭП

Для оценки полученных математических моделей был выполнен расчет удельных электрических параметров одноцепной линии электропередачи 110 кВ без грозотроса и с одним грозозащитным тросом. Для определения полных сопротивлений и потенциальных коэффициентов линии электропередачи были рассчитаны расстояния между проводящими элементами, а также между ними и их зеркальными изображениями.

Для оценки полученных результатов и выведенных выражений выполнена серия расчетов удельных электрических параметров ЛЭП для опор П110-3В+4 и АМ110-3Ф4 при различных марках провода.

Расчеты выполнены тремя способами: на основе справочных данных (СД), по руководящим указаниям (РУ11) [9], с помощью разработанной комбинированной схемы замещения по фазным координатам (ФК).

В табл. 1-8 представлены расчеты сопротивления, емкости и емкостной проводимости для опор П110-3В+4 без троса и АМ110-3Ф4 с одним грозотросом.

По полученным данным построены сравнительные гистограммы наиболее отличающихся электрических параметров провода, представленные на рис. 1 и 2.

Расчёты были выполнены в программном продукте «PTC MathCad».

Таблица 1  
Данные расчетов для опоры П110-3В+4

Опоры		П110-3В+4 без троса			
		АС-70/11	АС-95/16	АС-120/19	АС-150/24
Комбинированная схема замещения	$Z_1=Z_2, \text{ Ом}$	0,428+ +0,436i	0,306+ +0,425i	0,249+ +0,418i	0,198+ +0,41i
	$Z_0, \text{ Ом}$	0,578+ +1,407i	0,456+ +1,396i	0,399+ +1,389i	0,348+ +1,381i
	$C_1=C_2, 10^{-9} \text{ Ф}$	8,046	8,248	8,395	8,547
	$C_0, 10^{-9} \text{ Ф}$	4,127	4,179	4,217	4,225
Справочные данные	$Z_1=Z_2, \text{ Ом}$	0,428+ +0,444i	0,306+ +0,421j	0,249+ +0,427i	0,198+ +0,42i
	$Z_0, \text{ Ом}$	0,498+ +1,554i	0,071+ +1,448i	0,872+ +1,462i	0,693+ +1,436i
	$C_1=C_2, 10^{-9} \text{ Ф}$	8,121	8,321	8,471	8,599
	$C_0, 10^{-9} \text{ Ф}$	2,320	2,377	2,420	2,457
По руководящим указаниям (РУ11)	$Z_1=Z_2, \text{ Ом}$	0,428+ +0,436i	0,306+ +0,425i	0,249+ +0,418i	0,198+ +0,41i
	$Z_0, \text{ Ом}$	0,578+ +2,278i	0,456+ +2,246i	0,399+ +2,224i	0,348+ +2,202i
	$C_1=C_2, 10^{-9} \text{ Ф}$	8,02	8,221	8,368	8,519
	$C_0, 10^{-9} \text{ Ф}$	5,785	5,889	5,964	6,041

Таблица 2  
Данные расчетов для опоры П110-3В+4

Опоры		П110-3В+4 без троса		
		АС-185/29	АС-240/32	АС-300/39
Комбинированная схема замещения	$Z_1=Z_2, \text{ Ом}$	0,162+ +0,404i	0,12+ +0,395i	0,098+ +0,389i
	$Z_0, \text{ Ом}$	0,312+ +1,375i	0,27+ +1,366i	0,248+ +1,36i
	$C_1=C_2, 10^{-9} \text{ Ф}$	8,673	8,865	9,017
	$C_0, 10^{-9} \text{ Ф}$	4,286	4,332	4,368
Справочные данные	$Z_1=Z_2, \text{ Ом}$	0,162+ +0,413i	0,12+ +0,405i	0,098+ +0,429i
	$Z_0, \text{ Ом}$	0,567+ +1,415i	0,42+ +1,384i	0,343+ +1,361i
	$C_1=C_2, 10^{-9} \text{ Ф}$	8,758	8,949	8,408
	$C_0, 10^{-9} \text{ Ф}$	2,502	2,557	2,402
По руководящим указаниям (РУ11)	$Z_1=Z_2, \text{ Ом}$	0,162+ +0,404i	0,12+ +0,395i	0,098+ +0,389i
	$Z_0, \text{ Ом}$	0,312+ +2,184i	0,27+ +2,157i	0,248+ +2,138i
	$C_1=C_2, 10^{-9} \text{ Ф}$	8,645	8,836	8,987
	$C_0, 10^{-9} \text{ Ф}$	6,104	6,199	6,272

Таблица 3  
Данные расчетов емкостной проводимости для опоры 1У110-1+5

Способ расчёта	Ёмкостная проводимость	1У110-1+5 без троса			
		АС-70/11	АС-95/16	АС-120/19	АС-150/24
Комбинированная схема замещения	$b_{0(\Gamma)} 10^{-6}, \text{ См/км}$	2,45	2,51	2,55	2,60
	$b_{0(0)} 10^{-6}, \text{ См/км}$	1,50	1,52	1,54	1,55
Справочные данные	$b_{0(\Gamma)} 10^{-6}, \text{ См/км}$	2,55	2,61	2,66	2,70
	$b_{0(0)} 10^{-6}, \text{ См/км}$	0,73	0,75	0,76	0,77
По руководящим указаниям (РУ11)	$b_{0(\Gamma)} 10^{-6}, \text{ См/км}$	2,43	2,49	2,53	2,58
	$b_{0(0)} 10^{-6}, \text{ См/км}$	2,13	2,17	2,20	2,24

Таблица 4  
Данные расчетов емкостной проводимости для опоры 1У110-1+5

Способ расчёта	Ёмкостная проводимость	1У110-1+5 без троса		
		АС-185/29	АС-240/32	АС-300/39
Комбинированная схема замещения	$b_{0(\Gamma)} 10^{-6}, \text{ См/км}$	2,63	2,69	2,73
	$b_{0(0)} 10^{-6}, \text{ См/км}$	1,57	1,59	1,60
Справочные данные	$b_{0(\Gamma)} 10^{-6}, \text{ См/км}$	2,75	2,81	2,64
	$b_{0(0)} 10^{-6}, \text{ См/км}$	0,79	0,80	0,75
По руководящим указаниям (РУ11)	$b_{0(\Gamma)} 10^{-6}, \text{ См/км}$	2,62	2,67	2,72
	$b_{0(0)} 10^{-6}, \text{ См/км}$	2,26	2,30	2,34



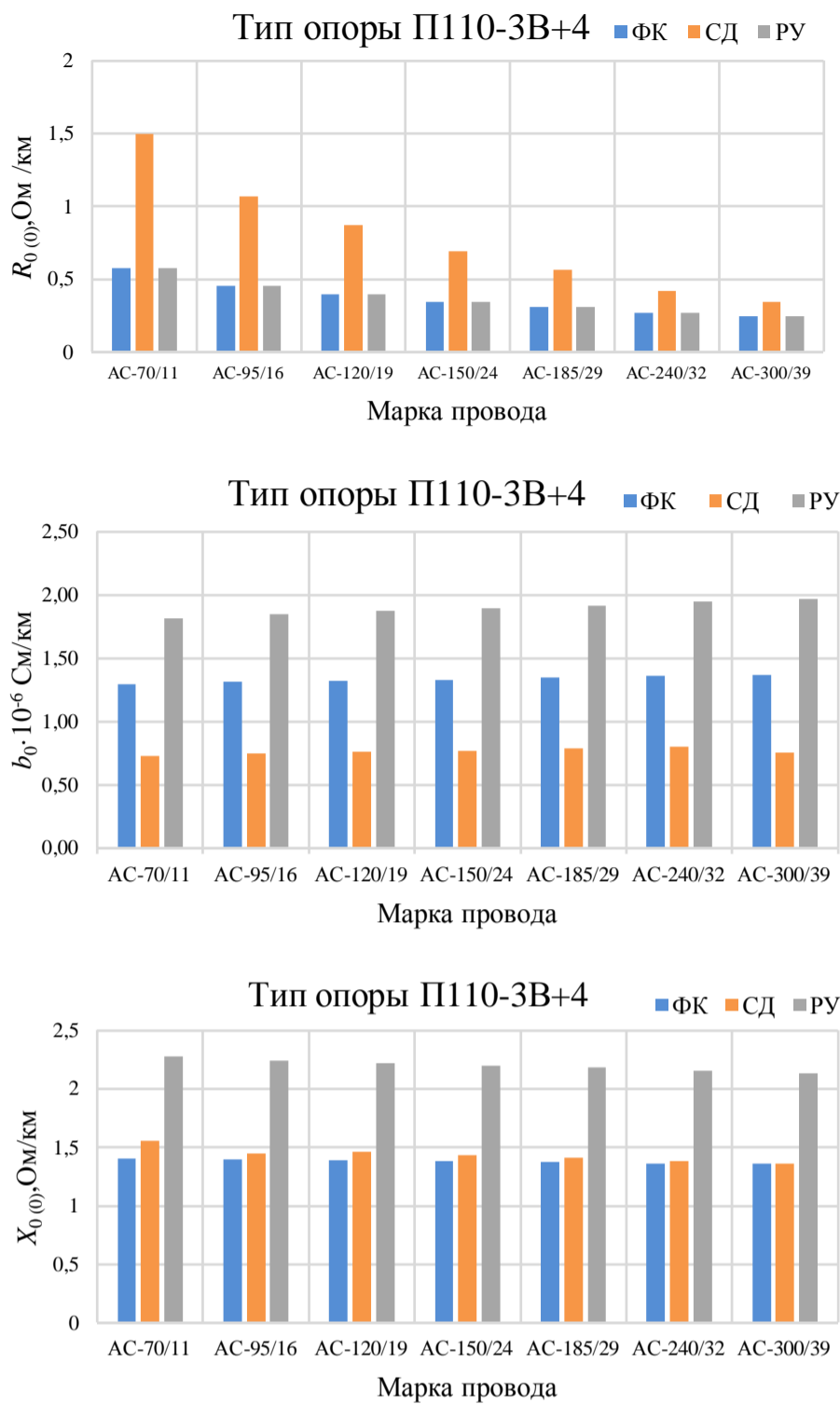


Рис. 1. Сравнительные гистограммы емкостной проводимости и сопротивлений для опоры марки П110-3В+4

Таблица 5  
Данные расчетов для опоры АМ110-3Ф4

Опоры		АМ110-3Ф4 с 1 тросом			
		АС-70/11	АС-95/16	АС-120/19	АС-150/24
Комбинированная схема замещения	$Z_1=Z_2, \text{ Ом}$	0,428+ +0,446i	0,306+ +0,436i	0,249+ +0,428i	0,198+ +0,421i
	$Z_0, \text{ Ом}$	0,643+ +1,343i	0,521+ +1,332i	0,464+ +1,352i	0,413+ +1,318i
	$C_1=C_2, 10^{-9} \text{ Ф}$	7,912	8,107	8,25	8,396
	$C_0, 10^{-9} \text{ Ф}$	5,282	5,368	5,43	5,494
Справочные данные	$Z_1=Z_2, \text{ Ом}$	0,428+ +0,444i	0,306+ +0,434i	0,249+ +0,427i	0,198+ +0,42i
	$Z_0, \text{ Ом}$	1,498+ +1,554i	1,071+ +1,448i	0,872+ +1,462i	0,693+ +1,436i
	$C_1=C_2, 10^{-9} \text{ Ф}$	8,121	8,321	8,471	8,599
	$C_0, 10^{-9} \text{ Ф}$	2,320	2,377	2,420	2,457
По руководящим указаниям (РУ11)	$Z_1=Z_2, \text{ Ом}$	0,428+ +0,446i	0,306+ +0,436i	0,249+ +0,428i	0,198+ +0,421i
	$Z_0, \text{ Ом}$	0,643+ +2,235i	0,521+ +2,204i	0,464+ +2,181i	0,413+ +2,159i
	$C_1=C_2, 10^{-9} \text{ Ф}$	7,832	8,023	8,163	8,307
	$C_0, 10^{-9} \text{ Ф}$	7,563	7,742	7,872	8,006

Таблица 6  
Данные расчетов для опоры АМ110-3Ф4

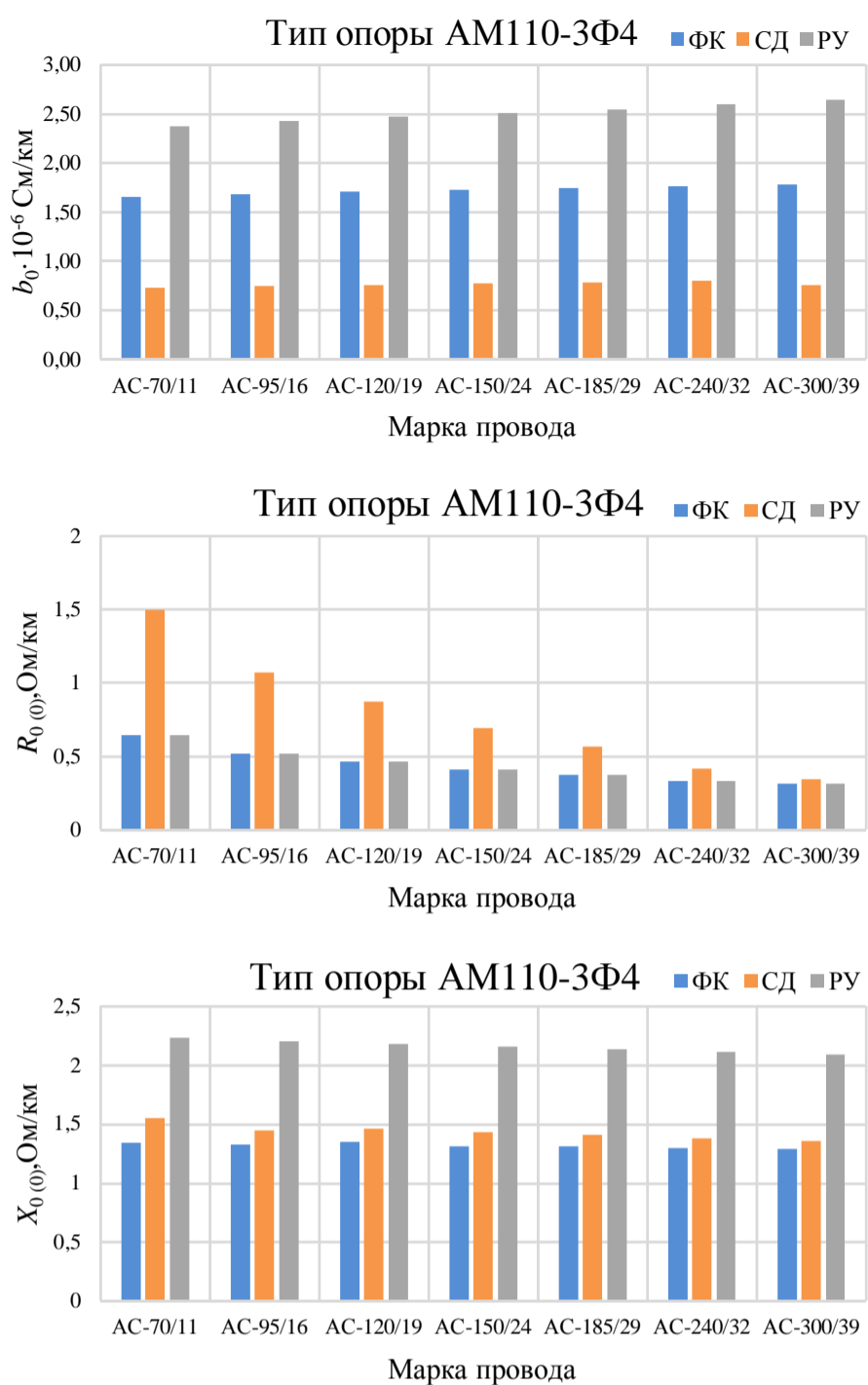
Опоры		АМ110-3Ф4 с 1 тросом		
		АС-185/29	АС-240/32	АС-300/39
Комбинированная схема замещения	$Z_1=Z_2, \text{ Ом}$	0,162+ +0,415i	0,12+ +0,406i	0,098+ +0,399i
	$Z_0, \text{ Ом}$	0,377+ +1,312i	0,335+ +1,303i	0,313+ +1,296i
	$C_1=C_2, 10^{-9} \text{ Ф}$	8,518	8,703	8,849
	$C_0, 10^{-9} \text{ Ф}$	5,545	5,623	5,684
Справочные данные	$Z_1=Z_2, \text{ Ом}$	0,162+ +0,413i	0,12+ +0,405i	0,098+ +0,429i
	$Z_0, \text{ Ом}$	0,567+ +1,415i	0,42+ +1,384i	0,343+ +1,361i
	$C_1=C_2, 10^{-9} \text{ Ф}$	8,758	8,949	8,408
	$C_0, 10^{-9} \text{ Ф}$	2,502	2,557	2,402
По руководящим указаниям (РУ11)	$Z_1=Z_2, \text{ Ом}$	0,162+ +0,415i	0,12+ +0,406i	0,098+ +0,399i
	$Z_0, \text{ Ом}$	0,377+ +2,141i	0,335+ +2,115i	0,313+ +2,095i
	$C_1=C_2, 10^{-9} \text{ Ф}$	8,427	8,608	8,751
	$C_0, 10^{-9} \text{ Ф}$	8,117	8,285	8,418

Таблица 7  
Данные расчетов емкостной проводимости для опоры АМ110-3Ф4

Способ расчёта	Ёмкостная проводимость	АМ110-3Ф4 с 1 тросом			
		АС-70/11	АС-95/16	АС-120/19	АС-150/24
Комбинированная схема замещения	$b_{0(1)} 10^{-6}, \text{ См/км}$	2,48	2,55	2,59	2,64
	$b_{0(0)} 10^{-6}, \text{ См/км}$	1,66	1,69	1,71	1,73
Справочные данные	$b_{0(1)} 10^{-6}, \text{ См/км}$	2,55	2,61	2,66	2,70
	$b_{0(0)} 10^{-6}, \text{ См/км}$	0,73	0,75	0,76	0,77
По руководящим указаниям (РУ11)	$b_{0(1)} 10^{-6}, \text{ См/км}$	2,46	2,52	2,56	2,61
	$b_{0(0)} 10^{-6}, \text{ См/км}$	2,37	2,43	2,47	2,51

Таблица 8  
Данные расчетов емкостной проводимости для опоры 1У110-1+5

Способ расчёта	Ёмкостная проводимость	АМ110-3Ф4 с 1 тросом		
		АС-185/29	АС-240/32	АС-300/39
Комбинированная схема замещения	$b_{0(1)} 10^{-6}, \text{ См/км}$	2,67	2,73	2,78
	$b_{0(0)} 10^{-6}, \text{ См/км}$	1,74	1,77	1,78
Справочные данные	$b_{0(1)} 10^{-6}, \text{ См/км}$	2,75	2,81	2,64
	$b_{0(0)} 10^{-6}, \text{ См/км}$	0,79	0,80	0,75
По руководящим указаниям (РУ11)	$b_{0(1)} 10^{-6}, \text{ См/км}$	2,65	2,70	2,75
	$b_{0(0)} 10^{-6}, \text{ См/км}$	2,55	2,60	2,64



**Рис. 2. Сравнительные гистограммы емкостной проводимости и сопротивлений для опоры марки АМ110-3Ф4**

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В работе предложена схема замещения одноцепной ЛЭП без и с одним грозозащитным тросом, основанная на сочетании методов фазных координат и симметричных составляющих. За счет использования метода фазных координат и задания потенциальных коэффициентов проводов и грозозащитного троса ЛЭП в виде матрицы размерностью 3×3. В нее включены собственные и взаимные потенциальные коэффициенты фазных проводов и грозозащитного троса.

В статье описаны основные выражения для нахождения сопротивления по прямой, обратной и нулевой последовательности, а также поперечную емкость ЛЭП без и с одним грозотросом. Получены результаты, рассчитанные различными способами по комбинированной схеме замещения, по справочным данным и с помощью руководящих указаний (РУ 11). Полученные данные позволяют оценить точность полученных расчетных данных различными способами, а также оценить влияние грозозащитного троса.

Как показали результаты моделирования одноцепной ЛЭП без и с одним грозотросом, наибольшее отличие в величинах активного и индуктивного сопро-

Поступила в редакцию 30 сентября 2022 г.

тивлений, а также поперечной емкости наблюдаются по нулевой последовательности. Ввиду отсутствия учета грозозащитного троса в расчетах по справочным данным емкостная проводимость получается заниженной на 30%.

Удельное сопротивление прямой последовательности, определенное с использованием комбинированной схемы замещения, отличается менее 5% от аналогичного сопротивления, определенного по руководящим указаниям [9] с использованием метода симметричных составляющих.

**СПИСОК ИСТОЧНИКОВ**

1. Ермаков К. И. Моделирование в задачах определения места повреждения на линиях электропередач // Вестник Чувашского университета. 2011. № 3. С. 67-70.
2. Бычков Ю.В., Павлов А.О. Определение места повреждения в схемах с многосторонним питанием // Энергетика Татарстана. 2011. № 2(22). С. 33-38.
3. Kazzaz S.A.S. Al, Ismael I., Mohammed K.K. Fault detection and location of power transmission lines using intelligent distance relay // Int. J. Power Electron. Drive Syst. 2020. Vol. 11. № 2. Pp. 726-734. doi: 10.11591/ijpeds.v11.i2.pp726-734
4. Куликов Ф.А., Кормилицына А.М., Иванов И.Е. Анализ влияния вариаций параметров воздушных линий электропередачи на точность двустороннего определения места повреждения // Электроэнергетика : Пятнадцатая всероссийская (седьмая междунар.) науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых: матер. конф. В 6-ти т., Иваново, 07–10 апреля 2020 года. Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, 2020. С. 13.
5. Кощев М.И., Славутский А.Л., Славутский Л.А. Простые нейросетевые алгоритмы для волнового метода определения места повреждения электросети // Вестник Чувашского университета. 2019. № 3. С. 110-118.
6. Fault analysis of power transmission line in a generalized state-space model perspective / G. Niu, T. Xiao, W. Pei, M. Zhu, Z. Yan, L. Zhou, Z. Qi, L. Kong // Proceedings IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Pp. 239-243. doi: 10.1109/IECON.2017.8216044. 2017.
7. Продольное сопротивление одноцепной ЛЭП в фазных координатах для определения места повреждения при однофазных коротких замыканиях в сети 110 кВ / Р.Р. Сабирова, И.В. Лукьянова, О.И. Петухова, Е.А. Панова // Энергетики и металлургии настоящему и будущему России: сборник материалов 22-й Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и специалистов 25-26 мая 2021. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2021. С. 36-38.
8. Панова Е.А. Комбинированная схема замещения одноцепной ЛЭП // Проблемы и перспективы развития электроэнергетики и электротехники: материалы III Всероссийской научно-практической конференции, Казань, 17–18 марта 2021 года. Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2021. С. 48-52.
9. Руководящие указания по релейной защите. Вып. 11. Расчеты токов короткого замыкания для релейной защиты и системной автоматики в сетях 110-750 кВ. М.: Энергия, 1979. 152 с.

Принята к печати 2 ноября 2022 г.

## INFORMATION IN ENGLISH

## COMPARATIVE ANALYSIS OF MODELS FOR CALCULATING ELECTRICAL PARAMETERS OF 110-220 kV TRANSMISSION LINES WITHOUT A LIGHTNING ROD AND WITH ONE LIGHTNING ROD

Evgeniya A. Panova

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Department of Electric Power Supply of Industrial Enterprises, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. ea.panova@magtu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9392-3346>

Ivan V. Novikov

Student, Department of Electric Power Supply of Industrial Enterprises, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, <https://orcid.org/0000-0003-1327-2526> Regina R. Sabirova

Student, Department of Electric Power Supply of Industrial Enterprises, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, <https://orcid.org/0000-0002-2675-6231>

Since industrial power supply systems are characterized by: relatively short 110-220 kV lines, high load density and the predominance of open network sections over closed ones. And the existing models of power transmission lines and algorithms of faulty faults are focused on modeling networks of power systems and therefore do not allow to accurately determine the location of the occurrence of a short circuit in the conditions of an industrial power supply system. Therefore, it is important to improve the methods of remote WMD. Existing modeling methods do not provide sufficient accuracy of results in 110-220 kV industrial power supply networks. Therefore, it is relevant to compare the methods for modeling overhead power lines without a ground wire and with one ground wire. Three modeling methods were considered in the work: the method of symmetrical components, the method of calculation using reference data and the method of calculation using the combined equivalent circuit. Each of the considered methods has its own advantages and disadvantages. The presented combined equivalent circuit combines the advantages of the methods of phase coordinates and symmetrical components. This allows you to take into account the asymmetry of the location of the wires, as well as using this method, it is possible to calculate the support of a power transmission line of any configuration and any wires. During the calculation, an analysis was carried out on the example of two supports P110-3V + 4 without a cable and AM110-3F4 with 1 cable with different wire cross-sections. The analysis showed that the combined equivalent circuit is accurate, since when calculating the electrical parameters of power lines of a direct sequence of active and inductive resistances, I coincide with the results obtained with other methods of modeling power transmission lines. The greatest difference in the parameters of a single-circuit transmission line was obtained when using wires with a cross section of 240 mm<sup>2</sup>, the zero-sequence capacitance calculated using the combined equivalent circuit differs from that calculated by other methods by about 2 times.

**Keywords:** power transmission line, single-phase short circuit, power supply system, symmetrical components, phase coordinates, replacement circuit, resistivity, capacitance, damage location determination, lightning protection cable

## REFERENCES

1. Ermakov K.I Modeling in problem of the determination of damaged place on the power transmission lineю *Vestnik Chuvashskogo universiteta* [Vestnik Chuvashskogo universiteta], 2011, no. 3, pp. 67-70.
2. Bychkov Yu.V., Pavlov A.O. Definition of a place of damage to schemes with a multilateral food. *Energetika Tatarstana* [Power industry of Tatarstan], 2011, no. 2(22), pp. 33-38.
3. Kazzaz S.A.S. Al, Ismael I., Mohammed K.K. Fault detection and location of power transmission lines using intelligent distance relay. *Int. J. Power Electron. Drive Syst.* 2020, vol. 11, no. 2, pp. 726-734. doi: 10.11591/ijpeds.v11.i2.pp726-734
4. Kulikov F.A., Kormilitsyna A.M., Ivanov I.E. Analysis of the influence of variations in the parameters of overhead power lines on the accuracy of two-way determination of the fault location. *Elektroenergetika* [Power industry. Fifteenth All-Russian (seventh international) scientific and technical. conference of students, graduate students and young scientists]. Ivanovo, Ivanovo State Power Engineering University, 2020, p. 13.
5. Koshcheev M.I., Slavutskiy A.L., Slavutskiy L.A. Simple neural network algorithms for wave method of fault location in power networks. *Vestnik Chuvashskogo universiteta* [Vestnik Chuvashskogo universiteta], 2019, no. 3, pp. 110-118.
6. Niu G., Xiao T., Pei W., Zhu M., Yan Z., Zhou L., Qi Z., Kong L. Fault analysis of power transmission line in a generalized state-space model perspective. *Proceedings IECON 2017 - 43<sup>rd</sup> Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IEEE.* Pp. 239-243. doi: 10.1109/IECON.2017.8216044. 2017.
7. Sabirova R.R., Luk'yanova I.V., Petukhova O.I., Panova E.A. Longitudinal impedance of a single-circuit power transmission line in phase coordinates to determine the location of damage during single-phase short circuits in a 110 kV network. *Energetiki i metallurgii nastoyashchee i buduyushchie Rossii* [Energy and metallurgy for the present and future of Russia]. Magnitogorsk, NMSTU Publ., 2021, pp. 36-38.
8. Panova E.A. Combined equivalent circuit of a single-circuit power line. *Problemy i perspektivy razvitiya elektroenergetiki i elektrotekhniki: Materialy III Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Problems and prospects for the development of electric power industry and electrical engineering. Proceedings of the OR All-Russian Scientific and Practical Conference], Kazan, Kazan State Power Engineering University Publ., 2021, pp. 48-52.
9. *Rukovodyashchie ukazaniya po releynoy zashchite. Vyp. 11. Raschet tokov korotkogo замыканиya dlya releynoy zashchity i sistemnoy avtomatiki v setyakh 110-750 kV* [Relay protection guidelines. Issue 11. Calculation of short-circuit currents for relay protection and system automation in 110-750 kV networks], Moscow, Energiya Publ., 1979. 152 p.

Панова Е.А., Новиков И.В., Сабирова Р.Р. Сравнительный анализ методов расчета электрических параметров ЛЭП 110-220 кВ без грозотроса и с одним грозотросом // *Электротехнические системы и комплексы.* 2022. № 4(57). С. 36-41. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-4\(57\)-36-41](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-4(57)-36-41)

Panova E.A., Novikov I.V., Sabirova R.R. Comparative Analysis of Models for Calculating Electrical Parameters of 110-220 kV Transmission Lines without a Lightning Rod and with One Lightning Rod. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2022, no. 4(57), pp. 36-41. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-4\(57\)-36-41](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-4(57)-36-41)

<sup>1</sup> Южно-Уральский государственный университет, Челябинск<sup>2</sup> Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова<sup>3</sup> Московский политехнический университет

## СХЕМЫ ПОДКЛЮЧЕНИЯ К СЕТИ МОЩНЫХ РЕКУПЕРАТИВНЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ КЛЕТЕЙ ПРОКАТНЫХ СТАНОВ

Рекуперативные электроприводы переменного тока широко используются в металлургическом прокатном производстве благодаря их надёжности, экономичности и достаточной мощности для поддержания технологического процесса. В этой статье представлен обзор последних достижений в области построения силовых схем подключения к питающей сети данных электроприводов. В статье рассматриваются многопульсные схемы подключения, образованные различными типами трансформаторов, алгоритмы предварительно запрограммированной широтно-импульсной модуляции с удалением выделенных гармонических составляющих трёхуровневых активных выпрямителей напряжения, приводятся результаты практических измерений. Результаты экспериментальных исследований получены в распределительной сети металлургического комбината ЧерМК «Северсталь», имеющей в своём составе мощные электроприводы клетей стана холодной прокатки на базе преобразователей частоты с активными выпрямителями. Оба преобразователя частоты электроприводов клетей имеют одинаковую мощность – 14 МВт. Один преобразователь частоты электропривода реализован по 6-пульсной схеме, а другой по 12-пульсной. Запись мгновенных значений фазного тока трансформаторов, питающих электроприводы стана, осуществлялась с помощью портативного регистратора Flash Recorder и токовых клещей Fluke 43В. Частота дискретизации записываемых сигналов при этом составила 30 кГц. Показаны формы и спектры фазных токов сети в 6- и 12-пульсных схемах на действующем оборудовании, рассчитаны коэффициенты гармонических искажений до 60-й и 150-й гармоники при различных шаблонах предварительно запрограммированной широтно-импульсной модуляции с удалением выделенных гармонических составляющих. Ожидается, что эта статья может дать широкий обзор многопульсных схем подключения главных рекуперативных электроприводов переменного тока клетей прокатных станков, в частности, определить современные решения, которые могут значительно улучшить электромагнитную совместимость с питающей энергосистемой. Представленные результаты могут быть использованы исследователями и инженерами для обеспечения электромагнитной совместимости нелинейных потребителей в аналогичных схемах, а также для их проектирования.

**Ключевые слова:** силовая преобразовательная техника, электропривод, широтно-импульсная модуляция, качество напряжения, многопульсные схемы подключения

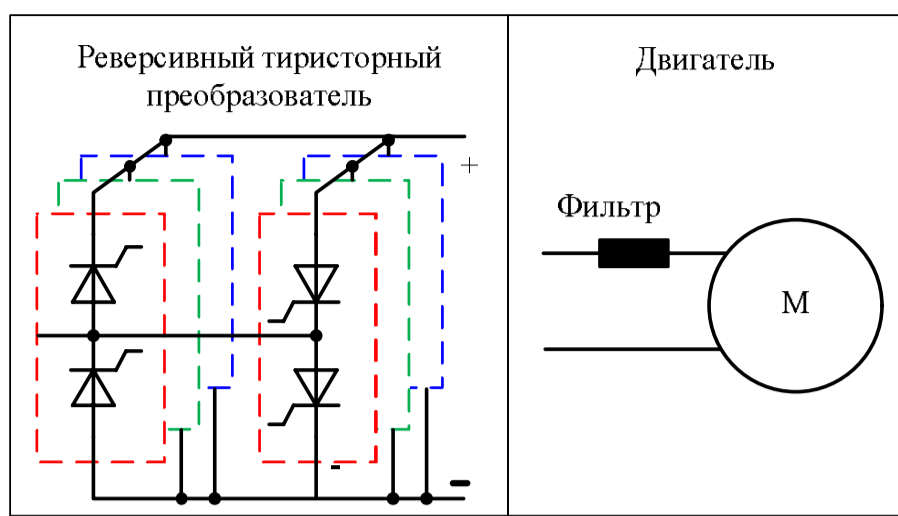
### ВВЕДЕНИЕ

Устойчивое развитие энергосберегающих технологий в промышленности привело к широкому распространению систем силовой преобразовательной техники с возможностью рекуперации электрической энергии для высокомоментных приложений. До середины 20-го века они основывались на полууправляемых тиристорных преобразователях для регулирования электроприводов постоянного и переменного тока (рис. 1, а). Начиная с середины 20-го века и по наше время, им на смену пришли полностью управляемые многоуровневые преобразователи на транзисторах или запираемых тиристорах (рис. 1, б). К настоящему времени большинство всех современных металлургических электроприводов клетей прокатных станков выполняются на основе синхронных или асинхронных двигателей переменного тока и, как правило, активных выпрямителей напряжения (АВН) в составе преобразователей частоты [1–4].

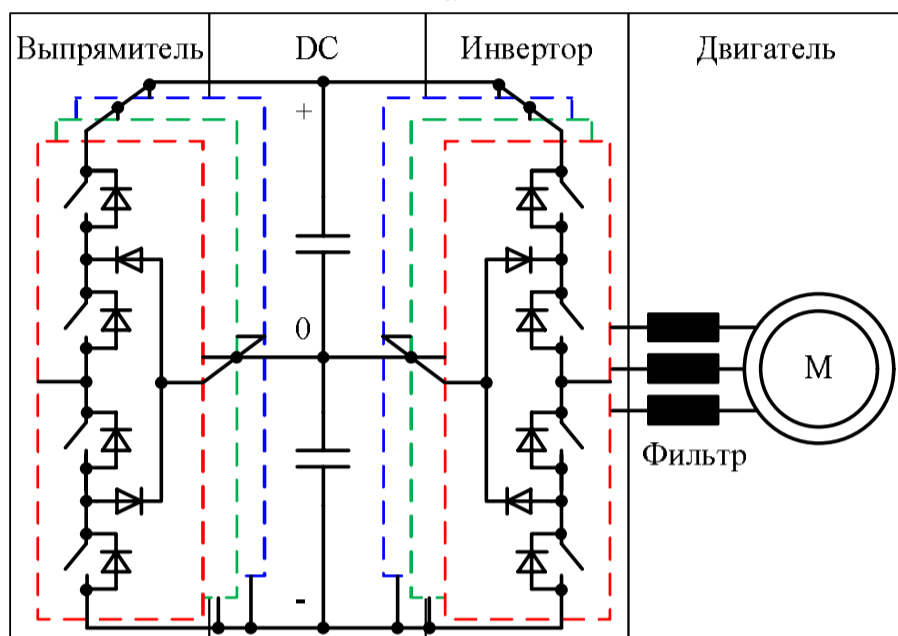
Полупроводниковые модули АВН переключаются с помощью различных алгоритмов широтно-импульсной модуляции (ШИМ), что приводит к несинусоидальности выходного переменного напряжения

и, как следствие, к проблемам обеспечения электромагнитной совместимости между потребителем и источником. Из-за этих проблем введены стандарты и руководства [5–8], на которые должны опираться фирмы-производители оборудования и пользователи. Если индуктивность вторичных обмоток питающих трансформаторов недостаточна для поддержания стабильной работы АВН, то рекомендуются пассивные  $L$ - или  $LC$ -фильтры для дополнительной установки в уже существующие системы со стороны сети. Однако характеристики этих фильтров близки к характеристикам преобразователя частоты, что не только увеличивает их стоимость, но также увеличивает потери и количество компонентов, а это приводит к снижению надёжности системы [9–13].

Коммутационные потери и электромагнитная совместимость с питающей сетью являются наиболее значительными проблемами для главных рекуперативных электроприводов переменного тока (РЭП ПТ) клетей прокатных станков с АВН, номинальные мощности которых достигают десятков мегаватт. Они становятся причинами перегревов или полного выхода из строя электронного оборудования в точке общего подключения к сети. Исследователями и специалистами были разработаны различные способы и методы снижения влияния этих проблем [14–18].



а



б

Рис. 1. Рекуперативные электроприводы клеток прокатных станов: а – устаревшее решение; б – современное решение

Известным подходом повышения качества преобразованной электроэнергии полупроводниковыми преобразователями является разработка многоуровневых топологий. Производители многоуровневых преобразователей рекомендуют их для управления мощными потребителями электрической энергии в диапазоне от десятков до сотен мегаватт [19–22].

Однако, как оказалось, увеличение уровней выходного напряжения преобразователя приводит и к увеличению количества полупроводниковых компонентов, что снижает надежность и эффективность работы преобразователя.

Среди всех многоуровневых топологий наиболее распространённым и компромиссным решением является трёхуровневая топология с диодной фиксацией уровня (с англ. neutral-point-clamped (NPC)) [23], представленная на рис. 2.

Суммарное напряжение звена постоянного тока  $U_{dc}$  преобразователя с диодной фиксацией уровня распределяется в равном соотношении по эквивалентным ёмкостям звена постоянного тока  $C_1, C_2$ . Положительный и отрицательный уровни напряжения на входе преобразователя  $U_{an}$  формируются при протекании тока через два последовательно соединённых полупроводниковых модуля  $S_{1a}, S_{2a}$  или  $\bar{S}_{1a}, \bar{S}_{2a}$ , которыми могут быть либо полностью управляемые ключи, либо диоды. Нулевой (третий) уровень напряжения внутренней ЭДС преобразователя  $U_{an}$  формируется при протекании тока через полностью управляемые ключи  $S_{1a}$  или  $\bar{S}_{2a}$  и фиксирующие диоды  $D_{1a}$  или  $D_{2a}$ .

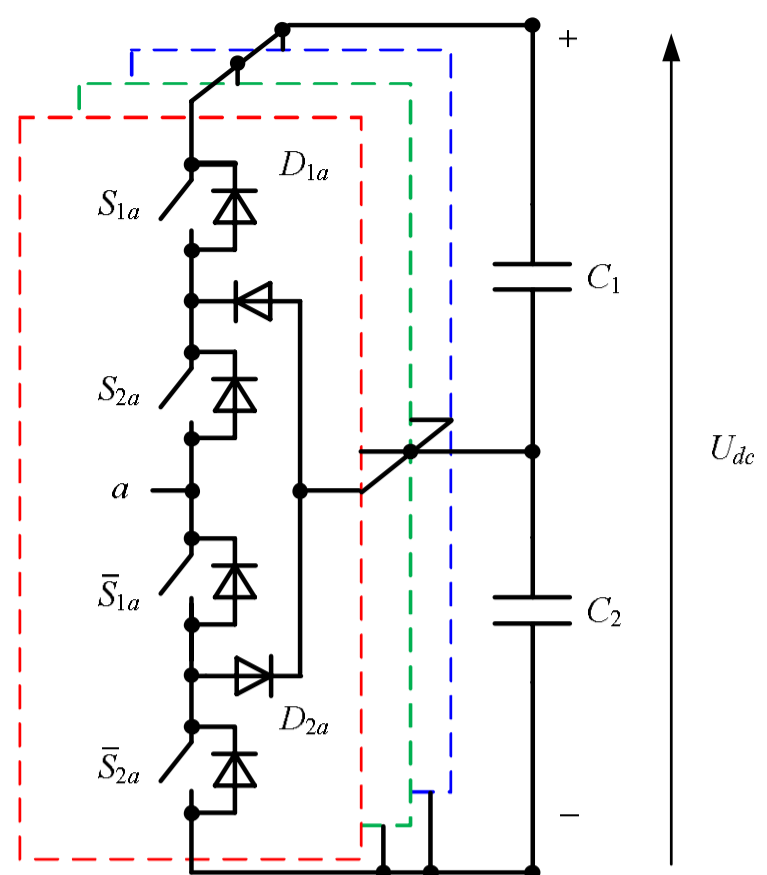


Рис. 2. Фазная стойка трёхуровневого преобразователя с диодной фиксацией уровня

Следующим способом снижения негативного влияния полупроводниковых преобразователей является выбор оптимального алгоритма ШИМ. Предварительно запрограммированная ШИМ (ПЗШИМ) была определена основным методом ШИМ для АВН в составе преобразователей частоты главных РЭП ПТ клетей прокатных станов на основе анализа достаточного количества научной литературы и опыта научно-исследовательской работы на реальных производственных объектах. Алгоритмы ПЗШИМ переключают полупроводниковые модули АВН по предварительно рассчитанным последовательностям переключений, формируя сигнал внутренней ЭДС АВН с требуемыми показателями качества. С момента своего появления ПЗШИМ вызвала огромный исследовательский интерес для управления переключением полупроводниковых ключей высокомоощных АВН на низких частотах в диапазоне от 150 до 450 Гц. Низкая коммутационная способность является следствием ограниченных возможностей полупроводниковой базы в области номинальных мощностей свыше мегаватта. Повышение частоты переключения приводит к перегреву полупроводниковых модулей, что, как следствие, требует дополнительного усиленного охлаждения, существенно снижая эффективность и надежность работы преобразователя [24–26].

Последним эффективным методом уменьшения отрицательного влияния работы силовых полупроводниковых преобразователей на показатели качества питающего напряжения, в частности на коэффициент гармонических искажений (КГИ) и коэффициенты отдельных гармонических составляющих напряжений и токов, является использование многопульсных схем подключения к питающей сети. Многопульсные схемы решают сразу две важные задачи: наращивают суммарные мощности системы и улучшают электромагнитную совместимость. Трансформаторы являются основными компонентами многопульсных схем. В 2007 году Сингх и др. [27] провели всесторонний обзор

многопульсных схем, охватывающих большое количество конфигураций трансформаторов. В 2020 году Jie Chen и др. [28] актуализировали этот обзор, сконцентрировав внимание для применения схем подключений к сети на основе многообмоточных трансформаторов для различных типов летательных аппаратов. Тем не менее в опубликованных обзорных статьях основное внимание уделялось только однонаправленным преобразователям малой мощности на основе диодных выпрямителей и уже морально устаревшим двунаправленным тиристорным преобразователям. Многие из рассмотренных технических решений не используются для силовых схем подключения к питающей сети главных РЭП ПТ клетей прокатных станов. Что еще более важно, в современных системах электропривода следует рассматривать не только достоинства той или иной многопульсной схемы подключения или характеристики многообмоточного трансформатора, а сразу несколько факторов, связанных с выбором топологии преобразователей, методов ШИМ и параметров питающей энергосистемы. Подобным комплексным исследованиям недостаточно уделяется внимание в научной литературе.

Основная цель статьи – дать обзор последних достижений в области построения силовых схем подключения к питающей сети главных РЭП ПТ прокатных станов. В данной статье будут представлены 6-, 12- и 18-пульсные схемы подключения к питающей сети и технологии, применимые в данных решениях. Более сорока статей [1–46] были проанализированы в области топологий построения высокоомощных преобразователей, методов и алгоритмов ШИМ, многопульсных схем подключения. Несмотря на то, что основная цель работы сосредоточена только на используемых в РЭП

ПТ схемах для прокатных станов, результаты также подойдут для других систем автоматизированного электропривода переменного тока, статических компенсаторов реактивной мощности, гибких систем передачи переменного тока и высоковольтных линий электропередач постоянного тока. Представленные результаты могут быть использованы исследователями и инженерами для обеспечения электромагнитной совместимости нелинейных потребителей в аналогичных схемах и для их проектирования.

СИЛОВЫЕ СХЕМЫ ГЛАВНЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ КЛЕТЕЙ ПРОКАТНЫХ СТАНОВ

Первыми в данном разделе будут рассмотрены 6-пульсные схемы (рис. 3), применяющиеся для главных электроприводов сортового проволочного стана и стана холодной прокатки 1700. Они являются наиболее простыми, состоят из однообмоточного трансформатора, двунаправленного преобразователя частоты с АВН, выполненного по трёхуровневой топологии с диодной фиксацией уровня, выходного *L*-фильтра и приводного двигателя переменного тока [29–33]. Обмотки трансформаторов имеют нулевой сдвиг между первичными и вторичными напряжениями и соединяются по типам звезда/звезда (см. рис. 3, а) или треугольник/треугольник (см. рис. 3, б). 6-пульсная схема имеет значимыми коэффициенты  $6n \pm 1$  (*n* – любое положительное целое число) гармонических составляющих потребляемого тока. ПЗШИМ с частотой 350 Гц обычно применяется для АВН, но при усиленном охлаждении возможно повысить частоту до 450 Гц. Основные технические характеристики рассматриваемой схемы подключения представлены в таблице.

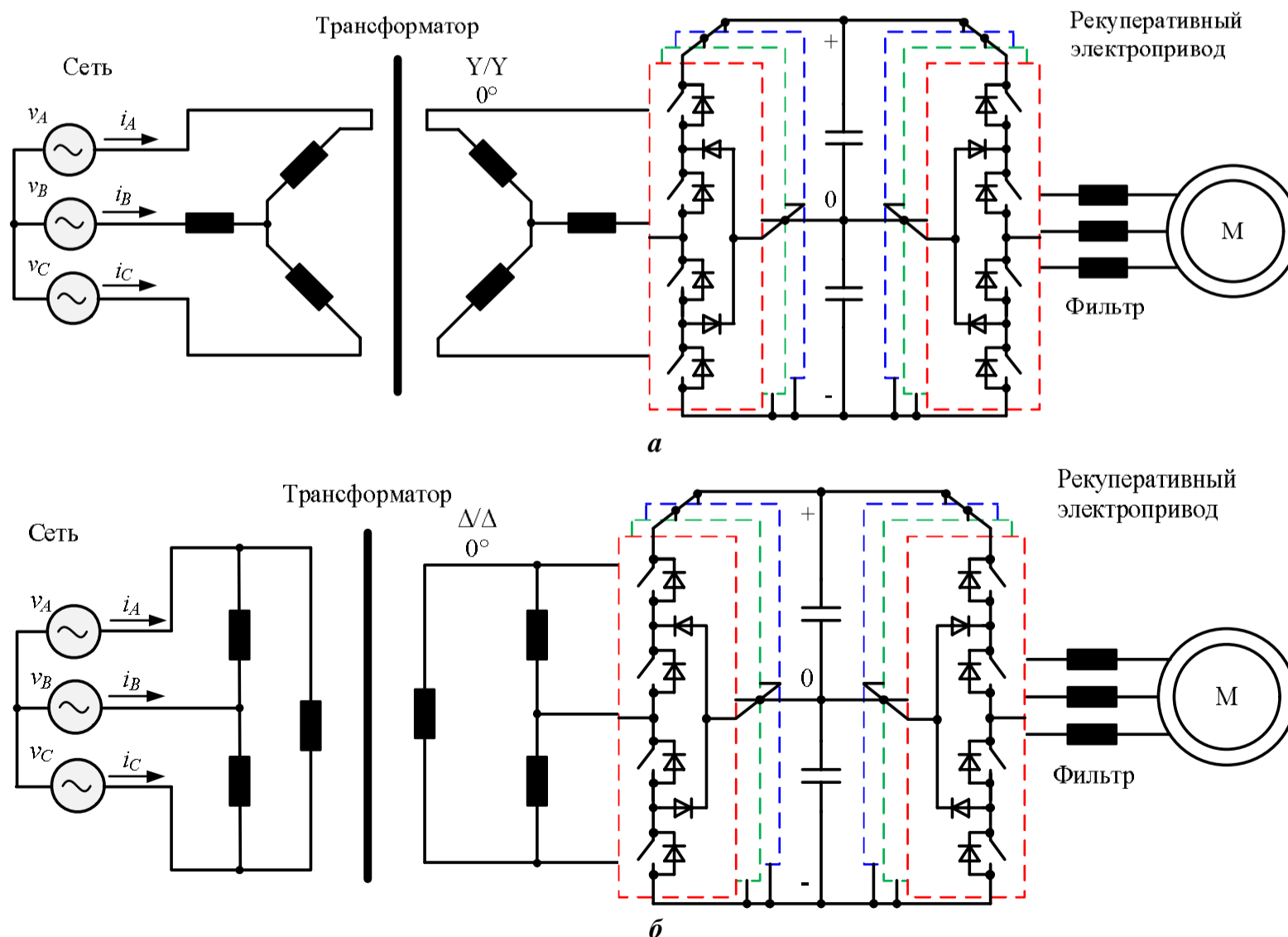


Рис. 3. 6-пульсные схемы подключения к питающей сети главных РЭП ПТ клетей прокатных станов: а – стан холодной прокатки; б – сортовой волочильный стан

Основные технические данные схем подключения к питающей сети главных РЭП ПТ клетей прокатных станов

Номер рисунка	Мощность электропривода, кВт	Мощность трансформаторов, кВА	Схемы соединения обмоток трансформаторов	Напряжения трансформаторов, кВ	Средняя частота ПЗШИМ, Гц
Рис. 3, а	12000	12000	Y/Y	10 / 3,3	250-350
Рис. 3, б	14000	14000	Δ/Δ		
Рис. 4	14000	14000	Y/Δ-Y		
Рис. 6	18000	20000	Δ/Δ; Δ/Δ; Δ/Δ		
Рис. 7	18000	18000	Y/Δ-Зигзаг-Зигзаг		

Следующими наиболее часто встречаемыми схемами являются 12-пульсные. На **рис. 4** показаны схемы подключения к питающей сети главных электроприводов клетей стана 2000 холодной прокатки и стана 1750 горячей прокатки. 12-пульсная схема имеет значимыми только коэффициенты  $12n \pm 1$  гармонических составляющих потребляемого тока. Это достигается благодаря использованию фазосдвигающего трансформатора с последовательным соединением первичных обмоток [34-37]. Одну вторичную обмотку такого трансформатора соединяют звездой, а другую – треугольником, создавая тем самым сдвиг вторичных напряжений на  $30^\circ$ . Вторичные обмотки подключаются к отдельным АВН, работающим с ПЗШИМ на частоте 250-350 Гц.

Основным требованием для подавления гармоник в 12-пульсной схеме является сбалансированная нагрузка двух АВН. В этом случае коэффициенты  $12n \pm 1$  генерируемых АВН гармоник будут иметь одинаковую амплитуду и подавляться благодаря трансформаторам. Это снижает требования к дополнительной фильтрации потребляемого тока по сравнению с 6-пульсной схемой. Из особенностей схемы можно отметить следующее (см. **рис. 4**): 1) фазовый сдвиг вторичных напряжений на  $30^\circ$  образуется в двух независимых магнитных системах трансформатора, что позволяет снизить электрические потери в магнитопроводе; 2) звено по-

стоянного тока двух преобразователей частоты объединено, что позволяет поддерживать заданный уровень в общей шине DC при отключении транзисторов одного из АВН; 3) последовательное соединение первичных обмоток фазосдвигающего трансформатора позволяет разделить между ними поровну напряжение сети. Основные технические характеристики схемы представлены в **таблице**.

На **рис. 5** показаны 12-пульсные схемы, которые также можно встретить в металлургическом прокатном производстве [38–41]. Схема на **рис. 5, а** строится на основе одного многообмоточного трансформатора, вторичные обмотки которого со сдвигом  $30^\circ$  подключаются к двум АВН. Единая магнитная система трансформатора, в которой из-за смещения гармонических составляющих образуются дополнительные потери в магнитопроводящей стали, является существенным недостатком данной схемы по сравнению со схемой на **рис. 4**. Другой вариант 12-пульсной схемы на **рис. 5, б** выполнен на основе параллельного соединения двух однообмоточных трансформаторов, вторичные обмотки которых подключаются к двум АВН. Данная схема имеет другой существенный недостаток по сравнению с предыдущими – это более высокие стоимостные и массогабаритные показатели трансформаторов.

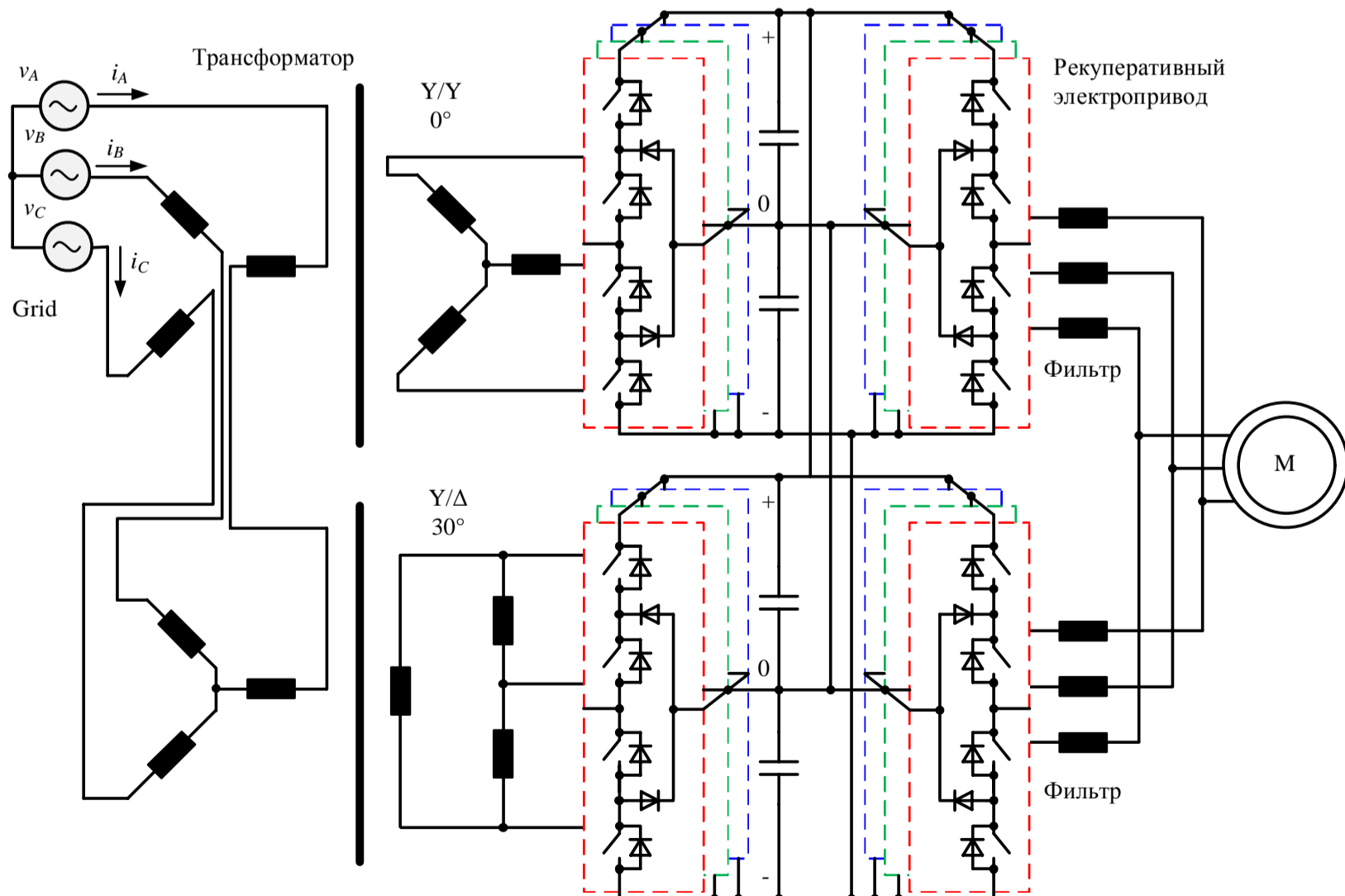


Рис. 4. 12-пульсная схема подключения на основе фазосдвигающего трансформатора с последовательным соединением первичных обмоток

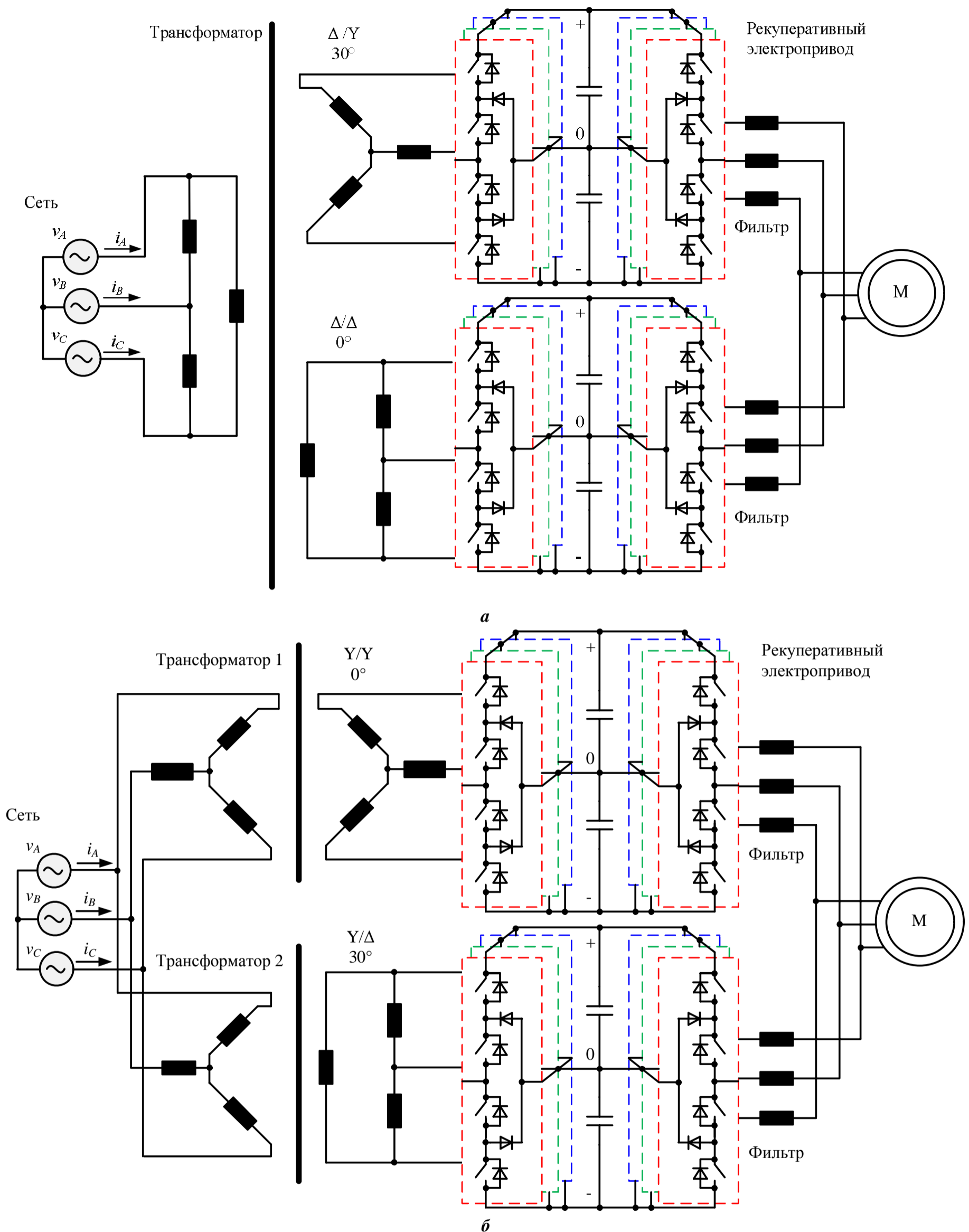


Рис. 5. 12-пульсные схемы на основе многообмоточного фазосдвигающего трансформатора (а) и параллельного соединения двух однообмоточных трансформаторов (б)

Последним популярным вариантом является 18-пульсная схема подключения. На рис. 6 она показана на примере главного электропривода прокатной клетки толстолистого стана горячей прокатки 5000. 18-пульсная схема построена на основе параллельного соединения трёх трансформаторов со сдвигами вторичных напряжений на  $0, 20$  и  $-20^\circ$ , что позволяет по-

давить все коэффициенты гармонических составляющих тока, кроме  $18n \pm 1$  [42–46]. Следовательно, 18-пульсные схемы обладают лучшим качеством потребляемого сетевого тока, чем 6- и 12-пульсные. Вторичные обмотки трансформаторов 18-пульсной схемы подключаются к трём АВН, работающим с ПЗШИМ на частоте 250 Гц.



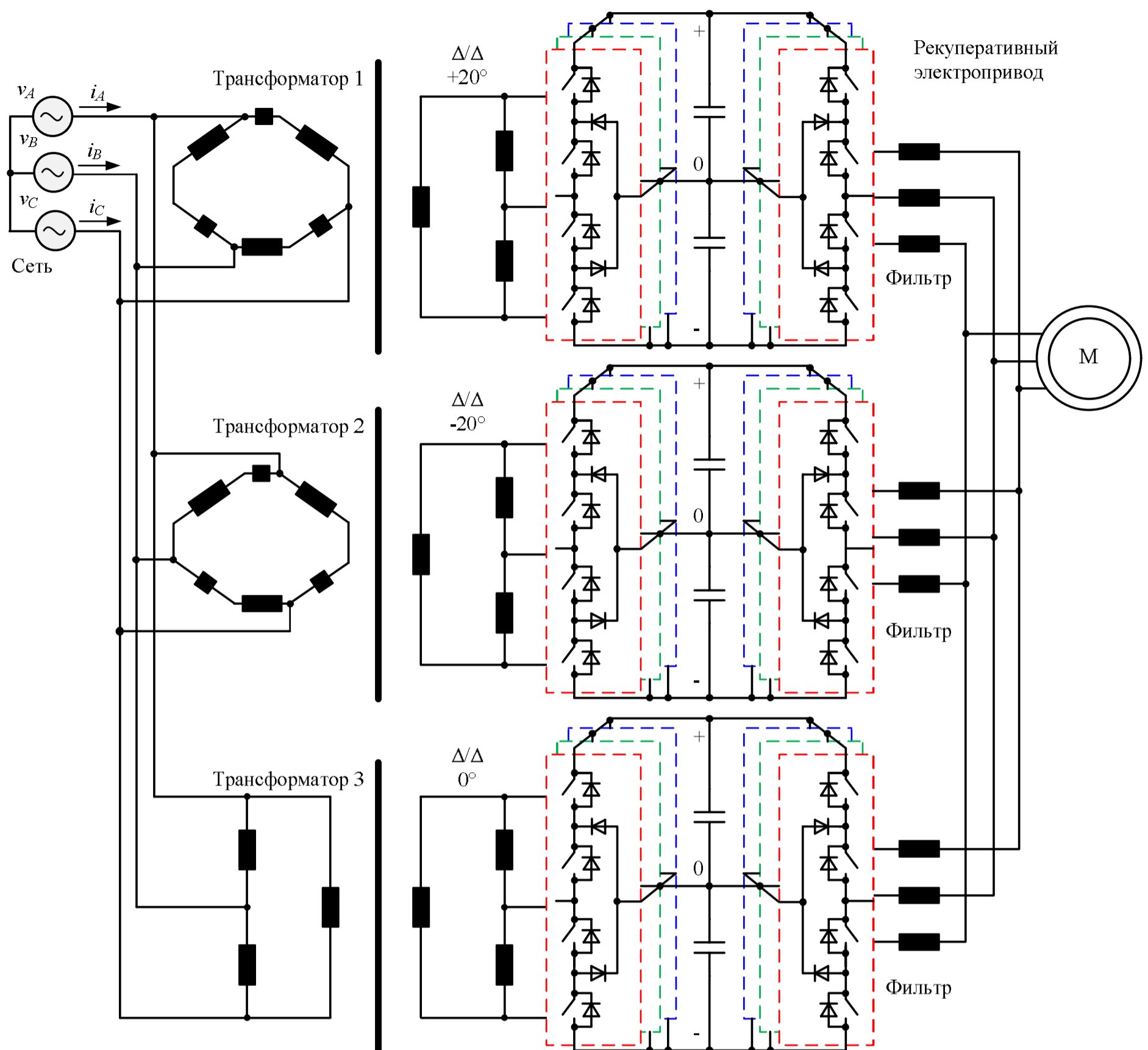


Рис. 6. 18-пульсная схема подключения к питающей сети на основе параллельного соединения трёх трансформаторов

Сдвиг векторов первичного напряжения относительно векторов вторичного напряжения первых гармоник на  $\pm 20^\circ$  получается путем соединения первичных обмоток трансформаторов многоугольниками с разделением на две секции и электрическом соединении этих секций таким образом, чтобы созданные дополнительные магнитные потоки фаз были направлены встречно.

Соотношение между секциями первичной обмотки получается следующее: на большую часть приходится 65%, а на меньшую – 35% от общего количества витков. Полное подавление гармоник в 18-пульсной схеме возможно только при сбалансированной нагрузке трёх АВН. По сравнению с 6- и 12-пульсными схемами требования к дополнительной фильтрации снижаются ещё больше. Основные технические характеристики схемы на рис. 6 представлены в таблице, а к её особенностям можно отнести следующее: 1) независимые магнитные системы трёх трансформаторов позволяют снизить потери в магнитопроводах; 2) электропривод может временно про-

должить работу на двух из трёх АВН.

На рис. 7 показана 18-пульсная схема подключения главных электроприводов прокатных клетей стана холодной прокатки 2000. Основные технические характеристики схемы подключения представлены в таблице. Данная 18-пульсная схема построена на основе одного многообмоточного фазосдвигающего трансформатора с последовательным соединением первичных обмоток. Сдвиг вторичных напряжений трансформатора на  $\pm 20^\circ$  образуется с помощью соединения вторичных обмоток трансформатора зигзагом. Из особенностей схемы на рис. 7 можно отметить следующее: 1) звено постоянного тока объединено и используется для питания сразу четырёх электроприводов посредством подключения к нескольким инверторам напряжения, обеспечивая при этом эффект 18-пульсной схемы для питания каждого двигателя; 2) последовательное соединение первичных обмоток фазосдвигающего трансформатора позволяет разделить между ними поровну напряжение сети.

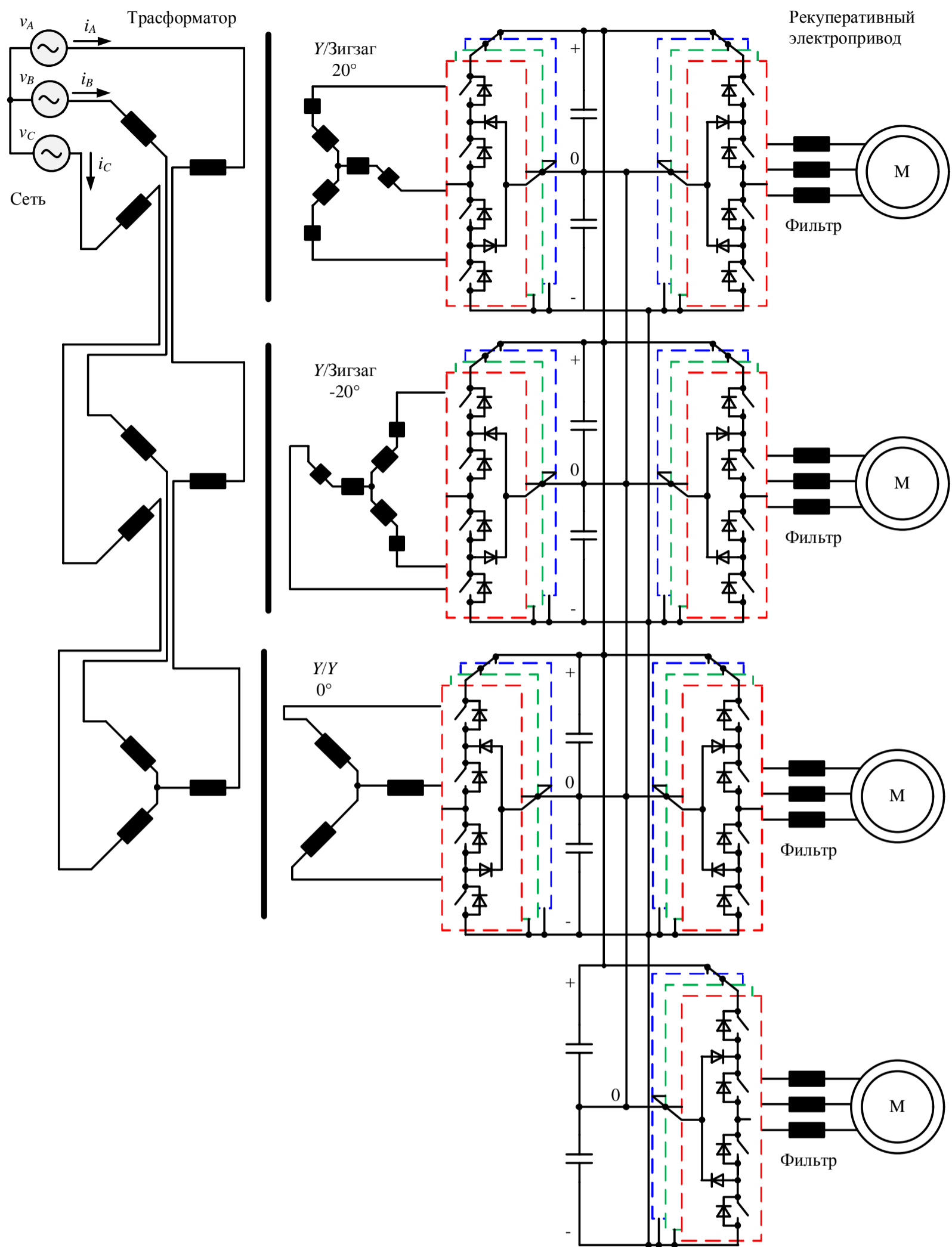


Рис. 7. 18-пульсная схема подключения к питающей сети главного электропривода клетки стана 2000 холодной прокатки на основе одного фазосдвигающего трансформатора с последовательным соединением первичных обмоток

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ  
НА ДЕЙСТВУЮЩЕМ ОБОРУДОВАНИИ

Результаты экспериментальных исследований получены в распределительной сети металлургического комбината ЧерМК «Северсталь», имеющей в своём составе мощные электроприводы клеток №1 и 2 стана холодной прокатки на базе преобразователей частоты с активными выпрямителями.

Оба преобразователя частоты электроприводов клеток №1 и 2 имеют одинаковую мощность – 14 МВт. Преобразователь частоты электропривода клетки №1 реализован по 6-пульсной схеме, а клетки №2 – 12-

пульсной. Запись мгновенных значений фазного тока трансформаторов, питающих электроприводы стана, осуществлялась с помощью портативного регистратора Flash Recorder и токовых клещей Fluke 43B. Частота дискретизации записываемых сигналов при этом составила 30 кГц.

На рис. 8 и 9 приведены мгновенные значения фазных токов, потребляемых из сети при подключении по 6- и 12-пульсной схемам, а также их спектры с указанием значений THD, рассчитанных для частотного диапазона от 0 до 3000 Гц (до 60-й гармоники).

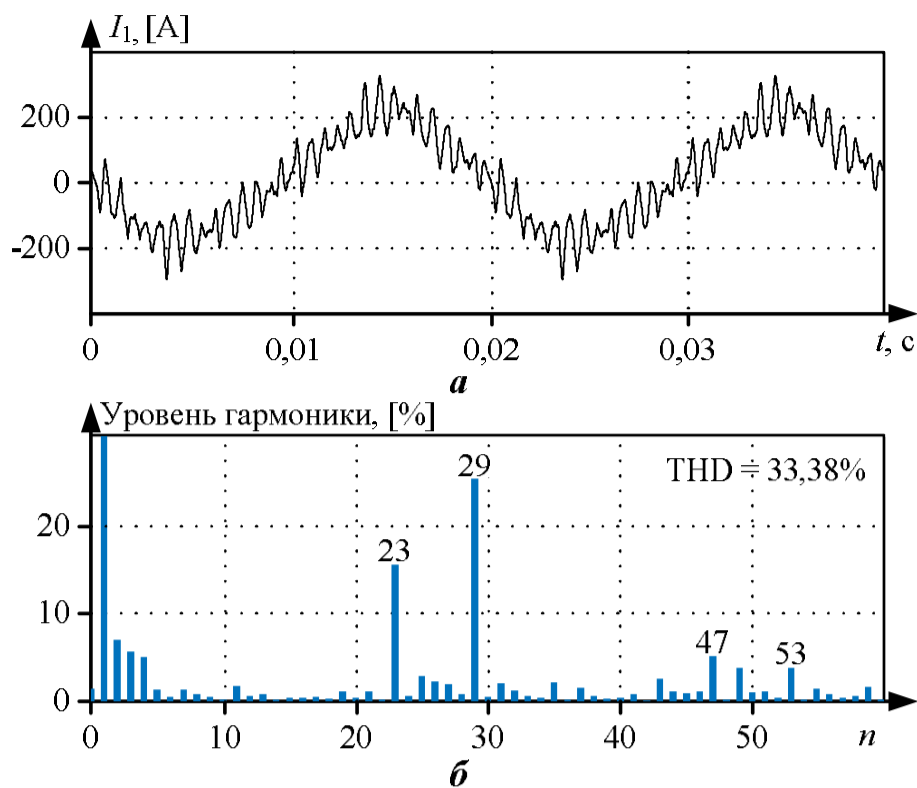


Рис. 8. Экспериментальные измерения фазного тока и его спектра в 6-пульсной схеме подключения к сети при ПЗШИМ с УВГ при удалении 5, 7, 11, 13, 17 и 19-й гармоник

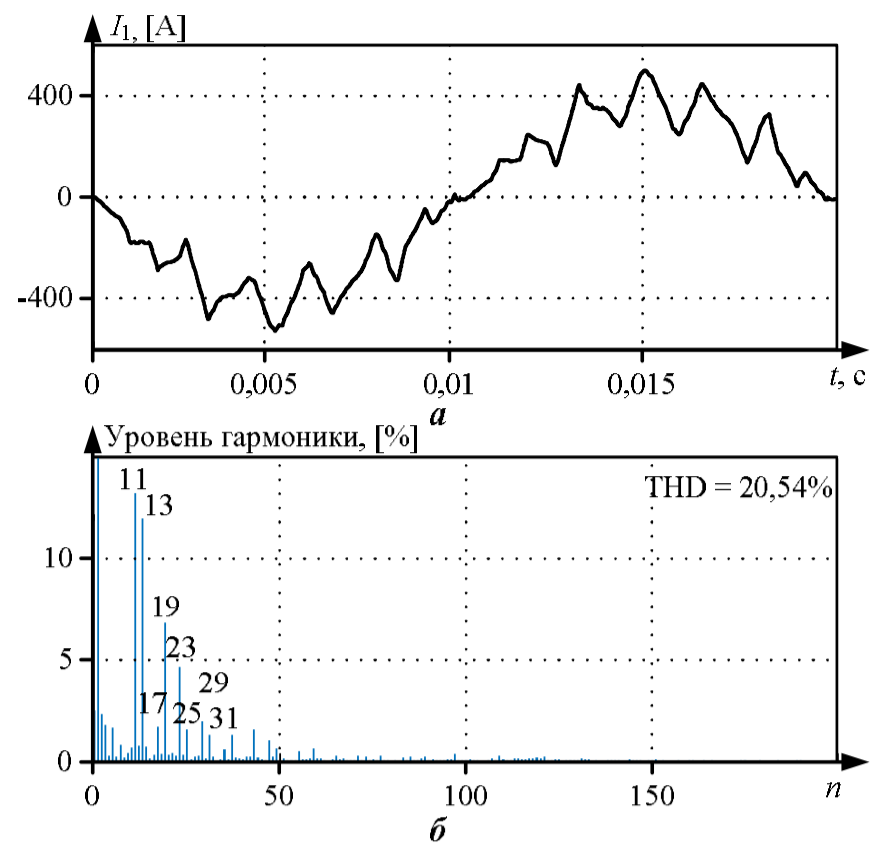


Рис. 10. Экспериментальные измерения фазного тока и его спектра в 6-пульсной схеме подключения к сети при ПЗШИМ с УВГ при удалении 5-й, 7-й гармоник

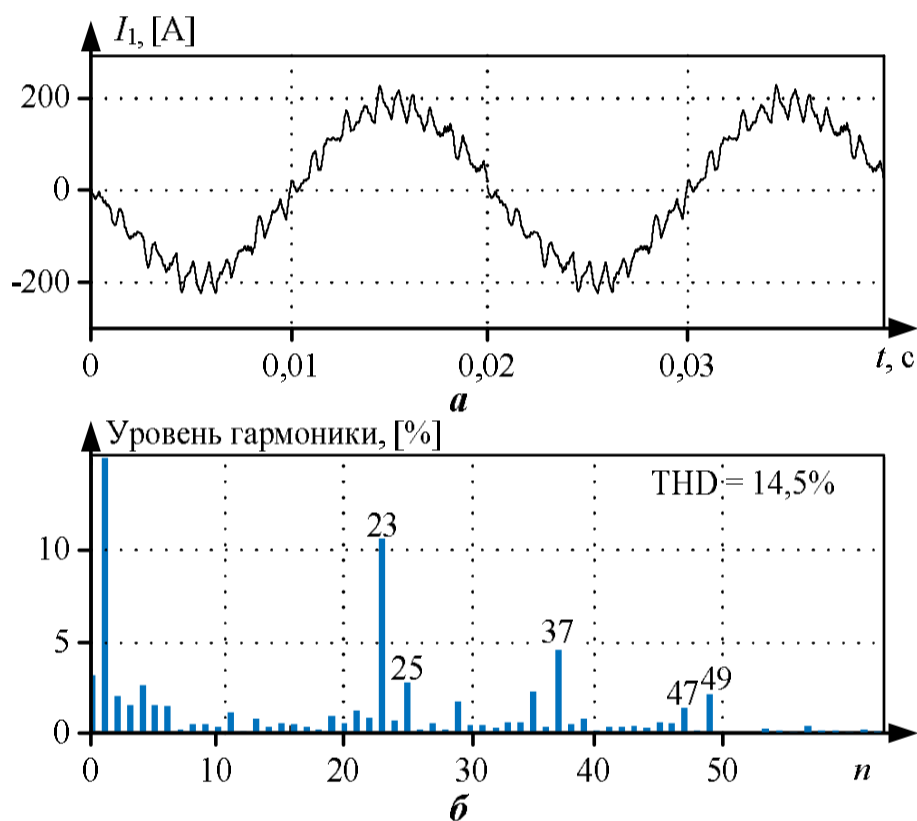


Рис. 9. Экспериментальные измерения фазного тока и его спектра в 12-пульсной схеме подключения к сети при ПЗШИМ с УВГ при удалении 5, 7, 11 и 13-й гармоник

На рис. 8 можно увидеть, что значение измеренного THD тока сети в 6-пульсной схеме при ПЗШИМ с УВГ при удалении 5, 7, 11, 13, 17 и 19-й гармоник составляет 33,38%, что почти в три раза хуже, чем в 12-пульсной схеме при удалении 5, 7, 11 и 13-й гармоник, как показано на рис. 9 (14,5%).

На рис. 10 и 11 представлены осциллограммы фазных токов, потребляемых электроприводами в более нагруженном режиме. Частота коммутации силовых ключей в первом случае при 6-пульсной схеме составляет всего 150 Гц, удалению подлежат 5-я и 7-я гармоники. В гармоническом спектре потребляемого тока присутствуют значимые гармоники с номерами 11, 13, 17, 19, 23, 25, 29, 31 (см. рис. 10).

Величина THD составила 20,54 % при величине первой гармоники тока в 396,5 А.

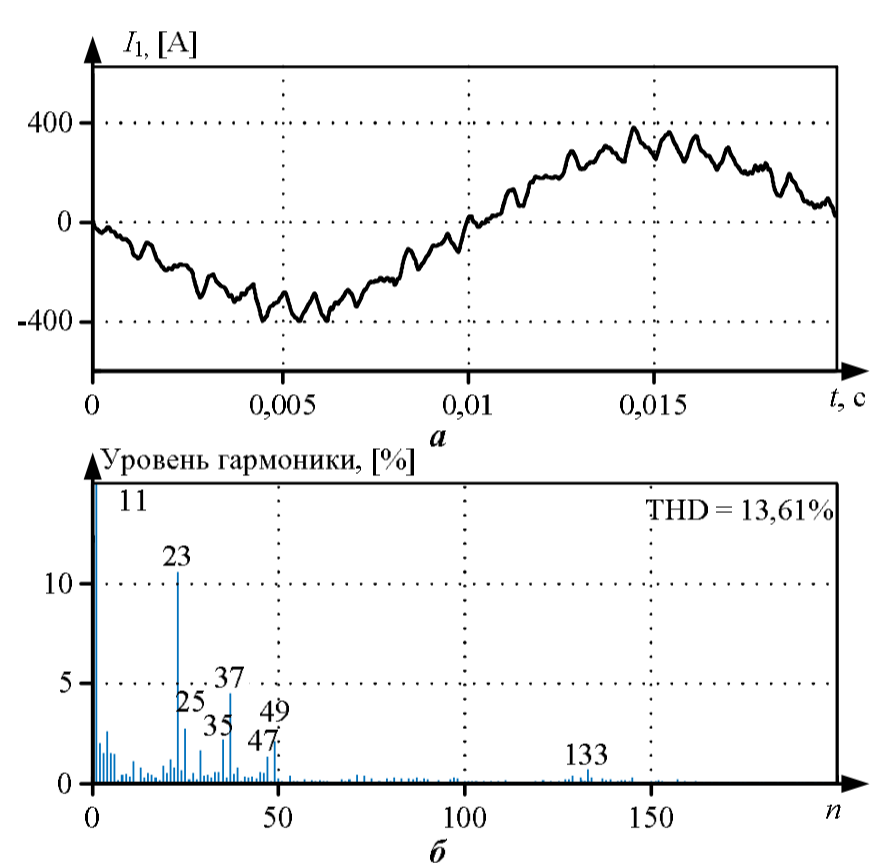


Рис. 11. Экспериментальные измерения фазного тока и его спектра в 12-пульсной схеме подключения к сети при ПЗШИМ с УВГ при удалении 5, 7, 11, 13, 17, 19-й гармоник

Во втором случае для 12-пульсной схемы из-за меньшей величины тока IГСТ-тиристоров их допустимая частота коммутации с учётом теплового баланса выше и составила 350 Гц. Применяется ПЗШИМ с УВГ при удалении 5, 7, 11, 13, 17, 19-й гармоник. Величина THD достигла 13,61% при величине первой гармоники тока в 322,2 А (см. рис. 11). В гармоническом спектре потребляемого тока на значимом уровне присутствуют 23, 25, 35, 37, 47, 49-я гармоники.

Соответственно, в состав преобразователя частоты электропривода клетки №2 включены два активных выпрямителя и ток, протекающий через IГСТ-тиристоры, в их плечах в два раза ниже, чем ток активного выпрямителя преобразователя частоты электропривода клетки №1 при одинаковой нагрузке. В обоих случаях в активных выпрямителях применяется ПЗШИМ с УВГ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье приводится обзор наиболее часто используемых схем подключения к питающей сети главных РЭП ПТ клетей прокатных станков. Представлены их достоинства и недостатки, основные компоненты и их характеристики, алгоритмы ПЗШИМ с УВГ трёхуровневых АВН. Было показано, что при построении рассматриваемых силовых схем следует обязательно брать во внимание топологии преобразователей и алгоритмы ПЗШИМ с УВГ.

Наглядно показаны результаты сравнения 6-, 12-пульсных схем подключения мощных РЭП ПТ с алгоритмами ПЗШИМ с УВГ трёхуровневых АВН. Результаты могут быть использованы для оптимального выбора схемы подключения и алгоритма.

Представленные результаты могут быть использованы исследователями и инженерами для проектирования или проведения идентичных исследований в других схемах для обеспечения электромагнитной совместимости нелинейных потребителей.

**Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-29-20070), <https://rscf.ru/project/22-29-20070/>.**

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Recent advances and industrial applications of multilevel converters / S. Kouro, M. Malinowski, K. Gopakumar, J. Pou, L.G. Franquelo, B. Wu, J. Rodriguez, M.A. Pérez, J.I. Leon // *Ind. Electron. IEEE Trans.* 2010. Vol. 57. Pp. 2553-2580. doi: 10.1109/TIE.2010.2049719
- Medium-voltage drives: challenges and existing technology / H. Abu-Rub, S. Bayhan, S. Moinoddin, M. Malinowski, J. Guzinski // *IEEE Power Electron. Mag.* 2016. Vol. 3. Pp. 29-41. doi: 10.1109/MPEL.2016.2551802
- Design and control of digital DC drives in steel rolling mills / D. Rajesh, D. Ravikumar, S.K. Bharadwaj, B.K.S. Vastav // 2016 International Conference on Inventive Computation Technologies (ICICT), 2016. Pp. 1-5. doi: 10.1109/INVENTIVE.2016.7830095
- Medium voltage drives-challenges and requirements / H. Abu-Rub, A. Lewicki, A. Iqbal, J. Guzinski // 2010 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2010. Pp. 1372-1377. doi: 10.1109/ISIE.2010.5637205
- IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems. IEEE Std. 519-1992, 1993. Pp. 1-112. doi: 10.1109/IEEESTD.1993.114370.
- IEEE Guide for Application and Specification of Harmonic Filters. IEEE Std. 1531-2003, 2003. Pp. 1-66. doi: 10.1109/IEEESTD.2003.94407
- Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems. Std. EN 50160, 2001.
- Power Quality Measurement Methods. IEC 61000-3-2, 2000.
- Powering the future of industry: high-power adjustable speed drive topologies / S. Kouro, J. Rodriguez, B. Wu, S. Bernet, M. Perez // *IEEE Ind. Appl. Mag.*, 2012. № 18. Pp. 26-39. doi: 10.1109/MIAS.2012.2192231
- Jing T., Maklakov A.S. A review of voltage source converters for energy applications // 2018 International Ural Conference on Green Energy (UralCon). Chelyabinsk, Russia, 2018. Pp. 275-281. doi: 10.1109/URALCON.2018.8544364.
- Bose B.K. *Modern Power Electronics and AC Drives*. Prentice Hall PTR: Hoboken, NJ, USA, 2002. 736 p.
- Multilevel converters: An enabling technology for high-power applications / J. Rodriguez, L.G. Franquelo, S. Kouro, J.I. Leon, R.C. Portillo, M.A.M. Prats, M.A. Perez // *Proc. IEEE*. 2009. № 97. Pp. 1786-1817. doi: 10.1109/JPROC.2009.2030235
- Wang L. *Modeling and Control of Sustainable Power Systems: Towards Smarter and Greener Electric Grids*. Springer: Hoboken, NJ, USA, 2012. 367 p. doi: 10.1007/978-3-642-22904-6
- Моделирование электротехнических комплексов металлургических предприятий: учебное пособие / Корнилов Г.П., Николаев А.А., Храмшин Т.Р., Мурзиков А.А. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2012. 237 с.
- Multilevel inverters: a literature survey on topologies and control strategies / N. Mittal, B. Singh, S.P. Singh, R. Dixit, D. Kumar // 2012 2nd International Conference on Power, Control and Embedded Systems. Allahabad, India, 2012. Pp. 1-11. doi: 10.1109/ICPCES.2012.6508041
- Multilevel voltage-source-converter for industrial medium-voltage drives / J. Rodriguez, S. Bernet, B. Wu, J.O. Pontt, S. Kouro // *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2007. Vol. 54. Pp. 2930-2945. doi: 10.1109/TIE.2007.907044.
- The age of multilevel converters arrives / L.G. Franquelo, J. Rodriguez, J.I. Leon, S. Kouro, R. Portillo, M.A.M. Prats // *IEEE Ind. Electron. Mag.* 2008. № 2. Pp. 28-39. doi: 10.1109/MIE.2008.923519
- An effective control technique for medium-voltage high-power induction motor fed by cascaded neutral-point-clamped inverter / B. Ge, F.Z. Peng, B. Wu, A.T. de Almeida, H. Abu-Rub // *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2010. № 57. Pp. 2659-2668. doi: 10.1109/TIE.2009.2026761
- Ewanchuk J., Salmon J., Vafakhah, B. A five-/nine-level twelve-switch neutral-point-clamped inverter for high-speed electric drives // *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2011. Vol. 47(5). Pp. 2145-2153. doi: 10.1109/TIA.2011.2161857
- Bernet S. State of the art and developments of medium voltage converters – An overview // *Prz. Elektrotechniczny*. 2006. Vol. 82. Pp. 1-10.
- Mohammed S.A., Abdel-Moamen M.A., Hasanin B. A review of the state-of-the-art of power electronics for power system applications // *Int. J. Electron. Commun. Eng. Res.* 2013. Vol. 1. Pp. 43-52.
- Fazel S.S. Investigation and comparison of multi-level converters for medium voltage applications: doctoral thesis / Fazel Seyed Saeed. Berlin, 2007. doi: 10.14279/depositonce-1678
- Nabae A., Takahashi I., Akagi H. New neutral-point-clamped PWM inverter // *IEEE Trans. Ind. Appl.* 1981. Vol. IA-17. Pp. 518-523.
- Leon J.I., Vazquez S., Franquelo L.G. Multilevel converters: Control and modulation techniques for their operation and industrial applications // *Proc. IEEE*. 2017. Vol. 105. Pp. 2066-2081. doi: 10.1109/JPROC.2017.2726583
- Medium-voltage multilevel converters – State of the art, challenges, and requirements in industrial applications / H. Abu-Rub, J. Holtz, J. Rodriguez, B. Ge // *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2010. Vol. 57(8). Pp. 2581-2596. doi: 10.1109/TIE.2010.2043039
- Wu B., Narimani M. *High-power converters and AC drives*. Wiley-IEEE Press: Hoboken, NJ, USA, 2017. 480 p.
- Multipulse AC-DC converters for improving power quality: a review / B. Singh, S. Gairola, B.N. Singh, A. Chandra, K. Al-Haddad // *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2008. Vol. 23(1). Pp. 260-281. doi: 10.1109/TPEL.2007.911880
- Evaluation on the autoconfigured multipulse AC/DC rectifiers and their application in more electric aircrafts / J. Chen, Y. Shen, J. Chen, H. Bai, C. Gong and F. Wang // *IEEE Transactions on Transportation Electrification*. 2020. Vol. 6(4). Pp. 1721-1739. doi: 10.1109/TTE.2020.2983858
- Nikolaev A.A., Bulanov M.V., Shakhbieva K.A. Quality improvement of electric power in the intra-factory electric networks through the use of PWM algorithm selective harmonic mitigation // 2020 Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (PEAMI). Magnitogorsk, 2020. Pp. 26-31. doi: 10.1109/PEAMI49900.2020.9234357

30. Large capacity high performance 3-level GTO inverter system for steel main rolling mill drives / H. Okayama, R. Uchida, M. Koyama, S. Mizoguchi, S. Tamai // IAS '96. Conference Record of the 1996 IEEE Industry Applications Conference Thirty-First IAS Annual Meeting. 1996. Vol. 1. Pp. 174-179. doi: 10.1109/IAS.1996.557012
31. Design of high-reliable converters for medium-voltage rolling mills systems / V. de Nazareth Ferreira, A.F. Cupertino, H.A. Pereira, A.V. Rocha, S.I. Seleme, B. de Jesus Cardoso Filho // 2017 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting. 2017. Pp. 1-9. doi: 10.1109/IAS.2017.8101826
32. Bocker J., Janning J., Jebenstreit H. High dynamic control of a three-level voltage-source-converter drive for a main strip mill // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2002. Vol. 49(5). Pp. 1081-1092. doi: 10.1109/TIE.2002.803220
33. Safaeian M., Jalilvand A., Taheri A. A MRAS based model predictive control for multi-leg based multi-drive system used in hot rolling mill applications // IEEE Access. 2020. Vol. 8. Pp. 215493-215504. doi: 10.1109/ACCESS.2020.3041310
34. Radionov A.A., Maklakov A.S., Gasiyarov V.R. Smart Grid for main electric drive of plate mill rolling stand // 2014 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS). 2014. Pp. 1-4. doi: 10.1109/MEACS.2014.6986842
35. Network-friendly low-switching-frequency multipulse high-power three-level PWM rectifier / J.A. Pontt, J.R. Rodriguez, A. Liendo, P. Newman, J. Holtz, J.M. San Martin // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2009. Vol. 56(4). Pp. 1254-1262. doi: 10.1109/TIE.2008.2007998
36. Maklakov A.S., Radionov A.A. Integration prospects of electric drives based on back to back converters in industrial smart grid // 2014 12th International Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE). 2014. Pp. 770-774. doi: 10.1109/APEIE.2014.7040790
37. Hardware-in-loop simulation and application for high-power AC-DC-AC rolling mill driving system / Y. Zhang, J. Tan, J. Wang, J. Li // 2015 IEEE 11th International Conference on Power Electronics and Drive Systems. 2015. Pp. 177-180. doi: 10.1109/PEDS.2015.7203385
38. A converter transformer with series-connected line-side windings for a DC link using voltage source converters / T. Nakajima, H. Suzuki, K. Izumi, S. Sugimoto, H. Yonezawa, Y. Tsubota // IEEE Power Engineering Society. 1999 Winter Meeting (Cat. No.99CH36233). 1999. Vol. 2. Pp. 1073-1078. doi: 10.1109/PESW.1999.747351
39. Kornilov G.P., Khramshin T.R., Abdulveleev I.R. Increasing stability of electric drives of rolling mills with active front ends at voltage sag // 2019 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS). 2019. Pp. 1-4. doi: 10.1109/ICOECS46375.2019.8949945
40. Design and selection of high reliability converters for mission critical industrial applications: a rolling mill case study / V. de Nazareth Ferreira, A. Fagner Cupertino, H. Augusto Pereira, A. Vagner Rocha, S. Isaac Seleme, B. de Jesus Cardoso Filho // IEEE Transactions on Industry Applications. 2018. Vol. 54(5). Pp. 4938-4947. doi: 10.1109/TIA.2018.2829104
41. Retrofit of a hot rolling mill plant with three-level active front end drives / G.A. Orcajo, J. Rodríguez D., J.M. Cano, J.G. Norniella // IEEE Transactions on Industry Applications. 2018. Vol. 54(3). Pp. 2964-2974. doi: 10.1109/TIA.2018.2808159
42. Multicell AFE rectifier managed by finite control set-model predictive control / E.E. Espinosa, P.E. Melin, H.O. Garcés, C.R. Baier, J.R. Espinoza // IEEE Access. 2021. Vol. 9. Pp. 137782-137792. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3116938
43. Study on large power converter system for rolling mills / W. Chengsheng, L. Chongjian, Z. Chunyi, L. Zhiming, Y. Qiongtao // 2012 15th International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE/PEMC). 2012. Pp. DS1b.20-1-DS1b.20-4. doi: 10.1109/EPEPEMC.2012.6397220
44. Finding the best programmable PWM pattern for three-level active front-ends at 18-pulse connection / A.S. Maklakov, T. Jing, A.A. Radionov, V.R. Gasiyarov, T.A. Lisovskaya // Machines. 2021. Vol. 9. 127. doi: 10.3390/machines9070127
45. Gasiyarov V.R., Maklakov A.S., Lisovski R.A. Grid power control by medium voltage AC drives based on back-to-back converters // 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIconRus). 2018. Pp. 629-631. doi: 10.1109/EIconRus.2018.8317175
46. A regenerative hexagonal-cascaded multilevel converter for two-motor asynchronous drive / P. Wang, F. Liu, X. Zha, J. Gong, F. Zhu, X. Xiong // IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics. 2017. Vol. 5(4). Pp. 1687-1699. doi: 10.1109/JESTPE.2017.2713043

Поступила в редакцию 1 сентября 2022 г.

Принята к печати 30 сентября 2022 г.

## INFORMATION IN ENGLISH

### GRID CONNECTION CIRCUITS FOR POWERFUL REGENERATIVE ELECTRIC DRIVES OF ROLLING STANDS

Alexander S. Maklakov

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Senior Researcher, Research and Innovation Services, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia, alexandr.maklakov.ru@ieee.org, <https://orcid.org/0000-0001-7950-708X>

Alexander A. Nikolaev

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Head of the Department, Department of Automated Electric Drive and Mechatronics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, aa.nikolaev@magtu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5014-4852>

Andrey A. Radionov

D.Sc. (Engineering), Professor, Department of Automation and Control, Moscow Polytechnic University, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Moscow, Russia, radionov.mail@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3914-4429>

Vadim R. Gasiyarov

D.Sc. (Engineering), Associate Professor, Professor, Department of Automation and Control, Moscow Polytechnic University, Master's Degree Student, Automated Control Systems Department, Nosov Magnitogorsk State University, Moscow, gasiyarovvr@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9635-4716>

Ildar G. Gilemov

Postgraduate student, Department of Automated Electric Drive and Mechatronics, Nosov Magnitogorsk State University, Magnitogorsk, Russia, gilemov.ig@outlook.com, <https://orcid.org/0000-0002-2481-3378>

AC regenerative drives are widely used in metallurgical rolling because of their reliability, economy and high efficiency to maintain the process. This article presents an overview of the latest achievements in the field of power connection circuits for electric drives to the power network. The article discusses multipulse connection schemes based on various types of transformers, algorithms for pre-programmed pulse-width modulation with the selected harmonic elimination method of three-level active front-end rectifiers. It provides the results of practical measurements. The results of experimental studies were obtained in the distribution power network of the metallurgical plant CherMK "Sever-Stal", which includes powerful electric drives for cold rolling mill stands based on frequency converters with active front-end rectifiers. Both frequency converters have the same power - 14 MW. One frequency converter is implemented according to a 6-pulse scheme, and the other according to a 12-pulse one. The instantaneous values of the phase current of the current transformers were recorded using a portable Flash Recorder and a Fluke 43B current clamp. The sampling frequency of the recorded signals was 30 kHz. The phase grid current waveforms and spectrums at 6- and 12-pulse circuits are shown and the total harmonic distortion up to the 60th and 150th harmonics are calculated for different pre-programmed pulse-width modulation patterns. It is expected that this article can give a new overview of the multipulse schemes for main regenerative AC drive connections of rolling mill stands to identify modern solutions and to improve significantly their electromagnetic compatibility with the power supply system. The presented results can be used by researchers and engineers to ensure the electromagnetic compatibility of non-linear consumers in similar circuits.

**Keywords:** power converters, electric drive, pulse-width modulation, voltage quality, multipulse connection schemes

#### REFERENCES

1. Kouro S., Malinowski M., Gopakumar K., Pou J., Franquelo L.G., Wu B., Rodriguez J., Pérez M.A., Leon J.I. Recent Advances and Industrial Applications of Multilevel Converters. *Ind. Electron. IEEE Trans.* 2010, vol. 57, pp. 2553–2580. doi: 10.1109/TIE.2010.2049719.
2. Abu-Rub H., Bayhan S., Moinoddin S., Malinowski M., Guzinski J. Medium-Voltage Drives: Challenges and existing technology. *IEEE Power Electron. Mag.* 2016, vol. 3, pp. 29–41. doi: 10.1109/MPPEL.2016.2551802
3. Rajesh D., Ravikumar D., Bharadwaj S.K., Vastav B.K.S. Design and control of digital DC drives in steel rolling mills. 2016 International Conference on Inventive Computation Technologies (ICICT). IEEE, 2016, pp. 1–5. doi: 10.1109/INVENTIVE.2016.7830095
4. Abu-Rub H., Lewicki A., Iqbal A., Guzinski J. Medium Voltage Drives-Challenges and Requirements. In *Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics*. IEEE, 2010, pp. 1372–1377. doi: 10.1109/ISIE.2010.5637205
5. IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems. *IEEE Std 519-1992, 1993*, pp. 1–112. doi: 10.1109/IEEESTD.1993.114370
6. IEEE Guide for Application and Specification of Harmonic Filters. *IEEE Std. 1531-2003, 2003*, pp. 1–66. doi: 10.1109/IEEESTD.2003.94407
7. Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems. *Std. EN 50160, 2001*.
8. Power Quality Measurement Methods. *IEC 61000-3-2, 2000*.
9. Kouro S., Rodriguez J., Wu B., Bernet S., Perez M. Powering the Future of Industry: High-Power Adjustable Speed Drive Topologies. *IEEE Ind. Appl. Mag.* 2012, no. 8, pp. 26–39. doi: 10.1109/MIAS.2012.2192231
10. Jing T., Maklakov A.S. A Review of Voltage Source Converters for Energy Applications. In *Proceedings of the International Ural Conference on Green Energy*. IEEE, 2018, pp. 275–281. doi: 10.1109/URALCON.2018.8544364
11. Bose B.K. *Modern Power Electronics and AC Drives*, 1<sup>st</sup> ed. Prentice Hall PTR, Hoboken, NJ, USA, 2002. 736 p.
12. Rodriguez J., Franquelo L.G., Kouro S., Leon J.I., Portillo R.C., Prats M.A.M., Perez M.A. Multilevel converters: An enabling technology for high-power applications. *Proc. IEEE* 2009, no. 97, pp. 1786–1817. doi: 10.1109/JPROC.2009.2030235
13. Wang L. *Modeling and Control of Sustainable Power Systems: Towards Smarter and Greener Electric Grids*, 1<sup>st</sup> ed. Springer, Hoboken, NJ, USA, 2012. 367 p. doi: 10.1007/978-3-642-22904-6
14. Kornilov G.P., Nikolaev A.A., Khrumshin T.R. Modelirovanie elektrotekhnicheskikh kompleksov metallurgicheskikh predpriyatiy [Mathematical Modeling of the Metallurgical Plants' Electrotechnical Complexes]. Magnitogorsk, Nosov Magnitogorsk State Technical University Publ., 2012. 237 p. (In Russian)
15. Mittal N., Singh B., Singh S.P., Dixit R., Kumar D. Multi-level Inverters: A Literature Survey on Topologies and Control Strategies. 2<sup>nd</sup> International Conference on Power, Control and Embedded Systems. IEEE, 2012, pp. 1–11. doi: 10.1109/ICPCES.2012.6508041
16. Rodriguez J., Bernet S., Wu B., Pontt J.O., Kouro S. Multi-level voltage-source-converter for industrial medium-voltage drives. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2007, vol. 54, pp. 2930–2945. doi: 10.1109/TIE.2007.907044
17. Franquelo L.G., Rodriguez J., Leon J.I., Kouro S., Portillo R., Prats M.A.M. The age of multilevel converters arrives. *IEEE Ind. Electron. Mag.* 2008, no. 2, pp. 28–39. doi: 10.1109/MIE.2008.923519
18. Ge B., Peng F.Z., Wu B., de Almeida A.T., Abu-Rub H. An effective control technique for medium-voltage high-power induction motor fed by cascaded neutral-point-clamped inverter. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2010, no. 57, pp. 2659–2668. doi: 10.1109/TIE.2009.2026
19. Ewanchuk J., Salmon J., Vafakhah B. A five-/nine-level twelve-switch neutral-point-clamped inverter for high-speed electric drives. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2011, vol. 47, pp. 2145–2153. doi: 10.1109/TIA.2011.2161857
20. Bernet S. State of the art and developments of medium voltage converters—An overview. *Prz. Elektrotechniczny*. 2006, vol. 82, pp. 1–10.
21. Mohammed S.A., Abdel-Moamen M.A., Hasanin B. A review of the state-of-the-art of power electronics for power system applications. *Int. J. Electron. Commun. Eng. Res.* 2013, vol. 1, pp. 43–52.
22. Fazel S.S. Investigation and Comparison of Multi-Level Converters for Medium Voltage Applications. 2017. Thesis. Technische Universität Berlin.
23. Nabae A., Takahashi I., Akagi H. New neutral-point-clamped PWM inverter. *IEEE Trans. Ind. Appl.* 1981, vol. IA–17, pp. 518–523.
24. Leon J.I., Vazquez S., Franquelo L.G. Multilevel converters: Control and modulation techniques for their operation and industrial applications. *Proc. IEEE*. 2017, vol. 105, pp. 2066–2081. doi: 10.1109/JPROC.2017.2726583
25. Abu-Rub H., Holtz J., Rodriguez J., Ge B. Medium-voltage multilevel converters – State of the art, challenges, and requirements in industrial applications. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2010, vol. 57(8), pp. 2581–2596. doi: 10.1109/TIE.2010.2043039

26. Wu B., Narimani M. High-Power Converters and AC Drives, 2<sup>nd</sup> ed. Wiley-IEEE Press, Hoboken, NJ, USA, 2017. 480 p.
27. Singh B., Gairola S., Singh B.N., Chandra A., Al-Haddad K. Multipulse AC-DC Converters for Improving Power Quality: A Review. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2008, vol. 23, no. 1, pp. 260-281. doi: 10.1109/TPEL.2007.911880
28. Chen J., Shen Y., Chen J., Bai H., Gong C., Wang F., Evaluation on the Autoconfigured Multipulse AC/DC Rectifiers and Their Application in More Electric Aircrafts. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*. 2020, vol. 6, no. 4, pp. 1721-1739. doi: 10.1109/TTE.2020.2983858
29. Nikolaev A.A., Bulanov M.V., Shakhbieva K.A. Quality Improvement of Electric Power in the Intra-factory Electric Networks through the Use of PWM Algorithm Selective Harmonic Mitigation. 2020 Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (PEAMI). IEEE, 2020, pp. 26-31. doi: 10.1109/PEAMI49900.2020.9234357
30. Okayama H., Uchida R., Koyama M., Mizoguchi S., Tamai S. Large capacity high performance 3-level GTO inverter system for steel main rolling mill drives. IAS '96. Conference Record of the 1996 IEEE Industry Applications Conference Thirty-First IAS Annual Meeting. IEEE, 1996, vol. 1, pp. 174-179. doi: 10.1109/IAS.1996.557012
31. de Nazareth Ferreira V., Cupertino A.F., Pereira H.A., Rocha A.V., Isaac Seleme S., de Jesus Cardoso Filho B. Design of high-reliable converters for medium-voltage rolling mills systems. 2017 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting. IEEE, 2017, pp. 1-9. doi: 10.1109/IAS.2017.8101826
32. Bocker J., Janning J., Jebenstreit H. High dynamic control of a three-level voltage-source-converter drive for a main strip mill. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2002, vol. 49, no. 5, pp. 1081-1092. doi: 10.1109/TIE.2002.803220
33. Safaeian M., Jalilvand A., Taheri A.A. MRAS based model predictive control for multi-leg based multi-drive system used in hot rolling mill applications. *IEEE Access*. 2020, vol. 8, pp. 215493-215504. doi: 10.1109/ACCESS.2020.3041310
34. Radionov A.A., Maklakov A.S., Gasiyarov V.R. Smart Grid for main electric drive of plate mill rolling stand. 2014 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS). IEEE, 2014, pp. 1-4. doi: 10.1109/MEACS.2014.6986842
35. Pontt J.A., Rodriguez J.R., Liendo A., Newman P., Holtz J., San Martin J.M. Network-Friendly Low-Switching-Frequency Multipulse High-Power Three-Level PWM Rectifier. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2009, vol. 56, no. 4, pp. 1254-1262. doi: 10.1109/TIE.2008.2007998
36. Maklakov A.S., Radionov A.A. Integration prospects of electric drives based on back to back converters in industrial smart grid. 2014 12<sup>th</sup> International Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE). IEEE, 2014, pp. 770-774. doi: 10.1109/APEIE.2014.7040790
37. Zhang Y., Tan J., Wang J., Li J. Hardware-in-loop simulation and application for high-power AC-DC-AC rolling mill driving system. 2015 IEEE 11th International Conference on Power Electronics and Drive Systems. IEEE, 2015, pp. 177-180. doi: 10.1109/PEDS.2015.7203385
38. Nakajima T., Suzuki H., Izumi K., Sugimoto S., Yonezawa H., Tsubota Y. A converter transformer with series-connected line-side windings for a DC link using voltage source converters. *IEEE Power Engineering Society. 1999 Winter Meeting (Cat. No.99CH36233)*. 1999, vol. 2, pp. 1073-1078. doi: 10.1109/PESW.1999.747351
39. Kornilov G.P., Khramshin T.R., Abdulveleev I.R. Increasing stability of electric drives of rolling mills with active front ends at voltage sag. 2019 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS). IEEE, 2019, pp. 1-4. doi: 10.1109/ICOECS46375.2019.8949945
40. de Nazareth Ferreira V., Fagner Cupertino A., Augusto Pereira H., Vagner Rocha A., Isaac Seleme S., de Jesus Cardoso Filho B. Design and Selection of High Reliability Converters for Mission Critical Industrial Applications: A Rolling Mill Case Study. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2018, vol. 54 (5), pp. 4938-4947. doi: 10.1109/TIA.2018.2829104
41. Orcajo G.A., D. Rodríguez J., Cano J.M., Norniella J.G. Retrofit of a Hot Rolling Mill Plant With Three-Level Active Front End Drives. *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 54(3), pp. 2964-2974. doi: 10.1109/TIA.2018.2808159
42. Espinosa E.E., Melin P.E., Garcés H.O., Baier C.R., Espinoza J.R. Multicell AFE Rectifier Managed by Finite Control Set-Model Predictive Control. *IEEE Access*. 2021, vol. 9, pp. 137782-137792. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3116938
43. Chengsheng W., Chongjian L., Chunyi Z., Zhiming L., Qiongtao Y. Study on large power converter system for rolling mills. 2012 15th International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE/PEMC). IEEE, 2012, pp. DS1b.20-1-DS1b.20-4. doi: 10.1109/EPEPEMC.2012.6397220
44. Maklakov A.S., Jing T., Radionov A.A., Gasiyarov V.R., Lisovskaya T.A. Finding the Best Programmable PWM Pattern for Three-Level Active Front-Ends at 18-Pulse Connection. *Machines*. 2021, vol. 9, 127. doi: 10.3390/machines9070127
45. Gasiyarov V.R., Maklakov A.S., Lisovski R.A. Grid power control by medium voltage AC drives based on back-to-back converters. 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EICOnRus). IEEE, 2018, pp. 629-631. doi: 10.1109/EICOnRus.2018.8317175
46. Wang P., Liu F., Zha X., Gong J., Zhu F., Xiong X. A Regenerative Hexagonal-Cascaded Multilevel Converter for Two-Motor Asynchronous Drive. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*. 2017, vol. 5(4), pp. 1687-1699. doi: 10.1109/JESTPE.2017.2713043

Схемы подключения к сети мощных рекуперативных электроприводов клеток прокатных станков / А.С. Маклаков, А.А. Николаев, А.А. Радионов, В.Р. Гасияров, Гилемов И.Г. // *Электротехнические системы и комплексы*. 2022. № 4(57). С. 42-53. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-4\(57\)-42-53](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-4(57)-42-53)

Maklakov A.S., Nikolaev A.A., Radionov A.A., Gasiyarov V.R., Gilemov I.G. Grid Connection Circuits for Powerful Regenerative Electric Drives of Rolling Stands. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2022, no. 4(57), pp. 42-53. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-4\(57\)-42-53](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-4(57)-42-53)

Греков Э.Л., Безгин А.С.

Оренбургский государственный университет

**ПРЯМОЕ УПРАВЛЕНИЕ МОМЕНТОМ ДВУХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ**

В статье рассматривается синтез системы прямого управления моментом двухфазного асинхронного электродвигателя с внешним ротором. В двигателях небольшой мощности размещение трехфазной обмотки может быть затруднительно. В этом случае используют двухфазную статорную обмотку. Также представляют интерес системы управления без датчика обратной связи по скорости для механизмов, к которым не предъявляются повышенные точности регулирования, либо вообще разомкнутые по скорости вращения. Последние используются в тяговых электроприводах передвижных установок, например электровелосипедах, скутерах. За основу взята известная система электропривода для трехфазных двигателей. В статье показан принцип разбиения пространственных положений вектора напряжения на 8 позиций в зависимости от номера включенных транзисторов двухфазного автономного инвертора. Синтезирован алгоритм формирования управляющих сигналов силовыми ключами в виде таблиц в зависимости от комбинаций состояний релейных регуляторов потокосцепления статора и электромагнитного момента, а также с учетом номера сектора текущего положения вектора потокосцепления. Каждый регулятор имеет три фиксированных состояния с переходами по петлям гистерезиса. Для проверки работоспособности алгоритма разработана имитационная модель тягового электропривода в системе MatLab Simulink. Показана структура системы управления и принцип табличного формирования сигналов управления силовой частью. Для ограничения полного тока статора введен дополнительный релейный регулятор тока, устанавливающий нулевые векторы напряжения при достижении амплитуды тока заданных значений. Для апробации системы управления спроектирован и изготовлен экспериментальный образец электропривода с системой управления на базе микроконтроллера STM32F407 с тяговым двухфазным трехполюсным асинхронным двигателем мощностью 500 Вт. Приведены графики экспериментальных исследований, доказывающие работоспособность предложенных технических решений.

**Ключевые слова:** прямое управление моментом, двухфазный асинхронный электродвигатель, двигатель с внешним ротором, автономный инвертор, потокосцепление статора, имитационная модель

**ВВЕДЕНИЕ**

В двигателях небольшой мощности размещение трехфазной обмотки в ограниченном пространстве может быть затруднительно [1, 2]. В этом случае используют двухфазную статорную обмотку, способную создавать вращающееся магнитное поле. Также представляют интерес системы управления без датчика обратной связи по скорости для механизмов, к которым не предъявляются повышенные точности регулирования, либо вообще разомкнутые по скорости вращения [3, 4]. Последние используются в тяговых электроприводах передвижных установок, например электровелосипедах, скутерах и т.д. [5, 6].

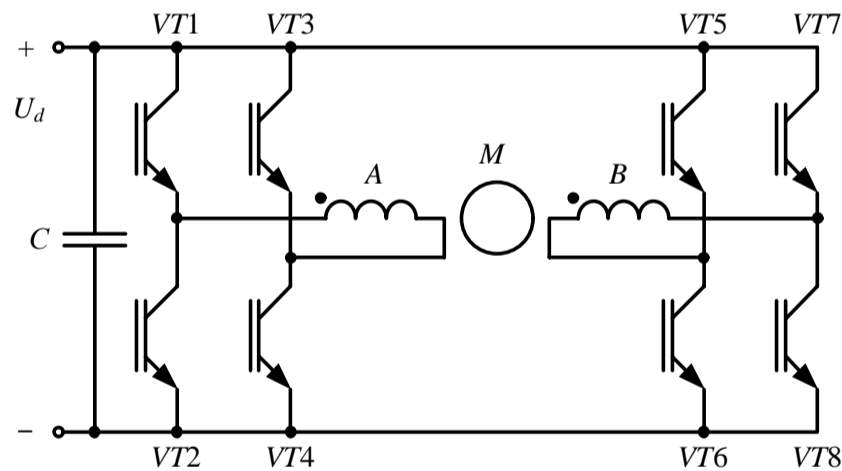
Достоинством системы прямого управления моментом является релейное регулирование потокосцепления статора и электромагнитного момента, что не требует точной настройки соответствующих регуляторов [7-10]. Более того, для построения системы управления с главной обратной связью по моменту в реализации физического датчика скорости нет необходимости.

В статье рассматривается синтез системы прямого управления моментом двухфазного асинхронного двигателя с внешним ротором.

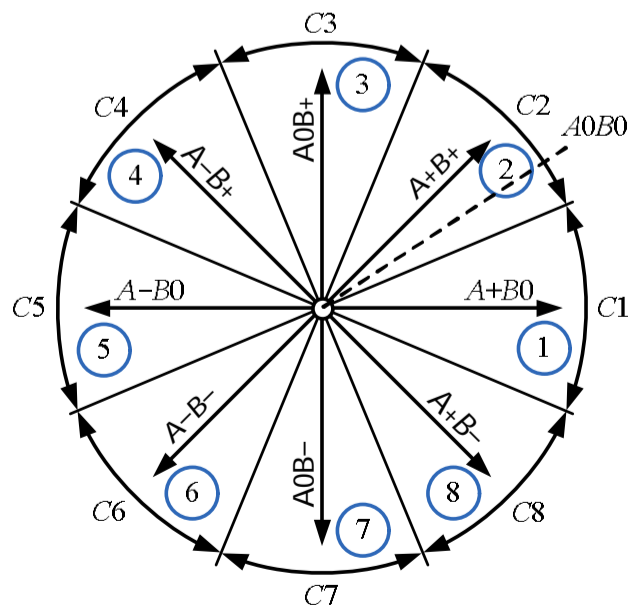
**ПРИНЦИП ФОРМИРОВАНИЯ УПРАВЛЯЮЩЕГО ВОЗДЕЙСТВИЯ АВТОНОМНОГО ИНВЕРТОРА**

Силовая часть электропривода представляет собой два однофазных транзисторных автономных инвертора VT1-VT4 для питания фазы A двигателя и VT5-VT8 для фазы B (рис. 1). За положительное направление проекций вектора напряжения по осям A и B будем считать включение транзисторов VT1, VT4 (фаза A) и VT5, VT8

(фаза B). Различные комбинации включения силовых транзисторов создают 8 пространственных положений вектора напряжения  $U_1$  плюс две комбинации нулевого вектора, когда напряжение на обмотках отсутствует (рис. 2).



**Рис. 1. Электрическая принципиальная схема силовой части электропривода**



**Рис. 2. Пространственные положения вектора  $U_1$**



При обозначении положений вектора знаком «+» отмечалось положительное направление напряжения в фазе, «-» – отрицательное, «0» – его отсутствие. Согласно принципу прямого управления моментом [6-8], вектор потокосцепления статора  $\Psi_1$  может занимать такое же количество секторов, сколько позиций  $U_1$ , больших нуля. Секторы на рис. 2 обозначены С1-С8. Границы секторов находятся по диагонали между соседними положениями  $U_1$ . Примем нумерацию секторов  $\Psi_1$  и позиций векторов  $U_1$  одинаковыми против часовой стрелки.

В табл. 1 показано распределение импульсов управления по транзисторам для каждого номера позиции вектора  $U_1$  («1» – включен, «0» – выключен).

Рассмотрим текущее положение вектора потокосцепления статора в секторе С1 (рис. 3). Направление вращения – против часовой стрелки. Если при этом требуется увеличить электромагнитный момент «М+», то, согласно рис. 3, нужно включить векторы напряжения, находящиеся впереди вектора  $\Psi_1$  (2, 3, 4). Для уменьшения момента «М0» необходимо включить векторы 8, 7, 6 против направления вращения. Включение векторов напряжения 1 и 5 не приведет к существенному изменению электромагнитного момента «М0».

Конкретный выбор, какой из вышеперечисленных векторов напряжения включать, зависит от модуля самого вектора  $\Psi_1$ . Для его увеличения « $\Psi+$ » необходимо включать векторы, сонаправленные с сектором 1 (2, 1, 8), для уменьшения « $\Psi-$ » – противоположные векторы (4, 5, 6).

Включение векторов 3 или 4 не приведет к существенному изменению модуля потокосцепления.

Если не требуется изменение момента и потокосцепления, необходимо включать нулевые векторы с индексом 9 или 10.

Для других секторов легко составить необходимые положения управляющих векторов напряжения. В табл. 2 приведены номера векторов  $U_1$ , включаемые при различных комбинациях изменений потокосцепления и момента в зависимости от текущего положения вектора  $\Psi_1$ .

Таблица 1

Распределение импульсов управления транзисторами

VTx	Номер позиции вектора напряжения $U_1$									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	0
2	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1
3	0	0	1	1	1	1	0	0	1	0
4	1	1	0	0	0	0	1	1	0	1
5	1	1	1	1	0	0	0	0	1	0
6	0	0	0	0	1	1	1	1	0	1
7	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0
8	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1

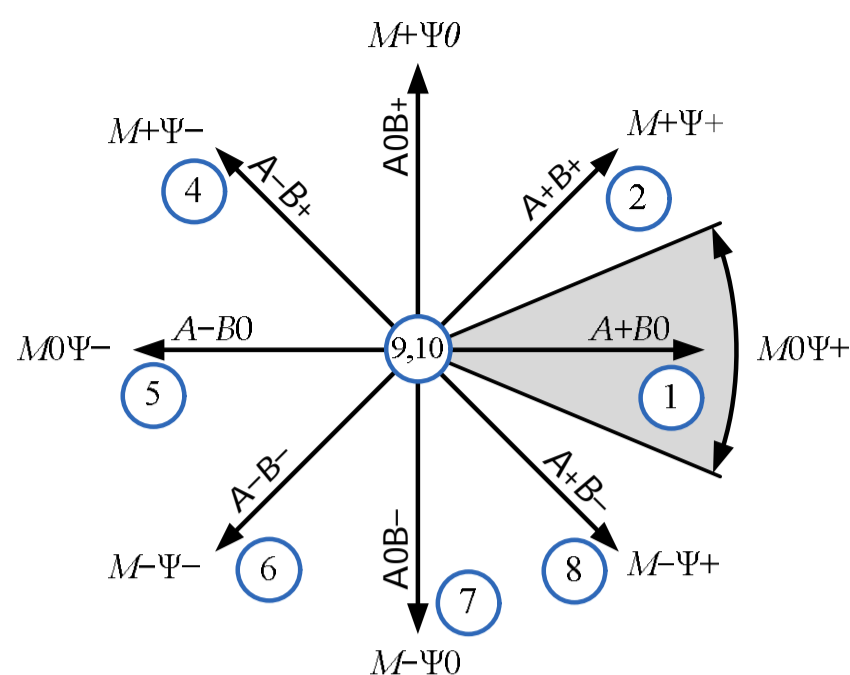


Рис. 3. Принцип формирования управляющего вектора выходного напряжения

Таблица 2

Номера включаемых векторов напряжения  $U_1$

Выходы регуляторов		Сектор положения вектора $\Psi_1$							
		1	2	3	4	5	6	7	8
$\Psi_1-$	M-	6	7	8	1	2	3	4	5
	M0	5	6	7	8	1	2	3	4
	M+	4	5	6	7	8	1	2	3
$\Psi_10$	M-	7	8	1	2	3	4	5	6
	M0	9	10	9	10	9	10	9	10
	M+	3	4	5	6	7	8	1	2
$\Psi_1+$	M-	8	1	2	3	4	5	6	7
	M0	1	2	3	4	5	6	7	8
	M+	2	3	4	5	6	7	8	1

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ

Для проверки алгоритма управления была построена имитационная модель двухфазного электропривода в системе MatLab Simulink. Внешний вид модели представлен на рис. 4.

Модель состоит из блоков:

- «DTC», в котором производится расчет положений векторов напряжения;
- «Model AD», в котором рассчитываются модуль «Psi1» и текущее положение «Sector» вектора потокосцепления статора, значение электромагнитного момента «M» и модуль тока статора «I»;
- «ТрП А», «ТрП В» – однофазные автономные инверторы напряжения;
- «AD» – модель двухфазного асинхронного двигателя, построенная на основе модели [9];
- «РС» – пропорциональный регулятор скорости, введенный в модель для исследования динамических характеристик пуска, торможения и наброса нагрузки;
- «Регулятор M» – релейный трехпозиционный регулятор момента (PPM);
- «Регулятор Psi1» – релейный трехпозиционный регулятор потокосцепления статора (РПИ);
- «Регулятор I» – релейный двухпозиционный регулятор тока статора (РРТ).

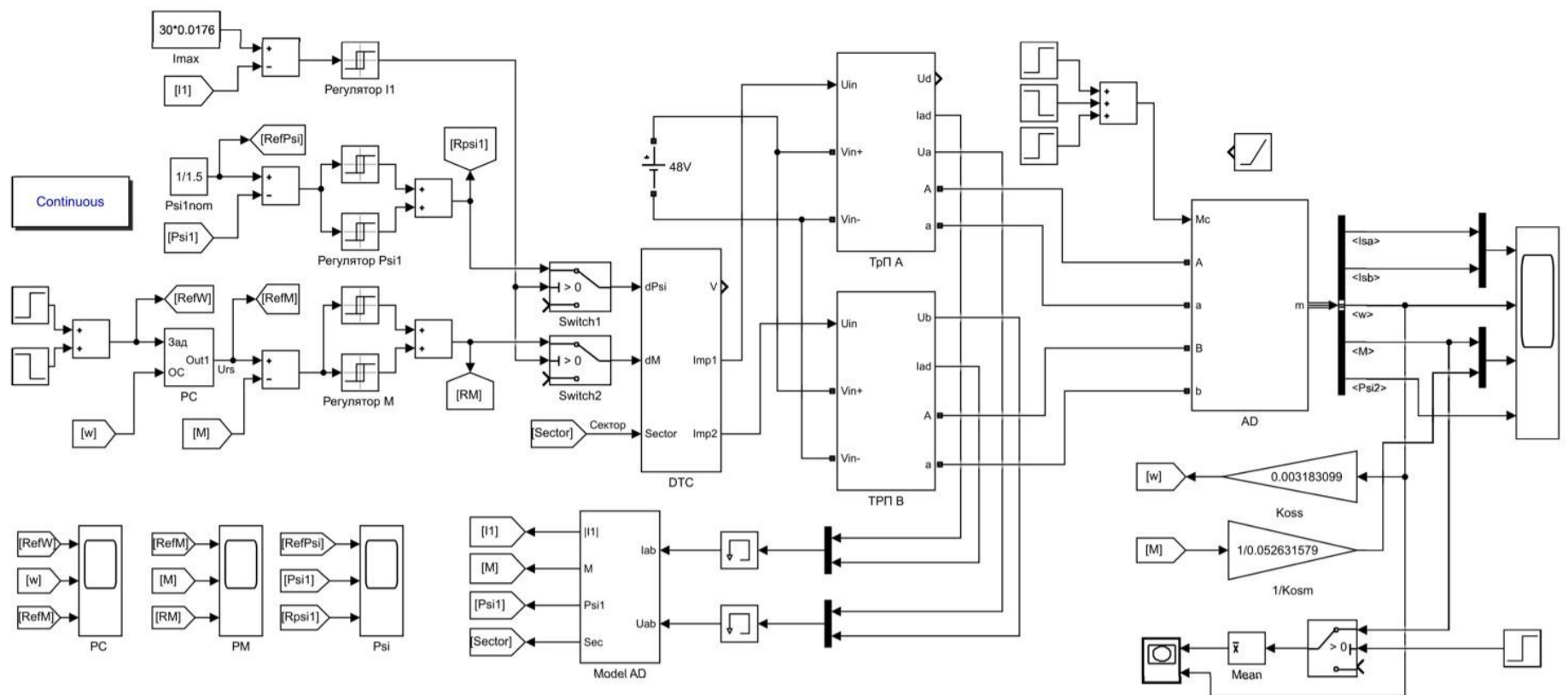


Рис. 4. Имитационная модель двухфазного электропривода

РРТ введен в систему управления для ограничения максимального тока в переходных режимах. При нормальной работе, когда обратная связь по току не достигает максимальных значений, выход РРТ установлен всегда в «1». С помощью ключей «Switch1» и «Switch2» выходы РРМ и РРП подключаются к соответствующим входам блока «DTC». При достижении тока максимальных значений выход РРТ переключается в «0», тем самым принудительно включая только нулевые векторы напряжения.

Структура блока «DTC» приведена на рис. 5. Блоки «Таблица векторов U» и «Таблица импульсов» настроены согласно табл. 2 и 1 соответственно (рис. 6). Структура блока «Model AD» приведена на рис. 7. Коэффициенты «Kost», «Kosn», «KosM», «KosPsi» рассчитываются таким образом, чтобы сигналы, действующие в системе управления, были приведены к плюс-минус 1 о.е. максимального значения.

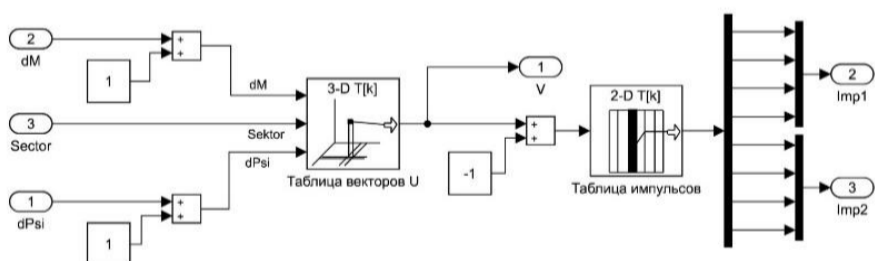


Рис. 5. Структура блока «DTC»

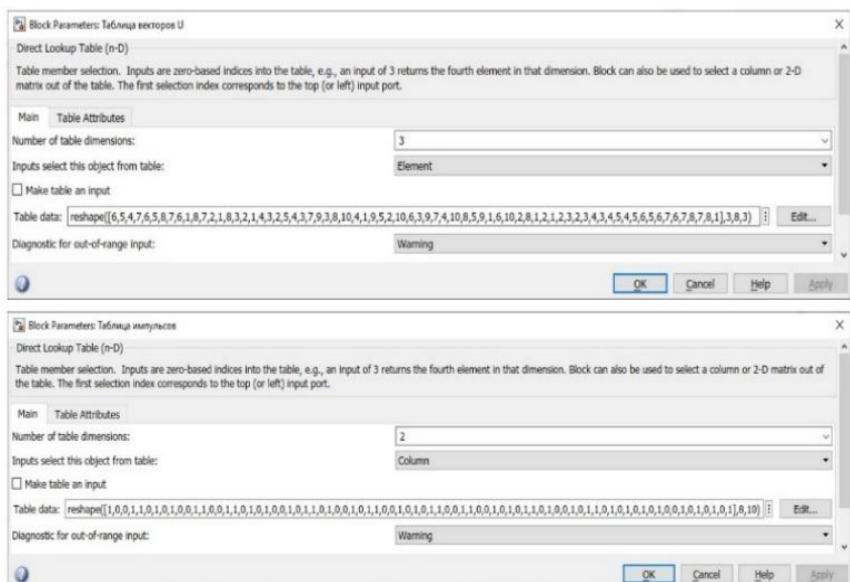


Рис. 6. Настройка блоков «Таблица векторов U» и «Таблица импульсов»

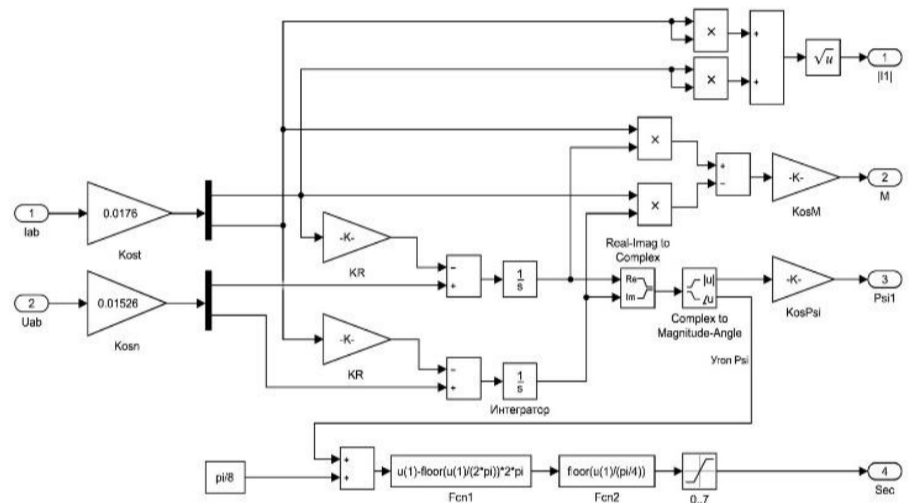


Рис. 7. Структура блока «Model AD»

Уравнения для расчета номера текущего сектора вектора потокосцепления реализованы в функциональных блоках «Fcn1» и «Fcn2» согласно уравнению (1):

$$Sector = \left\lfloor \frac{(\varphi + \pi/8) - \left\lfloor \frac{\varphi + \pi/8}{2\pi} \right\rfloor 2\pi}{\pi/4} \right\rfloor \quad (1)$$

Значком [...] обозначается функция определения целого значения (округление до ближайшего меньшего целого значения). Номера секторов в этом случае лежат в пределах 0...7.

Графики тока статора, скорости вращения, электромагнитного момента, потокосцепления ротора приведены на рис. 8.

Электропривод разгоняется вхолостую, затем происходит ступенчатый «наброс» номинальной нагрузки в двигательном и генераторном режимах. Через некоторое время электропривод останавливается вхолостую. Как видно из графиков, алгоритм прямого управления моментом двухфазного двигателя работоспособен.

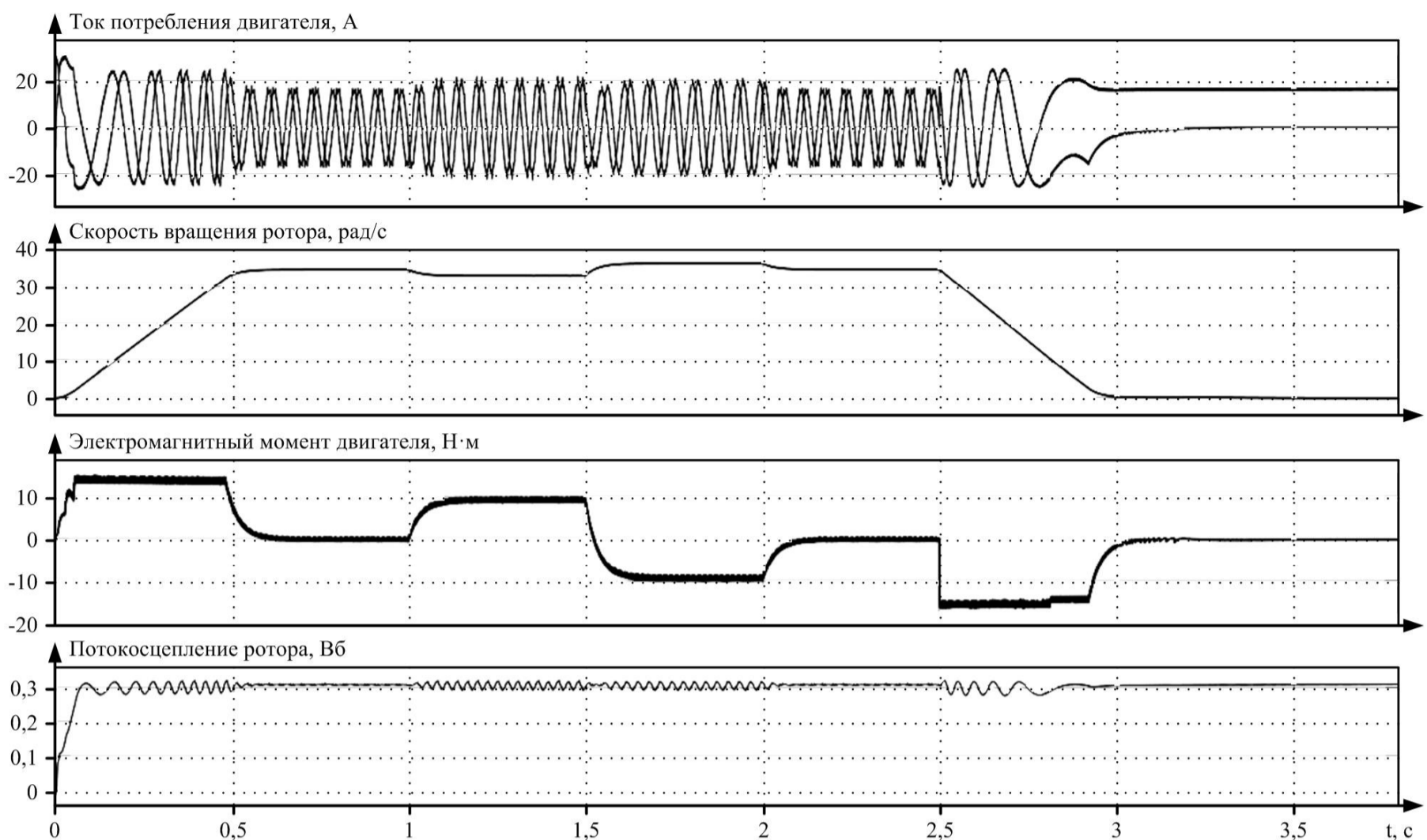


Рис. 8. Графики переходных процессов имитационной модели электропривода

АПРОБАЦИЯ ПРЕДЛОЖЕННОГО СПОСОБА УПРАВЛЕНИЯ

Для апробации предложенного способа управления проведены экспериментальные исследования на двухфазном трехполюсном тяговом асинхронном двигателе мощностью 500 Вт [5]. Был разработан промышленный образец электропривода с системой управления с прямым управлением моментом на базе 32-разрядного микроконтроллера STM32F407VET6.

На рис. 9 представлены осциллограммы с датчиков тока и напряжения по фазе А в режиме холостого хода с выходной частотой 20 Гц при питании выходного инвертора источником постоянного напряжения 50 В.

На рис. 10 представлены графики изменения номера сектора потокосцепления статора (Sector), обратной связи по моменту и потокосцеплению ( $M_{o.c.}$ ,  $\Psi_{1 o.c.}$ ), скорости вращения ротора  $\omega_p$ , взятые в цифровом виде из микроконтроллера, приведенные к относительным единицам. Произведен опыт пуска путем подачи ступенчатого задания на регулятор скорости, выключения силового инвертора и торможения двигателя до нулевой скорости.

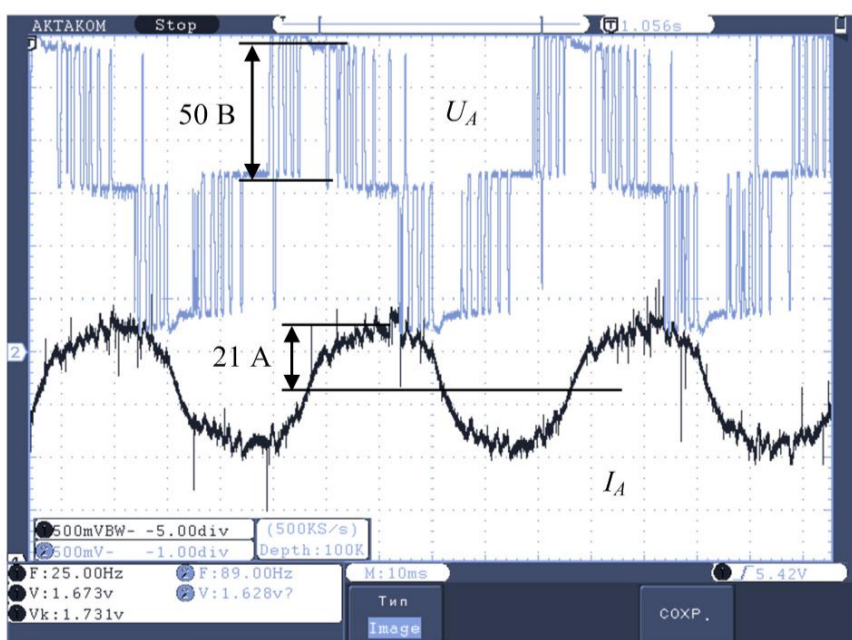


Рис. 9. Экспериментальные графики тока и напряжения в фазе А

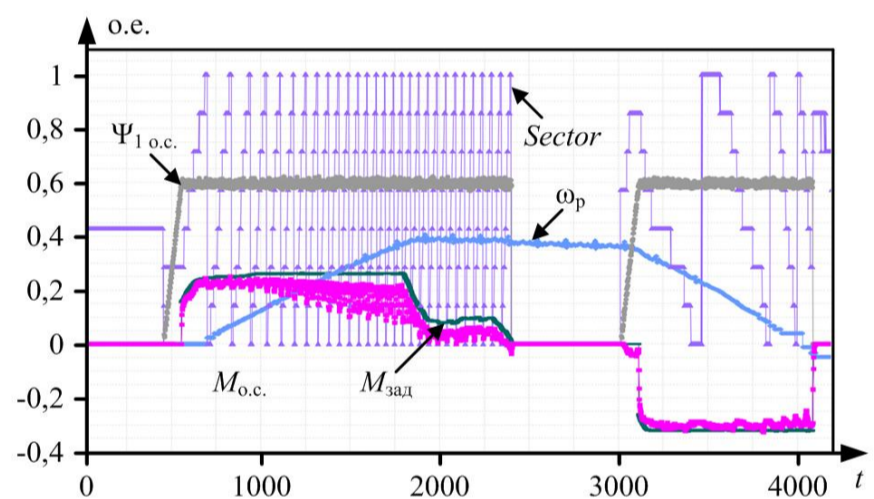


Рис. 10. Экспериментальные графики работы системы электропривода

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как видно из осциллограмм имитационной модели и экспериментальной установки, алгоритм прямого управления моментом двухфазного асинхронного электродвигателя работоспособен и может быть использован для реализации тяговых электроприводов передвижных установок.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Овсянников Е.М., Нгуен К.Т. Система прямого управления моментом и потокосцеплением ротора асинхронного электродвигателя // Известия вузов. Машиностроение. 2011. № 7. С. 27-30.
2. Takahashi I., Noguchi T. A new quick-response and high-efficiency control strategy of an induction motor // IEEE Trans. Ind. Applications. 1986. Vol. IA-22(5). Pp. 820-827. doi: 10.1109/TIA.1986.4504799
3. Браславский И.Я., Ишматов З.Ш., Барац Е.И. Адаптивная система прямого управления моментом асинхронного двигателя // Электротехника. 2001. № 11. С. 35-39.
4. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. М.: Изд. центр «Академия», 2007. 272 с.
5. Об испытании двухфазного асинхронного электродвигателя

теля с внешним ротором и несимметричной обмоткой статора / Э.Л. Греков, М.П. Саликов, И.И. Ямансарин, А.С. Безгин // Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии (XIX Бенардосовские чтения): материалы Междунар. науч.-техн. конф. посвящ. 175-летию со дня рождения Н.Н. Бенардоса. Иваново: Иванов. гос. энергет. ун-т им. В. И. Ленина, 2017. Т. III: Электротехника. С. 154-158.

6. Фираго Б.И., Павлячик Л.Б. Регулируемые электроприводы переменного тока. Минск: Техноперспектива, 2006. 363 с.
7. Фираго Б.И., Васильев Д.С. Векторные системы управления электроприводами. Минск: Вышэйш. шк., 2016. 159 с.
8. Vas P. Sensorless Vector and Direct Torque Control. Lon-

Поступила в редакцию 14 сентября 2022 г.

don, U.K.: Oxford Science Publication, 1998. 729 p.

9. Безгин А.С. Математическая модель двухфазного асинхронного электродвигателя с разделенными обмотками и короткозамкнутым ротором в Matlab Simulink // Наука и образование: фундаментальные основы, технологии, инновации: сб. материалов Междунар. науч. конф., посвящ. 60-летию Оренбург. гос. ун-та. Оренбург: Оренбург. гос. ун-т, 2015. Ч. 1. С. 270-276.
10. Shokhin V.V., Kornilov G.P., Permyakova O.V., Faryma V.N., Shestalyuk K.A. Investigation of braking modes in the electric drive with direct torque control system // Proceedings of International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). 2021. Pp. 329-333. doi: 10.1109/ICIEAM51226.2021.9446465

Принята к печати 12 октября 2022 г.

## INFORMATION IN ENGLISH

### DIRECT TORQUE CONTROL BY TWO-PHASE ASYNCHRONOUS ELECTRIC MOTOR

Eduard L. Grekov

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Department of Automatic Electric Drive, Electromechanics and Electrical Engineering, Institute of Energy, Electronics and Communications, Orenburg State University, Orenburg, Russia, aeptpm@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4675-7378>

Aleksej S. Bezgin

Ph.D. (Engineering), Acting Head of Automatic Electric Drive, Electromechanics and Electrical Engineering Department, Institute of Energy, Electronics and Communications, Orenburg State University, Orenburg, Russia, alex11\_81@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8597-6616>

The article considers the synthesis of a direct torque control system in a two-phase asynchronous electric motor with an external rotor. In low-power motors, the placement of a three-phase winding can be difficult. In this case, a two-phase stator winding is used. Control systems without a speed feedback sensor for mechanisms that do not require increased control accuracy, or even open-speed rotations are also of great interest. The latter are used in traction electric drives of mobile installations, for example, in electric bicycles and scooters. The well-known electric drive system for three-phase motors is taken as a basis. The article shows the principle of dividing the spatial positions of the voltage vector into 8 positions depending on the number of transistors included in a two-phase autonomous inverter. An algorithm for generating control signals by power keys in the tabular form is synthesized depending on the combinations of relay regulators states in the flow coupling of the stator and the electromagnetic moment, as well as taking into account the sector number of the current flow coupling vector position. Each regulator has three fixed states with transitions along hysteresis loops. To test the algorithm operability, a simulation model of a traction electric drive in the MatLab Simulink system has been developed. The control system structure and the principle of control signals tabular generation in the power unit are shown. To limit the total current of the stator, an additional relay current regulator has been introduced, which sets zero voltage vectors when the current amplitude reaches the set values. To test the control system, an experimental sample of an electric drive with a control system based on an STM32F407 microcontroller with a traction two-phase three-pole asynchronous motor with a power of 500 watts was designed and manufactured. The graphs of experimental studies proving the proposed technical solutions operability are presented.

**Keywords:** direct torque control; two-phase asynchronous electric motor; motor with external rotor; autonomous inverter; stator flow coupling; simulation model

#### REFERENCES

1. Ovsjannikov E. M., Nguen Kuang Thieu. Direct control of asynchronous motor rotor torque and flux linkage. *Izvestija vuzov. Mashinostroenie*. [Proceedings of Universities. Journal of Mechanical Engineering], 2011, no. 7, pp. 27-30. (In Russian)
2. Takahashi I., Noguchi T. A new quick-response and high-efficiency control strategy of an induction motor // *IEEE Trans. Ind. Applications*. 1986, vol. IA-22(5), pp. 820-827. doi: 10.1109/TIA.1986.4504799
3. Braslavskij I.Ja., Ishmatov Z.Sh., Barac E.I. Adaptive direct control system of asynchronous motor torque. *Elektrotehnika* [Electrical engineering], 2001, no. 11, pp. 35-39. (In Russian)
4. Sokolovskij G.G. *Elektroprivody peremennogo toka s chastotnym regulirovaniem*. [Alternating current electric drives with frequency control]. Moscow, Publishing center «Akademija», 2007. 272 p. (In Russian)
5. Grekov Je.L., Salikov M.P., Jamansarin I.I., Bezgin A.S. Tests of two-phase induction motor with external rotor and asymmetrical stator winding. *Sostojanie i perspektivy razvitiya jelektro- i teplotehnologii (XIX Benardosovskie chtenija): materialy Mezhdunar. nauch.-tehn. konf., posvjashh. 175-let. so dnja rozhdenija N.N. Benardosa*. [State and development prospects of electrical and heat power engineering (XIX Bernadosov talks). Materials of the international scientific conference devoted to 175<sup>th</sup> anniversary of N.N. Benardos]. Ivanovo, Lenin Ivanovo State Power Engineering University Publ., 2017, vol. III: Electrical Engineering, pp. 154-158. (In Russian)
6. Firago B.I., Pavljachik L.B. *Reguliruemye elektroprivody peremennogo toka* [Alternating current controlled electric drives]. Minsk, Tehnoperspektiva, 2006, 363 p. (In Russian)
7. Firago B.I., Vasiliev D.S. *Vektornye sistemy upravlenija elektroprivodami* [Vector control systems of electric drives]. Minsk, Vyshjeshaja shkola, 2016, 159 p. (In Russian)
8. P. Vas. Sensorless Vector and Direct Torque Control. London, U.K., Oxford Science Publication, 1998. 729 p.

9. Bezgin, A. S. Mathematical model of two-phase asynchronous electric drive with subdivided windings and squirrel-cage rotor in Matlab Simulink. *Nauka i obrazovanie: fundamentalnye osnovy, tehnologii, innovacii: sb. materialov Mezhdunar. nauch. konf., posvjashh. 60-letiju Orenburg. gos. un-ta* [Science and education: fundamentals, technology, innovations. Collection of scientific papers of the International scientific conference devoted to the 60<sup>th</sup> anniversary of Orenburg State University. Part 1.]. Orenburg, Orenburg State University Publ., 2015, pp. 270-276. (In Russian)
10. Shokhin V.V., Kornilov G.P., Permyakova O.V., Faryma V.N., Shestalyuk K.A. Investigation of braking modes in the electric drive with direct torque control system. Proceedings of International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). IEEE, 2021, pp. 329-333. doi: 10.1109/ICIEAM51226.2021.9446465
- 

Греков Э.Л., Безгин А.С. Прямое управление моментом двухфазного асинхронного электродвигателя // Электротехнические системы и комплексы. 2022. № 4(57). С. 54-59. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-4\(57\)-54-59](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-4(57)-54-59)

Grekov E.L., Bezgin A.S. Direct Torque Control by Two-Phase Asynchronous Electric Motor. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2022, no. 4(57), pp. 54-59. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-4\(57\)-54-59](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-4(57)-54-59)

---

Харисов И.Р., Карякин А.Л.

Уральский государственный горный университет, Екатеринбург

## ЗАКОНЫ И СПОСОБЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЯГОВЫМ УСИЛИЕМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ МАГИСТРАЛЬНОГО ЭЛЕКТРОВОЗА

В статье приведен обзор методов управления тяговым электрическим приводом магистральных электровозов в режимах предельных тяговых усилий. Рассмотрены особенности процесса трения колеса и рельса. Приведены зависимости коэффициента сцепления от скольжения колесной пары с учетом погодных условий и наличия третьих тел в зоне контакта колеса и рельса. Приведена классификация динамических режимов электропривода в зависимости от положения рабочей точки коэффициента сцепления. Приведены основные принципы построения расчетной тяговой характеристики магистрального электровоза. На основании расчетной тяговой характеристики сформулированы требования к тяговому электрическому приводу магистральных электровозов. Проведен анализ современных видов тягового электрического привода, применяемых на магистральных электровозах. Рассмотрены электрический тяговый привод с двигателем постоянного тока с независимым возбуждением, электрический тяговый привод с автономным инвертором напряжения с попарным регулированием асинхронных тяговых двигателей и электрический тяговый привод с автономным инвертором напряжения с индивидуальным регулированием асинхронных тяговых двигателей. Рассмотрены системы управления тяговым асинхронным двигателем. Приведены механические характеристики скалярной системы управления асинхронным тяговым двигателем, векторной системы управления асинхронным тяговым двигателем и системы управления с прямым управлением моментом асинхронным тяговым двигателем. Проведен анализ систем управления тяговым усилием электрического тягового привода магистральных электровозов. На основании основных функциональных задач систем управления тяговым усилием произведена декомпозиция систем управления тяговым усилием. Разработана новая классификация способов управления тяговым усилием. На основании анализа теоретических и практических разработок в области тягового привода магистральных электровозов приведены требования к тяговому электрическому приводу магистральных электровозов.

**Ключевые слова:** электровоз, электропривод, тяговый электродвигатель, коэффициент сцепления, тяговое усилие, боксование, векторное управление, асинхронный двигатель

### ВВЕДЕНИЕ

В целях усовершенствования отечественных локомотивов Правительством Российской Федерации намечены перспективы развития транспорта до 2030 года, принята Стратегия развития железнодорожного транспорта. Стратегией предусмотрен выпуск магистральных электровозов нового поколения с асинхронным тяговым двигателем. На сегодняшний день в отечественном локомотивном парке уже имеются современные локомотивы, оснащенные асинхронным тяговым двигателем (электровозы 2ЭС10, 2ЭС7, 2ЭС5). Стоит отметить, что комплекс тягового оборудования на данных электровозах полностью иностранного производства. В связи с этим возрастает актуальность разработки собственного комплекса тягового оборудования. Особый интерес представляют алгоритмы управления тяговым приводом, так как именно от качества алгоритмов управления будут зависеть тяговые характеристики электрического привода.

Данная статья посвящена обзору современных видов тягового электрического привода и алгоритмов управления тяговым приводом магистральных электровозов.

### КОЭФФИЦИЕНТ СЦЕПЛЕНИЯ КОЛЕСА И РЕЛЬСА

Поезда движутся в пределах ограничения сил трения колеса и рельса. Трение представляет собой явление, обусловленное сложными физико-механическими и механико-химическими процессами, протекающими в зонах фактического касания твердых тел, которое зависит от внешних условий, температуры, нагрузки,

шероховатости поверхностей трения, от изменений в третьем теле – пленке, а также от режимов скольжения и тех изменений, которые происходят в процессе скольжения.

Отмечают следующие особенности процесса трения колесной пары и рельса [1, 2]:

- двойственная природа трения;
- дискретность контакта;
- большие напряжения;
- наличие третьего тела;
- высокие температуры;
- кумулятивный характер разрушений.

Получить полное описание протекающих процессов во фрикционном контакте с учетом влияния всех факторов чрезвычайно сложно и избыточно. Однако для разработки системы управления тяговым приводом важно понимать, как образуется сила тяги и как эта сила реализуется.

Рассмотрим принцип возникновения силы тяги подвижного состава [2]. Момент, создаваемый тяговым двигателем, передается через зубчатую передачу на колесную пару, и в точке взаимодействия колеса с рельсом образуется контактное пятно. Контактное пятно делится на две области: область без скольжения и область со скольжением. С увеличением силы тяги область без скольжения уменьшается, а область со скольжением увеличивается. Именно в области со скольжением и образуется сила тяги. Способность области со скольжением реализовывать силу тяги называют коэффициентом сцепления [2].

Важную роль в решении задач математического описания локомотивной тяги играет характеристика сцепления – зависимость коэффициента сцепления

колесной пары от относительной скорости скольжения. Коэффициент сцепления определяется опытным путем по следующему выражению [3]:

$$\psi = \frac{F_K}{G_L}, \quad (1)$$

где  $\psi$  – коэффициент сцепления;  $F_K$  – сила тяги;  $G_L$  – сила тяжести локомотива.

Относительная скорость скольжения определяется как разность между окружной скоростью колесной пары и линейной скоростью подвижного состава [4]:

$$\lambda = \frac{|V_{\text{ОСКП}} - V_L|}{V_L} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где  $V_L$  – линейная скорость локомотива;  $V_{\text{ОСКП}}$  – окружная скорость колесной пары.

Усредненные характеристики коэффициента сцепления представлены на **рис. 1** согласно [5, 6].

В зависимости от положения рабочей точки коэффициента сцепления (см. **рис. 1**) динамические режимы классифицируют на следующие виды [7]:

- квазистационарные режимы – режимы тяги или торможения, в которых рабочая точка находится на восходящем участке;
- нестационарные режимы – режимы тяги или торможения, в которых рабочая точка находится на падающем участке;
- режимы реализации предельных тяговых усилий – режимы работы вблизи максимума характеристики сцепления.

#### ТЯГОВЫЙ ПРИВОД МАГИСТРАЛЬНОГО ЭЛЕКТРОВОЗА

Тяговый привод подвижного состава проектируют на основе расчетной тяговой характеристики локомотива [8] (**рис. 2**). Тяговая характеристика разделена на две зоны: зону с ограничением по сцеплению и зону с ограничением по мощности.

Форму тяговой характеристики в зоне ограничения по сцеплению определяют по выражению

$$F_K = 9,81N\psi_{\text{ТХ}}, \quad (3)$$

где  $N$  – нагрузка на ось;  $\psi_{\text{ТХ}}$  – коэффициент сцепления для расчета тяговой характеристики.

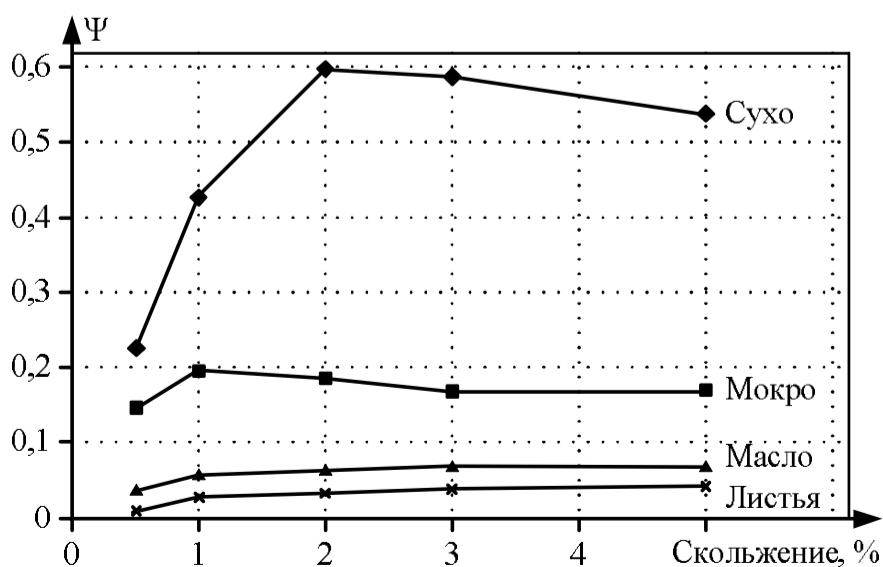


Рис. 1. Зависимость коэффициента сцепления от скорости скольжения

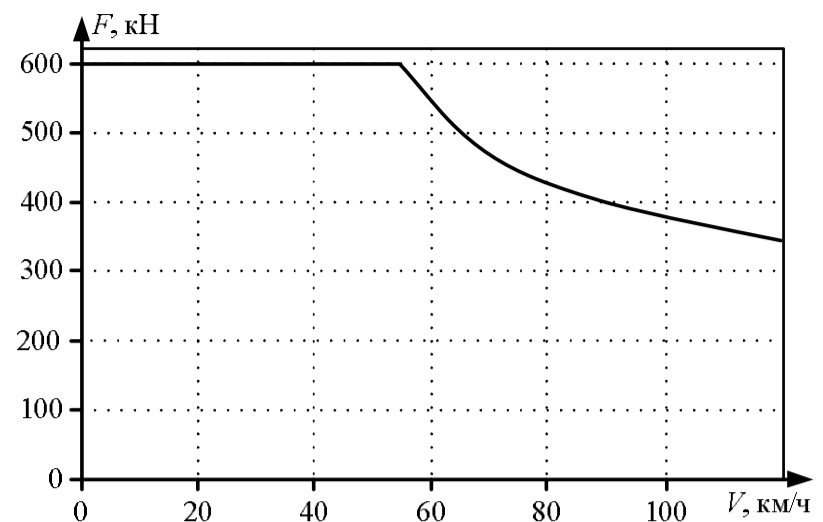


Рис. 2. Тяговая характеристика подвижного состава

При этом коэффициент сцепления тяговой характеристики зависит от скорости движения поезда и определяется по выражению

$$\psi_{\text{ТХ}} = \psi - 0,00168V, \quad (4)$$

где  $M$  – линейная скорость электровоза (секции), км/ч.

Форму тяговой характеристики в зоне ограничения по мощности определяют по выражению

$$F_K = \frac{P_{\text{ДВ}} \eta_{\text{РЕД}} 3,6}{V}, \quad (5)$$

где  $P_{\text{ДВ}}$  – мощность на валу тягового электродвигателя;  $\eta_{\text{РЕД}}$  – КПД редуктора.

Исходя из формы тяговой характеристики, в [9] сформулированы следующие требования к тяговому приводу подвижного состава:

- рабочие характеристики электропривода должны перекрывать всю область тяговой характеристики;
- система автоматического регулирования должна обеспечить работу в длительном режиме в любой точке тяговой области;
- система автоматического регулирования должна обеспечить требуемую жесткость характеристики в случаях наличия боксования.

Дополнительно можно сформулировать следующее требование: электромеханическая постоянная времени электрического привода должна быть такой величины, чтобы изменение момента асинхронного тягового двигателя было быстрее, чем изменение приведенного к валу двигателя момента сцепления.

Под последним требованием понимается, что эквивалентная передаточная функция тягового электропривода имеет вид

$$W_{\text{ЭМ}}(p) = \frac{1}{T_{\text{ЭМ}} p + 1}, \quad (6)$$

где  $T_{\text{ЭМ}}$  – электромеханическая постоянная времени; электромеханическая постоянная времени удовлетворяет условию

$$T_{\text{ЭМ}} < \frac{J_{\text{СУМ}}}{R_K^2 |X|}, \quad (7)$$

где  $J_{\text{СУМ}}$  – суммарный момент инерции, приведенный к оси колесной пары;  $R_K$  – радиус колесной пары по кругу катания;  $X$  – жесткость характеристики сцепления.

Вышеизложенным требованиям к тяговому приводу удовлетворяют следующие известные виды тягового электрического привода:

- тяговый привод с двигателем постоянного тока независимого возбуждения;
- тяговый привод с автономным инвертором напряжения попарного регулирования асинхронными тяговыми электродвигателями;
- тяговый привод с автономным инвертором напряжения индивидуального регулирования асинхронными тяговыми электродвигателями.

В настоящее время тяговый привод с двигателем постоянного тока с независимым возбуждением применяется на отечественных магистральных электровозах серий 2ЭС4 и 2ЭС6. Схема с независимым возбуждением получила распространение за счет высокой жесткости механической характеристики, что особенно важно в случаях возникновения буксования. Регулирование тока возбуждения в таком приводе осуществляется по следующему выражению:

$$I_{в} = I_{вз} + kI_{я}, \quad (8)$$

где  $I_{вз}$  – минимально задаваемое значение тока возбуждения;  $k$  – коэффициент компаундирования обратной связи по току якоря;  $I_{я}$  – ток якоря для группы тяговых двигателей.

Преимуществом такого типа привода является относительная технологическая простота изготовления. К недостаткам такого привода можно отнести наличие щеточно-коллекторного узла и большой расход цветных металлов на единицу мощности. Однако вследствие высоких затрат на обслуживание двигателя данный тип тягового привода вытесняется тяговыми приводами с асинхронными тяговыми двигателями.

Также получила распространение структура тягового привода с автономным инвертором напряжения группового (попарного) регулирования асинхронными тяговыми электродвигателями [10] (рис. 3). В данном типе привода питание двигателей одной тележки локомотива осуществляется от одного автономного инвертора напряжения. Данный тип привода применяется в основном на пассажирских локомотивах. Так, например, такой тип привода применяется на электропоездах серий ЭС2Г и ЭГ2Тв. К преимуществам данного привода относится простота и надежность такой схемы. Однако данная схема не применима на магистральных грузовых электровозах вследствие отсутствия возможности индивидуального управления моментом тяговых двигателей.

Структура тягового привода с автономным инвертором напряжения индивидуального регулирования асинхронными тяговыми электродвигателями представлена на рис. 4.

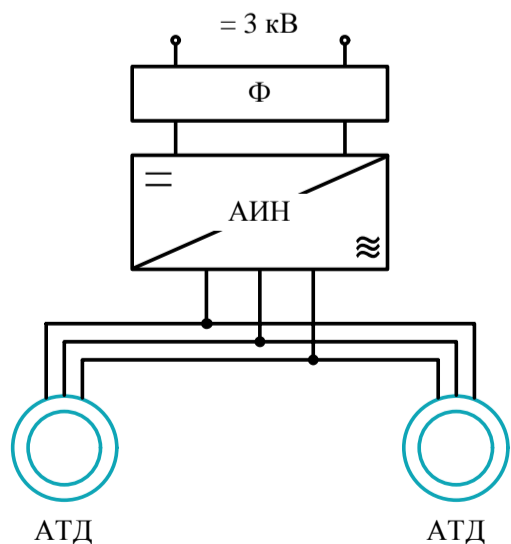


Рис. 3. Структура тягового привода с автономным инвертором напряжения группового (попарного)

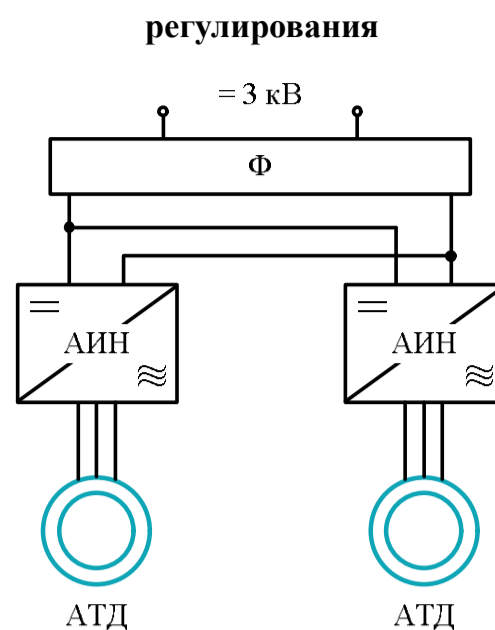


Рис. 4. Структура тягового привода с автономными инверторами напряжения индивидуального регулирования

Главным преимуществом такого типа привода является его высокая автономность и индивидуальное регулирование момента. К недостаткам относятся высокая стоимость и сложность исполнения. Однако недостатки перекрывает возможность индивидуального регулирования момента, которая позволяет реализовывать максимальное тяговое усилие, вследствие чего данная схема получила широкое распространение на магистральных электровозах. Такой тип привода применяется на отечественных электровозах серий 2ЭС10, 2ЭС7, 2ЭВ120 и зарубежных электровозах Siemens Vectron и Siemens Smarton.

#### СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ТЯГОВЫМ ПРИВОДОМ

Система автоматического управления тяговым приводом должна обеспечивать движение в любой точке тяговой характеристики в продолжительном режиме, осуществлять регулирование тягового усилия поезда при существующих ограничениях на ускорение поезда и мощность. Также система автоматического управления тяговым приводом поезда должна обеспечивать достаточный темп снижения или повышения тягового усилия для избегания глубоких буксований и юза колесных пар. Структурная схема системы автоматического управления приведена на рис. 5.

В структурной схеме условно выделены две подсистемы: система управления тяговым усилием и система управления тяговым двигателем [11].

Обычно в качестве систем автоматического управления тяговым двигателем применяют скалярную, векторную систему автоматического управления и систему автоматического управления с прямым управлением моментом.

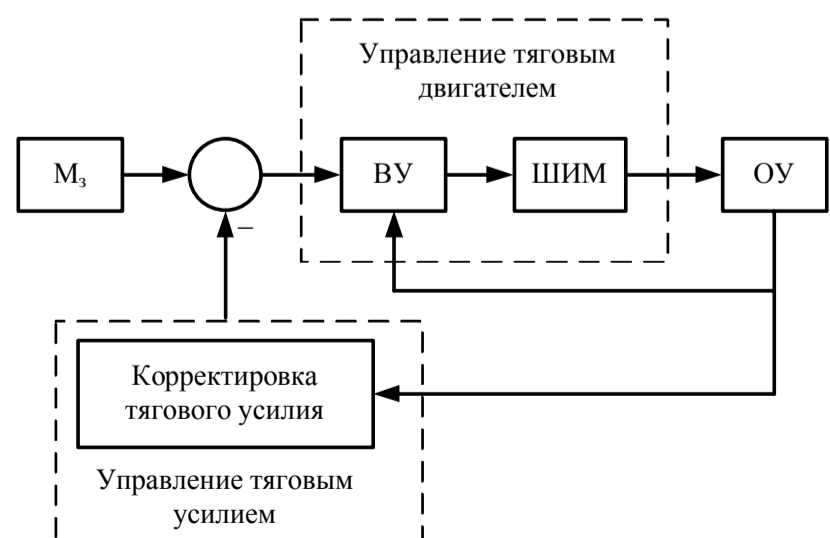




Рис. 5. Структурная схема системы автоматического управления тяговым приводом

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ТЯГОВЫМ ДВИГАТЕЛЕМ

Скалярное управление

Отличительной особенностью скалярной системы управления является то, что к двигателю прилагается напряжение определенной частоты и амплитуды, соотношение между которыми описывается законом или зависимостью [12]. Один из возможных вариантов семейства механических характеристик представлен на рис. 6.

Самым простым и часто применяемым для тягового электрического привода является закон скалярного управления [13]:

$$\frac{U_s}{f_1} = \text{const.} \quad (9)$$

Однако вследствие того, что асинхронный двигатель представляет собой сложную электродинамическую систему, изменение напряжений и частоты следует проводить плавно, чтобы избежать колебательных переходных процессов в токе двигателя. Для устранения колебательных процессов в структуру скалярного управления встроен задатчик интенсивности. Наличие задатчика интенсивности в структуре скалярного управления затрудняет управление в режимах боксования, а главное, увеличивается электромеханическая постоянная времени. Вследствие большой электромеханической постоянной времени привода со скалярной системой управления данная система не применяется на современных локомотивах.

Векторное управление

Впервые принципы работы векторного управления были изложены Феликсом Блашке и Карлом Хассе [14]. Под системой векторного управления понимают системы, работающие при постоянстве потокосцепления ротора. В системе векторного управления регулируются два ортогональных тока – моментобразующий и потокообразующий, за счет этого повышается быстродействие системы управления. Семейство механических характеристик представлено на рис. 7. Также необходимым требованием является то, что система управления должна быть с датчиком угловой частоты вращения вала электродвигателя, так как это увеличивает качество переходных процессов и позволяет достаточно точно регулировать скорость во всем диапазоне скоростей движения [15]. К преимуществам векторного управления можно отнести возможность применения различных вариантов широко-импульсной модуляции. Благодаря своим преимуществам векторную систему управления применяют на локомотивах серий 2ЭС10, 2ЭС7 и ЭС2Г.

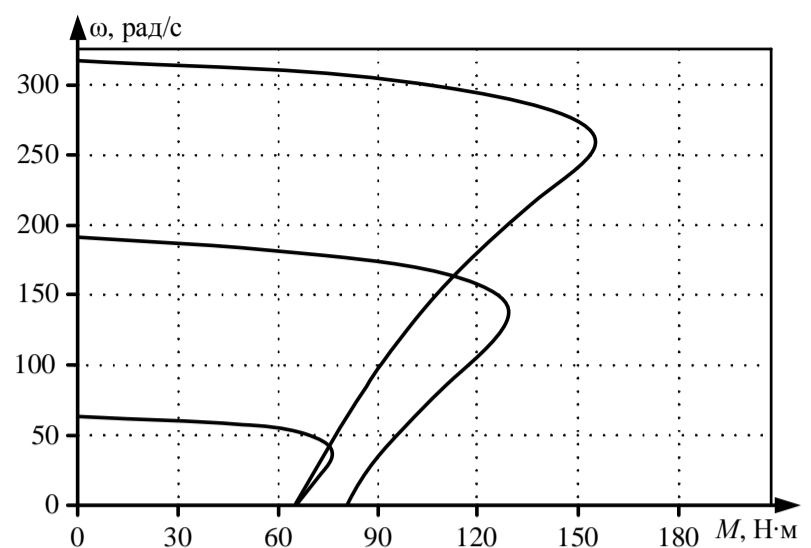


Рис. 6. Механические характеристики скалярной системы управления

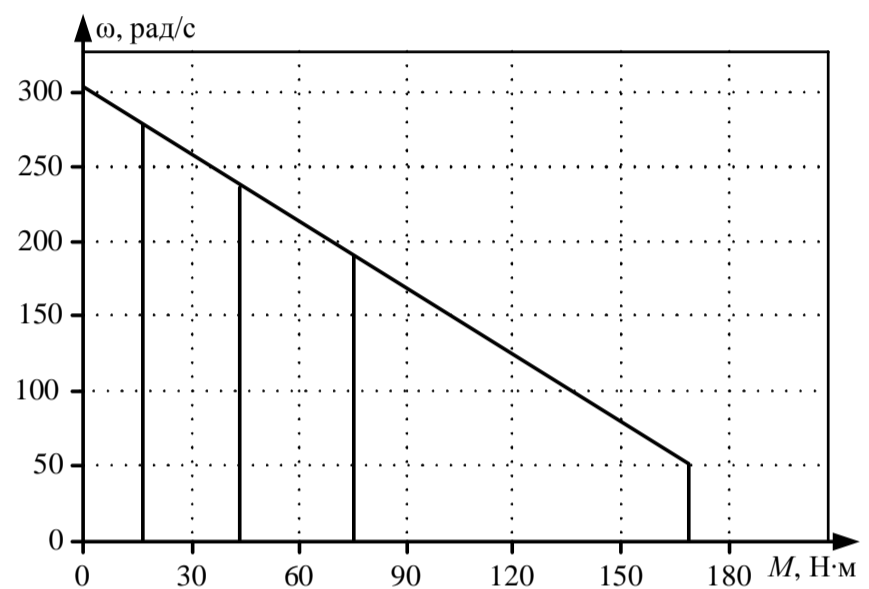


Рис. 7. Механические характеристики системы векторного управления

Прямое управление моментом

Прямое управление моментом было предложено И. Такиши и Т. Ногучи в 1986 году [16]. Основным принципом работы является то, что на основании выходов дискретных регуляторов и таблицы истинности формируются управляющие воздействия на автономный инвертор напряжения [17, 18]. Механическая характеристика представлена на рис. 8.

Безусловно, главным преимуществом системы прямого управления моментом является простота системы и отсутствие необходимости подстройки параметров [19]. Однако главным недостатком является наличие релейных регуляторов, что приводит к повышению пульсаций момента асинхронного тягового двигателя [20].

Стоит отметить, что система векторного управления требует подстройки параметров в процессе работы и достаточно больших вычислительных ресурсов цифровых систем управления, что можно отнести к недостаткам. Однако современный уровень микропроцессорной техники позволяет обеспечить требуемую производительность вычислительного устройства, а робастные алгоритмы управления позволяют компенсировать влияние параметрических возмущений. Практическая применимость векторной системы управления, в совокупности с относительно малыми пульсациями электромагнитного момента, делают эту систему наиболее предпочтительной.

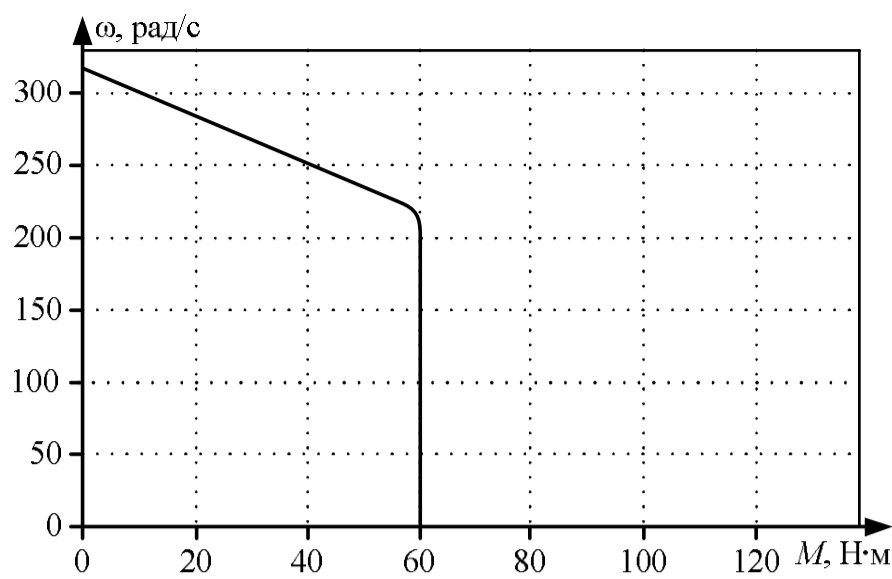


Рис. 8. Механическая характеристика системы управления по структуре прямого управления моментом

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ТЯГОВЫМ УСИЛИЕМ

Цель системы управления тяговым усилием заключается в приближении расчетного коэффициента сцепления  $\psi_p$  к максимуму коэффициента сцепления. Идеализированно цель системы управления можно описать следующим выражением:

$$\psi = \psi_p 0,95. \quad (10)$$

Существует множество различных систем автоматического управления скольжением. Все системы объединяет схожий принцип действия. Упрощенно можно сказать, что все системы автоматического управления тяговым усилием после обнаружения избыточного скольжения, устраняют избыточное скольжение путем снижения тягового усилия. Таким образом удастся избежать процессов глубокого скольжения, износа колесных пар и головки рельса.

Для более детального понимания рассмотрим последовательность алгоритма работы классической системы управления тяговым усилием [21]:

- обнаружение боксования;
- уменьшение момента тягового двигателя;
- обнаружение прекращения боксования;
- повышение момента до расчетной величины;
- повышение момента тягового двигателя до момента задания.

Данный алгоритм работы классической системы управления тяговым усилием требует решения следующих задач:

- определение линейной скорости поезда;
- определение боксования;
- определение расчетного момента;
- определение величины и скорости изменения момента тягового двигателя.

Далее рассмотрим различные способы решения задач системы автоматического управления.

*Определение линейной скорости*

Линейная скорость поезда в системах автоматического управления скольжения необходима для корректного определения скольжения колесной пары. Наиболее простым способом определения линейной скорости является измерение угловой частоты вращения необмотанной оси с последующим ее переводом в окружную скорость. Данный способ применяют на пассажирских поездах, где есть возможность измерения угловой частоты вращения на пассажирских вагонах [21]. К преимуществам такого способа относится простота определения линейной скорости вследствие того, что измеря-

мая ось не участвует в процессе образования тяги, а соответственно, не имеет избыточного скольжения. Главным недостатком такого способа является то, что он не применим к магистральным грузовым локомотивам вследствие отсутствия эксплуатационной и экономической возможности комплектования грузовых вагонов датчиками угловых частот вращения осей.

Наиболее применяемым способом на грузовых магистральных локомотивах является способ определения минимальной угловой частоты из всех измеряемых угловых частот вращения «обматеренных» осей [22].

Преимущество такого способа является относительно точное определение линейной скорости. К недостаткам относится невозможность определения линейной скорости в случае синхронного скольжения обмотеренных осей.

Еще одним способом является измерение линейной скорости по средствам спутниковой навигации GPS или ГЛОНАСС [23]. Преимуществом такого способа является возможность определения линейной скорости на грузовых локомотивах, недостатками – относительно большое время запаздывания сигнала и возможность пропадания сигнала (пропадание сигнала в туннеле).

*Определение начала боксования*

Своевременное определение начала боксования необходимо для подавления процессов избыточного скольжения. В случае неблагоприятного сочетания факторов свободное развитие процесса избыточного скольжения за 1,5–2,5 с может привести к критическим динамическим нагрузкам и поломкам в механической части привода [24, 25]. Существует несколько способов определения боксования:

1. Определение порогового скольжения колесной пары.
2. Определение порогового ускорения колесной пары.
3. Определение скольжения по электрическим параметрам тягового двигателя [26].

Как правило, используют комбинацию первых двух способов в случае датчикового управления тяговым приводом [25]. В случае бездатчикового управления применяют третий способ.

*Определение расчетного момента*

Под определением расчетного момента понимается способ определения максимального момента задания. Корректное определение расчетного момента позволяет достигать максимальной силы тяги по условиям сцепления. равнозначно определению расчетного момента будет определение оптимального скольжения (см. рис. 1). Вследствие того, что эквивалентный момент сцепления не может быть измерен, его вычисляют косвенным путем по выражению [27]

$$M_{\Sigma} = uM_{\Sigma M} - \frac{b}{u}\dot{\theta} - \frac{J_{\Sigma}}{u}\ddot{\theta}, \quad (11)$$

где  $u$  – передаточное число редуктора;  $M_{\Sigma M}$  – электромагнитный момент двигателя;  $\theta$  – угол поворота ротора тягового двигателя;  $b$  – коэффициент вязкости редуктора;  $J_{\Sigma}$  – суммарный момент инерции, приведенный к ротору тягового двигателя.

Из-за наличия шумов в измеренных сигналах скорости и электрических параметров эквивалентный момент сцепления фильтруют. В качестве фильтра могут применяться фильтр нижних частот или фильтр Калмана [28].

Также вследствие нелинейности процесса боксова-

ния в последнее время для определения эквивалентного момента сцепления используют регуляторы нечеткой логики [29].

Разработаны методы определения эквивалентного момента сцепления с применением методов искусственных нейронных сетей [30]. Однако вследствие высоких требований к вычислительным ресурсам цифровых средств управления данные методы еще не получили широкого распространения.

*Определение величины и скорости изменения момента тягового двигателя*

В классической системе управления темп снижения момента тягового двигателя является постоянным:  $\Delta M_{ЭМ}/\Delta t = \text{const}$  [21]. В случае изменения момента с постоянным темпом имеет место недоиспользование тяговых свойств подвижного состава вследствие неучета текущей величины скольжения колесной пары.

Также существуют системы управления с ПИ-регулятором с отрицательной обратной связью по частоте вращения вала тягового двигателя [31]. Данный метод прост в своей реализации, однако требователен к точности вычисления линейной скорости. Стоит отметить, что данный способ управления моментом пришел из автомобильной промышленности.

Еще одним перспективным методом является метод регулирования на основе прогнозирования [32]. Несмотря на наличие работ по данному методу, отсутствуют результаты экспериментов непосредственно на подвижном составе. Также прогнозирование затруднено вследствие влияния большого числа факторов на величину коэффициента сцепления [1, 2].

#### КЛАССИФИКАЦИЯ СПОСОБОВ УПРАВЛЕНИЯ ТЯГОВЫМ УСИЛИЕМ

Исходя из теоретического анализа, авторами предложена следующая классификация способов управления тяговым приводом с асинхронным тяговым приводом в режимах реализации предельных усилий (рис. 9). Классификация основана на том положении, что все способы можно разделить на три функциональные части или подсистемы: определение линейной скорости, определение боксования и регулирование тягового усилия. Причем классификация построена таким образом, что если объединить минимум один подблок из каждого функционального блока, то можно получить целостный способ управления тяговым приводом в режиме реализации предельных усилий. Например, объединив определение линейной скорости по измерению угловой частоты вращения необмотанной оси и определение боксования по пороговой скорости и регулирование с фиксированным темпом снижения без поиска максимума, то получим целостный способ управления тяговым усилием.

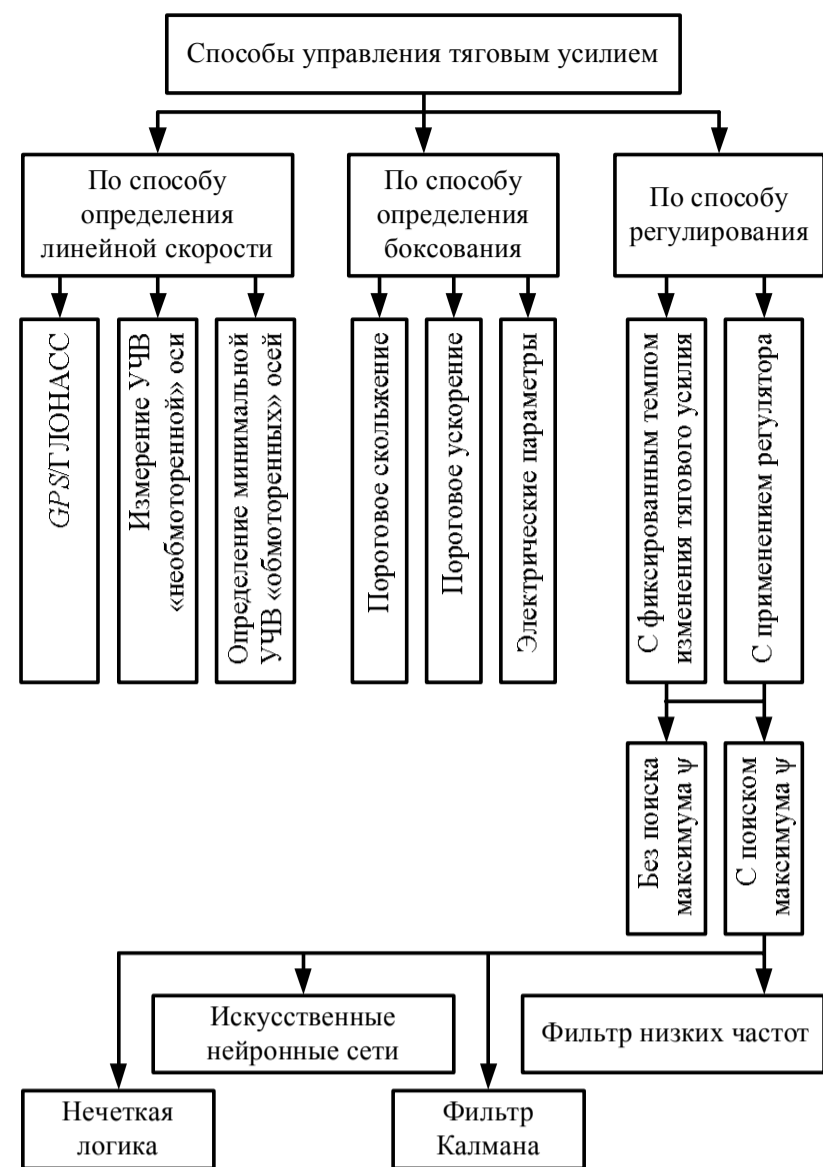


Рис. 9. Классификация способов управления тяговым приводом в режимах предельных усилий

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенного анализа теоретических и практических разработок в области тягового электропривода магистральных электровозов позволяют сделать следующие основополагающие выводы:

- в качестве тягового на современном подвижном составе применяется асинхронный электродвигатель специального исполнения;

- в качестве системы управления асинхронным тяговым электродвигателем на современном подвижном составе применяются системы векторного управления;

- система управления тяговым усилием должна обеспечивать реализацию максимально возможной силы тяги;

- способы управления тяговым электроприводом в режимах предельных усилий являются комбинацией методов определения линейной скорости локомотива, начала режима боксования, регулирования электрических и механических координат электропривода;

- электромеханическая постоянная времени электрического привода должна быть такой величины, чтобы изменение момента асинхронного тягового двигателя было быстрее, чем изменение приведенного к валу двигателя момента сцепления.

Проведенный анализ литературных источников показал, что перспективными для применения в тяговом электроприводе магистрального электровоза являются комбинированные способы управления, сочетающие следующие методы управления тяговым усилием в соответствии с предложенной классификацией:

- способ вычисления линейной скорости по определению минимальной угловой частоты осей, оснащенных тяговыми электродвигателями;

- способ определения боксования по пороговому скольжению в сочетании с определением по пороговому ускорению;
- способ регулирования тягового усилия с применением регуляторов и поиском максимума коэффициента сцепления.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Самме Г.В. Фрикционное взаимодействие колесных пар локомотива с рельсами: монография. М.: Маршрут, 2005. 80 с.
2. Lewis R., Olofsson U. Wheel-rail interface handbook. Replica Press Pvt Ltd, 2009. 818 p.
3. Розенфельд В.Е., Исаев И.П., Сидоров Н.Н. Теория электрической тяги. М.: Транспорт, 1983. 328 с.
4. Identification of a Nonlinear Wheel/Rail Adhesion Model for Heavy-Duty Locomotives / J. He, G. Liu, J. Liu, C. Zhang, X. Cheng // IEEE Access. 2018. Vol. 6. Pp. 50424-50432. doi: 10.1109/ACCESS.2018.2868177
5. Hybrid re-adhesion control method for traction system of high-speed railway. / D.Y. Park, M.S. Kim, D.H. Hwang, J.H. Lee, Y.J. Kim // Proceedings of the Fifth International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). IEEE, 2001. Pp. 739-742. doi: 10.1109/ICEMS.2001.971782
6. Andreas S. Electric traction—motion power and energy supply: basics and practical Experience. Oldenbourg Industrieverlag GmbH, 2014. 416 p.
7. Павленко А.П. Динамика тяговых приводов магистральных локомотивов. М.: Машиностроение, 1991. 192 с.
8. Spiriyagin M., Cole C., Sun Y.Q., McClanachan M., Spiriyagin V., McSweeney T. Design and Simulation of Rail Vehicles. Boca Raton: CRC Press, 2014. 337 p. doi: 10.1201/b17029
9. Ротанов Н.А. Электроподвижной состав с асинхронными тяговыми двигателями. М.: Транспорт, 1991. 329 с.
10. Brenna M., Foadelli F., Zaninelli D. Electrical Railway Transportation Systems. Wiley-IEEE Press, 2018. 622 p.
11. Novel anti-slip/slide control algorithm for Korean high-speed train / H.J. Ryoo, S.J. Kim, G.H. Rim, Y.J. Kim, M.S. Kim // 29th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON). IEEE, 2003. Pp. 2570-2574. doi: 10.1109/IECON.2003.1280651
12. Pati S., Patnaik M., Panda A. Comparative performance analysis of fuzzy PI, PD and PID controllers used in a scalar controlled induction motor drive // International Conference on Circuits, Power and Computing Technologies (ICCPCT). IEEE, 2014. Pp. 904-909. doi: 10.1109/ICCPCT.2014.7054799
13. Srilad S., Tunyasirirut S., Suksri T. Implementation of a Scalar Controlled Induction Motor Drives // SICE-ICASE International Joint Conference. IEEE, 2006. Pp. 3605-3610. doi: 10.1109/SICE.2006.314749
14. Blaschke F. The principle of field-orientation as applied to the transvector closed loop control system for rotating-field machines // Siemens Rev. 1972. Vol. 34 (1). Pp. 217-220.
15. Ключников А.Т., Турпак А.М. Бездатчиковое векторное управление асинхронным двигателем при расчёте в комплексной форме // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. 2020. № 33. С. 160-176. doi: 10.15593/2224-9397/2020.1.10
16. Takahashi I., Noguchi T. A new quick-response and high-efficiency control strategy of induction motors // IEEE Transactions on Industry Applications. 1986. Vol. 22(5). Pp. 820-827. doi: 10.1109/TIA.1986.4504799
17. Improved Performance of CFTC-based Direct Torque Control of Induction Machines by Increasing Torque Loop Bandwidth / I.M. Alsofyani, J.H. Lee, B.M. Han, K.B. Lee // International Power Electronics Conference (IPEC). IEEE, 2018. Pp. 466-470. doi: 10.23919/IPEC.2018.8507989
18. Ludtke I., Jayne M.G. Direct torque control of induction motors // IEE Colloquium on Vector Control and Direct Torque Control of Induction Motors. IET, 1995. Pp. 6/1-6/6. doi: 10.1049/ic:19951113
19. Симонович А.В., Петренко Ю.Н. Прямое управление моментом асинхронного привода троллейбуса // Инновационные технологии, автоматизация и мехатроника в машино- и приборостроении: материалы международной научно-практической конференции. Минск, 2012. С. 157-158.
20. Карандеев Д.Ю., Энгель Е.А. Прямое управление моментом асинхронного двигателя с использованием адаптивного нейроконтроллера в условиях неопределенности // Науковедение. 2015. №5. С. 1-7.
21. The proposal of re-adhesion control method with the advantage of individual control system / O. Yamazaki, S. Fukasawa, S. Ohashi, K. Kondo // International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles (ESARS). IEEE, 2015. Pp. 1-6. doi: 10.1109/ESARS.2015.7101510
22. Improvement of re-adhesion for commuter trains with vector control traction inverter / I. Yasuoka, T. Henmi, Y. Nakazawa, I. Aoyama // Proceedings of Power Conversion Conference (PCC). IEEE, 1997. Pp. 51-56. doi: 10.1109/PCCON.1997.645585
23. Hahn J-O., Rajamani R., Alexander L. Gps-based real-time identification of tire-road friction coefficient // IEEE Transactions on Control Systems Technology. 2002. Vol. 10(3). Pp. 331-343. doi: 10.1109/87.998016
24. Минов Д.К. Повышение тяговых свойств электровозов и тепловозов с электрической передачей. М.: Транспорт, 1965. 267 с.
25. Моделирование системы управления тягой и торможением магистрального грузового тепловоза в программных комплексах Matlab и «Универсальный механизм» / Г.А. Федяева, В.В. Кобищанов, С.Ю. Матюшков, А.Н. Тарасов // Вестник Брянского государственного технического университета. 2013. № 3. С. 147-151.
26. Advanced anti-slip and anti-skid re-adhesion control considering Air Brake for Electric Train / S. Kadowaki, K. Ohishi, T. Hata, T. Sano, S. Yasukawa // European Conference on Power Electronics and Applications. IEEE, 2005. Pp. 1-10. doi: 10.1109/EPE.2005.219367
27. Taking Traction Control to Task: High-Adhesion-Point Tracking Based on a Disturbance Observer in Railway Vehicles / L. Diao, L. Zhao, Z. Jin, L. Wang, S.M. Sharkh // IEEE Industrial Electronics Magazine. 2012. Vol. 11(1). Pp. 51-62. doi: 10.1109/MIE.2016.2644699
28. Pichlik P. Implementations of UKF and EKF for Wheel Slip Control Purpose to Locomotive Computer // International Conference on Applied Electronics (AE). IEEE, 2018. Pp. 1-4. doi: 10.23919/AE.2018.8501444
29. Garcia-Rivierav M., Sanz R., Perez-Rodriguez J.A. An anti-slipping fuzzy logic controller for a railway traction system // Proceedings of the Sixth IEEE International Conference on Fuzzy Systems. IEEE, 1997. Pp. 119-124. doi: 10.1109/FUZZY.1997.616355
30. Gadjar T., Rudas I., Suda Y. Neural network based estimation of friction coefficient of wheel and rail // IEEE International Conference on Intelligent Engineering Systems. IEEE, 1997. Pp. 315-318. doi: 10.1109/INES.1997.632437
31. Anti-slip control system of Korean High-Speed Train / D.H. Hwang, M.S. Kim, J.W. Jeon, J.H. Lee, D.Y. Park, Y.J. Kim, H.J. Ryoo, J.S. Kim // Computers in Railways VII. 2000. Pp. 613-622. doi: 10.2495/CR000591
32. Moaveni B., Fathabadi F.R., Molavi A. Supervisory Predictive Control for Wheel Slip Prevention and Tracking of Desired Speed Profile in Electric Trains // ISA Transactions. 2020. Vol. 101. Pp. 102-115. doi: 10.1016/j.isatra.2020.01.011

INFORMATION IN ENGLISH

PRINCIPLES AND METHODS OF ELECTRIC POWER DRIVE TRACTION CONTROL IN ELECTRIC LOCOMOTIVE

Ildar R. Kharisov

Postgraduate Student, Department of Mining Enterprises Electrification, Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia. E-mail: bbbildar@rambler.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5078-0533>

Alexander L. Karyakin

D. Sc. (Engineering), Professor, Department of Mining Enterprises Electrification, Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia. E-mail: karyakin.a@ursmu.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6196-3263>

The article provides an overview of methods for controlling the traction electric drive of electric locomotives in the modes of maximum traction forces. The features of the wheel and rail friction process are considered. The dependences of the adhesion coefficient on the sliding of the wheelset are given considering weather conditions and the presence of third bodies in the contact zone between the wheel and the rail. The dynamic modes classification of the electric drive depending on the position of the operating point of the adhesion coefficient is given. The basic principles of constructing the calculated traction characteristics of the main electric locomotive are given. Based on the calculated traction characteristics, the requirements for the traction electric drive of mainline electric locomotives are formulated. The analysis of modern types of traction electric drive used on mainline electric locomotives is carried out. An electric traction drive with a DC motor with independent excitation, an electric traction drive with an autonomous voltage inverter with pairwise regulation of induction traction motors and an electric traction drive with an autonomous voltage inverter with individual regulation of asynchronous traction motors are considered. The control systems of a traction asynchronous motor are considered. The mechanical characteristics of a scalar control system for an asynchronous traction motor, a field oriented control system for an induction traction motor and a control system with direct torque control for an induction traction motor are given. The analysis of control systems for the traction force of the electric traction drive of the electric locomotives is carried out. Based on the main functional tasks of traction control systems, the decomposition of traction control systems was carried out. A new classification of traction force control methods has been developed. Based on the analysis of theoretical and practical developments in the field of traction drive of mainline electric locomotives, the requirements for the traction electric drive of mainline electric locomotives are given.

**Keywords:** electric locomotive, electric drive, traction motor, friction coefficient, traction force, wheel slip, field-oriented control, induction motor

REFERENCES

1. Samme G.V. *Friktsionnoe vzaimodeystvie kolesnykh par lokomotiva s relsami* [Frictional interaction of wheel pairs of a locomotive with rails]. Moscow, Marshrut Publ., 2005. 80 p. (In Russian)
2. Lewis R., Olofsson U. *Wheel-rail interface handbook*. Replica Press Pvt Ltd, 2009. 818 p.
3. Rozenfeld V.E., Isaev I.P., Sidorov N.N. *Teoriya elektricheskoy tyagi* [Electric traction theory]. Moscow, Transport Publ., 1983. 328 p. (In Russian)
4. He J., Liu G., Liu J., Zhang C., Cheng X. Identification of a Nonlinear Wheel/Rail Adhesion Model for Heavy-Duty Locomotives. *IEEE Access*. 2018, vol. 6, pp. 50424-50432. doi: 10.1109/ACCESS.2018.2868177
5. Park D.Y., Kim M.S., Hwang D.H., Lee J.H., Kim Y.J., Hybrid re-adhesion control method for traction system of high-speed railway. (ICEMS). *IEEE*, 2001, pp. 739-742. doi: 10.1109/ICEMS.2001.971782
6. Andreas S. *Electric traction—motion power and energy supply: basics and practical Experience*. Oldenbourg Industrieverlag GmbH, 2014. 416 p.
7. Pavlenko A.P. *Dinamika tyagovykh privodov magistralnykh lokomotivov* [Electric traction theory]. Moscow, Machine building Publ., 1991. 192 p. (In Russian)
8. Spiryagin M., Cole C., Sun Y.Q., McClanachan M., Spiryagin V., McSweeney T. *Design and Simulation of Rail Vehicles*. CRC Press, 2014. 337 p. doi: 10.1201/b17029
9. Rotanov N.A. *Elektropodvizhnoy sostav s asinkhronnymi tyagovymi dvigatelyami* [Electric rolling stock with induction traction motors]. Moscow, Transport Publ., 1991. 329 p. (In Russian)
10. Brenna M., Foadelli F., Zaninelli D. *Electrical Railway Transportation Systems*. Wiley-IEEE Press, 2018. 622 p.
11. Ryoo H.J., Kim S.J., Rim G.H., Kim Y.J., Kim M.S. Novel anti-slip/slide control algorithm for Korean high-speed train. (IECON). *IEEE*, 2003, pp. 2570-2574. doi: 10.1109/IECON.2003.1280651
12. Pati S., Patnaik M., Panda A. Comparative performance analysis of fuzzy PI, PD and PID controllers used in a scalar controlled induction motor drive. *International Conference on Circuits, Power and Computing Technologies. (ICCPCT)*. *IEEE*, 2014, pp. 904-909. doi: 10.1109/ICCPCT.2014.7054799
13. Srilad S., Tunnyasrirut S., Suksri T. Implementation of a Scalar Controlled Induction Motor Drives. *SICE-ICASE International Joint Conference*. *IEEE*, 2006, pp. 3605-3610. doi: 10.1109/SICE.2006.314749
14. Blaschke F. The principle of field-orientation as applied to the transvector closed loop control system for rotating-field machines. *Siemens Rev.* 1972, vol. 34(1), pp. 217–220.
15. Klyuchnikov A.T., Turpak A.M. Sensorless vector control asynchronous motor when a calculating a complex form. *Vestnik PNIPU [Vestnik of PNIPU]*, 2020, no. 33, pp. 160-176. (In Russian) doi: 10.15593/2224-9397/2020.1.10
16. Takahashi I., Noguchi T. A new quick response and high efficiency control strategy of induction motors. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 1986, vol. 22(5), pp. 820–827. doi: 10.1109/TIA.1986.4504799
17. Alsofyani I.M., Lee J.H., Han B.M., Lee K.B. Improved Performance of CFTC-based Direct Torque Control of Induction Machines by Increasing Torque Loop Bandwidth. *International Power Electronics Conference (IPEC)*. *IEEE*, 2018, pp. 466-470. doi: 10.23919/IPEC.2018.8507989
18. Ludtke I., Jayne M.G. Direct torque control of induction motors. *IEE Colloquium on Vector Control and Direct Torque Control of Induction Motors*. *IET*, 1995, pp. 6/1-6/6. doi: 10.1049/ic:19951113
19. Simonovich A.V., Petrenko Yu.N. Direct torque control of asynchronous trolleybus drive. *Innovatsionnye tekhnologii*,

- avtomatizatsiya i mekhatronika v mashino- i priborostroenii: materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Materials of the international scientific and practical conference "Innovative technologies, automation and mechatronics in machine and instrument making"]. Minsk, Biznesofset Publ., 2012, pp. 157-158. (In Russian)
20. Karandeev D.Y., Engel E.A. Direct control of the torque of an induction motor using an adaptive neurocontroller under uncertainty. *Naukovedenie* [Research on research], 2015, no. 5, pp. 1-7. (In Russian)
  21. Yamazaki O., Fukasawa S., Ohashi S. The proposal of re-adhesion control method with the advantage of individual control system. (ESARS). IEEE, 2015, pp. 1-6. doi: 10.1109/ESARS.2015.7101510
  22. Yasuoka I., Henmi T., Nakazawa Y. Improvement of re-adhesion for commuter trains with vector control traction inverter. IEEE, 1997, pp. 51-56. doi: 10.1109/PCCON.1997.645585
  23. Hahn J-O., Rajamani R., Alexander L. Gps-based real-time identification of tire-road friction coefficient. IEEE Transactions on Control Systems Technology. 2002, vol. 10(3), pp. 331-343. doi: 10.1109/87.998016
  24. Minov D.K. *Povyshenie tyagovykh svoystv elektrovozov i teplovozov s elektricheskoy peredachey* [Improving the traction properties of electric locomotives and diesel locomotives with electric transmission]. Moscow, Transport Publ., 1965, 267 p. (In Russian)
  25. Fedyaeva G.A., Kobishchanov V.V., Matyushkov S.Yu., Tarasov A.N. Modeling of control system of traction and braking mainline freight locomotives in software systems Matlab and «Universal mechanism». *Vestnik BGTU* [Vestnik of BGTU], 2013, no. 3, pp. 147-151. (In Russian)
  26. Kadowaki S., Ohishi K., Hata T., Sano T., Yasukawa S. Advanced anti-slip and anti-skid re-adhesion control considering Air Brake for Electric Train. European Conference on Power Electronics and Applications. IEEE, 2005, pp. 1-10. doi: 10.1109/EPE.2005.219367
  27. Diao L., Zhao L., Jin Z. Taking Traction Control to Task: High-Adhesion-Point Tracking Based on a Disturbance Observer in Railway Vehicles. IEEE Industrial Electronics Magazine. 2012, vol. 11(1), pp. 51-62. doi: 10.1109/MIE.2016.2644699
  28. Pichlik P. Implementations of UKF and EKF for Wheel Slip Control Purpose to Locomotive Computer. International Conference on Applied Electronics (AE). IEEE, 2018, pp. 1-4. doi: 10.23919/AE.2018.8501444
  29. Garcia-Rivierav M., Sanz R., Perez-Rodríguez J.A. An anti-slipping fuzzy logic controller for a railway traction system. Proceedings of the Sixth IEEE International Conference on Fuzzy Systems. IEEE, 1997, pp. 119-124. doi: 10.1109/FUZZY.1997.616355
  30. Gadjar T., Rudas I., Suda Y. Neural network based estimation of friction coefficient of wheel and rail. IEEE International Conference on Intelligent Engineering Systems. IEEE, 1997, pp. 315-318. doi: 10.1109/INES.1997.632437
  31. Hwang D.H., Kim M.S., Jeon J.W. Anti-slip control system of Korean High-Speed Train. Computers in Railways VII. 2000, pp. 613-622. doi: 10.2495/CR00059
  32. Moaveni B. Supervisory Predictive Control for Wheel Slip Prevention and Tracking of Desired Speed Profile in Electric Trains. ISA Transactions. 2020, vol. 101, pp. 102-115. doi: 10.1016/j.isatra.2020.01.011

Харисов И.Р., Карякин А.Л. Законы и способы управления тяговым усилием электроприводов магистрального // Электротехнические системы и комплексы. 2022. № 4(57). С. 60-68. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-4\(57\)-60-68](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-4(57)-60-68)

Kharisov I.R., Karyakin A.L. Principles and Methods of Electric Power Drive Traction Control in Electric Locomotive. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2022, no. 4(57), pp. 60-68. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-4\(57\)-60-68](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-4(57)-60-68)

## МОДЕЛИРОВАНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЦЕНТРОБЕЖНЫХ ВЕНТИЛЯТОРОВ С ОСЕВЫМ НАПРАВЛЯЮЩИМ АППАРАТОМ

Центробежные вентиляторы с высоковольтными асинхронными электроприводами потребляют значительную долю электроэнергии различных производственных объектов. При этом большинство вентиляторных установок работают с перерасходом электроэнергии. Снижение перерасхода электроэнергии возможно при регулировании производительности вентиляторов по потребностям производства. Выбор наиболее энергоэффективного способа требует исследования математической модели, учитывающей все значимые свойства объекта. В работе рассмотрена математическая модель центробежного вентилятора, построенная на основе его паспортных аэродинамических характеристик. Создание модели обусловлено необходимостью решения задачи оптимального управления мощными промышленными вентиляторами по критерию минимума потребления электроэнергии. Решение этой задачи требует теоретического исследования различных способов регулирования производительности вентиляторов и выбора наиболее энергоэффективного способа для данных условий эксплуатации. В работе обоснована необходимость модификации известных аппроксимирующих аэродинамические характеристики функций, которые не учитывают возможность регулирования производительности вентиляторов с помощью осевого направляющего аппарата. Представлено аналитическое описание аэродинамических характеристик мощного вентилятора с помощью степенных полиномов трех переменных, учитывающих возможность исследования энергоэффективности вентиляторов при частотном регулировании, дросселировании и регулировании с помощью осевого направляющего аппарата. Приведено описание модели в компактной матричной форме и указаны границы её применимости. Получена функция энергоэффективности, которая является целевой функцией для решения задачи оптимального управления производительностью вентиляторов. Максимум функции энергоэффективности определяет оптимальный режим работы вентилятора по критерию минимума потребления электроэнергии. Функция позволяет определять диапазон скорости вентилятора и угла поворота лопаток осевого направляющего аппарата, соответствующих области энергоэффективного регулирования производительности вентилятора.

**Ключевые слова:** центробежный вентилятор, аэродинамические характеристики, энергоэффективность, регулирование производительности, осевой направляющий аппарат

### ВВЕДЕНИЕ

Вентиляторы входят в широкий класс машин, называемых турбомеханизмами, и являются неотъемлемой частью многих технологических установок горнодобывающей, металлургической, химической промышленности и энергетики. Вентиляторы являются одним из главных потребителей всей вырабатываемой в мире электроэнергии. Наибольшее распространение имеют центробежные вентиляторы, оснащенные асинхронными электроприводами. Актуальной проблемой является обеспечение режимов работы мощных вентиляторных агрегатов, обеспечивающих их энергоэффективную эксплуатацию. Это связано с тем, что асинхронные электроприводы вентиляторов обычно изначально проектируются как нерегулируемые, что не позволяет изменять производительность вентиляторов за счет регулирования скорости их вращения. Это приводит к перерасходу электроэнергии, который может достигать десятков процентов [1]. Особенно актуальна эта проблема для мощных промышленных вентиляторов, оснащенных высоковольтными асинхронными электроприводами.

Повышение энергоэффективности возможно за счет создания системы автоматизированного управления (САУ), обеспечивающей контроль ключевых параметров технологического участка и вырабатывающей управляющие сигналы для средств регулирования

производительности вентиляторов в зависимости от потребностей производства. Таким образом, функцией САУ является оптимизация работы вентиляторных агрегатов по критерию минимума потребления электроэнергии. Это требует создания математической модели объекта, которая с необходимой степенью достоверности отражает его основные свойства.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В зависимости от условий эксплуатации возможны различные способы регулирования производительности вентиляторов [2]: частотное регулирование, дросселирование на стороне нагнетания, изменение угла поворота лопаток осевого направляющего аппарата (ОНА), комбинация способов. При параллельной работе вентиляторов в составе воздуходувной станции дополнительно появляется возможность регулирования суммарной производительности за счет изменения количества работающих вентиляторов.

Задача выбора наиболее энергоэффективного способа не имеет решения в общем виде. Определение такого способа возможно только при проведении сравнительного анализа, учитывающего особенности работы вентиляторных установок в конкретных условиях эксплуатации [3, 4]. Сравнительный анализ рационально проводить, исследуя математические модели, отражающие значимые характеристики вентилятора и сети воздухопроводов [5]. При этом наибольшую ценность как для сравнительного анализа, так и для построения САУ имеют аналитические модели, в основе которых лежит теоретическое или эмпирическое описание объекта.

В работе решается задача создания аналитической математической модели вентилятора на основе достоверных и доступных исходных данных, а именно на паспортных параметрах и характеристиках вентилятора.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Основные рабочие свойства вентилятора определяются его аэродинамическими характеристиками – экспериментальными графическими зависимостями давления  $H$ , мощности  $P$  и коэффициента полезного действия  $\eta$  от производительности  $Q$  при номинальной частоте вращения  $\omega$  рабочего колеса [6]. На **рис. 1** и **2** приведены типичные аэродинамические характеристики мощного центробежного вентилятора, оснащенного осевым направляющим аппаратом [7].

Установившийся режим вентилятора определяется положением рабочей точки на зависимости давления от производительности (см. **рис. 1**). Механическая мощность на валу вентилятора, требуемая для обеспечения рабочего режима, может быть определена по известной производительности из характеристик на **рис. 2**. На обеих характеристиках каждая кривая соответствует некоторому фиксированному углу поворота лопаток ОНА. Параметры рабочей точки однозначно определяют полезную мощность вентилятора, то есть мощность потока воздуха на выходе из вентилятора и его КПД. Далее по известным параметрам асинхронного электропривода могут быть определены потребляемая электрическая мощность, КПД двигателя и вентиляторного агрегата в целом [3].

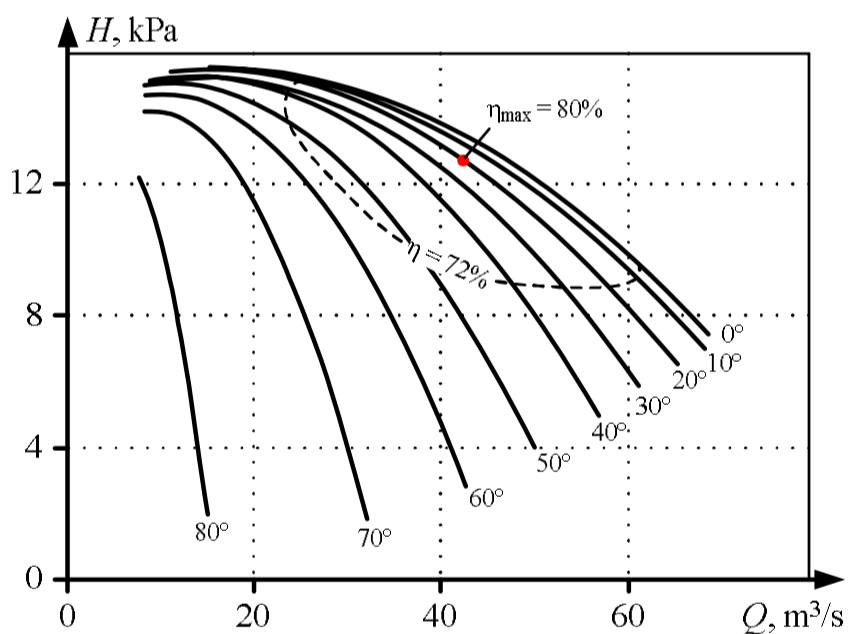


Рис. 1. Напорная характеристика вентилятора ВВН-20

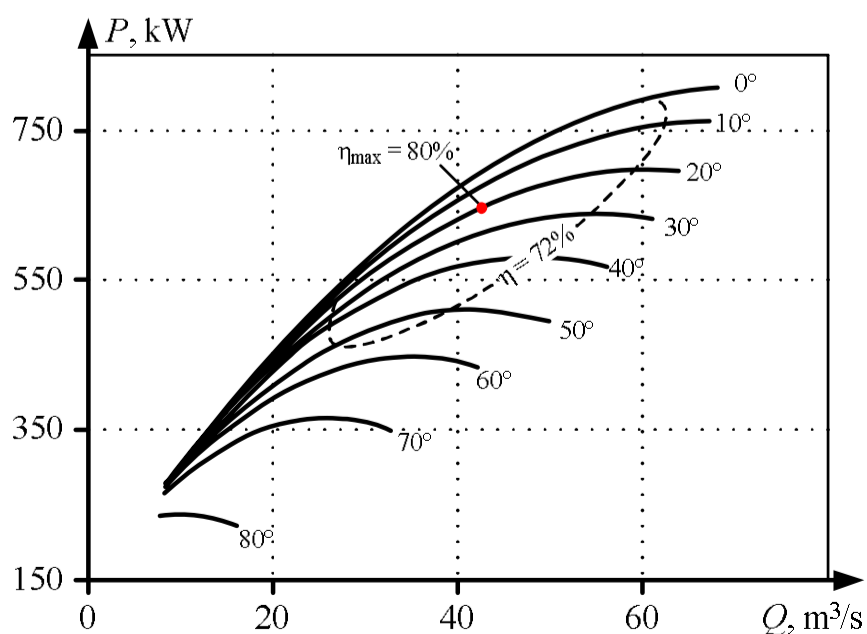


Рис. 2. Характеристика мощности вентилятора ВВН-20

Таким образом, аэродинамические характеристики являются первичными исходными данными для создания математической модели вентилятора, работающего в установившемся режиме. Значимость анализа установившихся режимов определяется тем, что для вентиляторов, как и для большинства турбомеханизмов, характерным является длительный режим работы с отсутствием перегрузок, реверсов и торможений. Поэтому именно установившийся режим определяет энергоэффективность вентиляторного агрегата.

Существуют различные подходы к моделированию характеристик турбомеханизмов и технологических систем, их включающих [8-11]. Наиболее наглядны и удобны для аналитического описания аэродинамических характеристик уравнения, которые выводятся из теории турбомеханизмов [12]:

$$H = a_1 Q^2 + b_1 \omega Q + c_1 \omega^2, \tag{1}$$

$$P = a_2 \omega Q^2 + b_2 \omega^2 Q + c_2 \omega^3, \tag{2}$$

где  $H$  – напор вентилятора, Па;  $Q$  – производительность, м<sup>3</sup>/с;  $P$  – механическая мощность на валу, Вт;  $\omega$  – скорость вращения вентилятора, рад/с;  $a_1, b_1, c_1, a_2, b_2, c_2$  – размерные коэффициенты, постоянные для фиксированного угла поворота лопаток ОНА.

Приведенные уравнения позволяют с точностью, достаточной для инженерных расчетов, аппроксимировать графические характеристики турбомеханизмов, не имеющих седлообразного участка. Уравнения являются основой математической модели для анализа режимов работы турбомеханизмов при регулировании скорости вращения  $\omega$  и дросселировании. Однако для мощных промышленных вентиляторов такая модель является неполной, поскольку не учитывает возможность регулирования производительности с помощью ОНА.

Одним из путей расширения границ применимости модели на основе выражений (1), (2) является представление коэффициентов  $a_1, b_1, c_1, a_2, b_2, c_2$  в виде функций угла поворота лопаток ОНА. В **табл. 1** приведены значения коэффициентов уравнений (1), (2), полученные методом наименьших квадратов для каждой кривой напорной характеристики и характеристики мощности.

На **рис. 3-8** показан характер изменения коэффициентов  $a_1, b_1, c_1, a_2, b_2, c_2$  в зависимости от угла поворота лопаток ОНА.

Таблица 1  
Коэффициенты уравнений аэродинамических характеристик

$\alpha$ , град	$a_1, \frac{\text{кг}}{\text{м}^7}$	$b_1, \frac{\text{кг}}{\text{м}^4}$	$c_1, \frac{\text{кг}}{\text{м}}$	$a_2, \frac{\text{кг}}{\text{м}^4}$	$b_2, \frac{\text{кг}}{\text{м}}$	$c_2, \text{кг} \cdot \text{м}^2$
0°	-2,959	0,6247	0,5937	-0,8412	0,7730	0,03159
10°	-2,927	0,5294	0,6067	-0,8826	0,7599	0,03337
20°	-3,364	0,5810	0,6047	-0,9846	0,7589	0,03386
30°	-4,442	0,8665	0,5741	-1,080	0,7510	0,03417
40°	-5,666	1,036	0,5715	-1,247	0,7602	0,0339
50°	-7,359	1,061	0,5711	-1,355	0,7186	0,03628
60°	-11,18	1,457	0,5489	-1,559	0,6944	0,03778
70°	-23,26	2,709	0,4978	-2,135	0,6961	0,03734
80°	-113,8	7,509	0,4015	-2,469	0,3044	0,05158



Приведенные зависимости существенно нелинейны. Наиболее точным способом их представления является аппроксимация кубическими сплайнами [13]. Такое представление обеспечивает полное совпадение с исходными дискретными точками табл. 1 и высокую точность интерполяции промежуточных значений зависимостей на рис. 3-8.

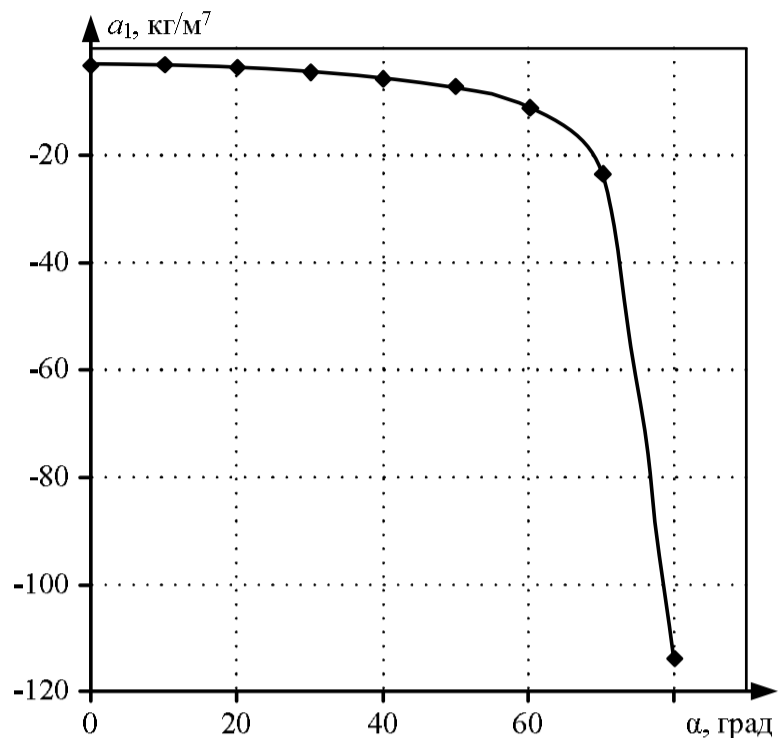


Рис. 3. Зависимость коэффициента  $a_1$  от угла  $\alpha$

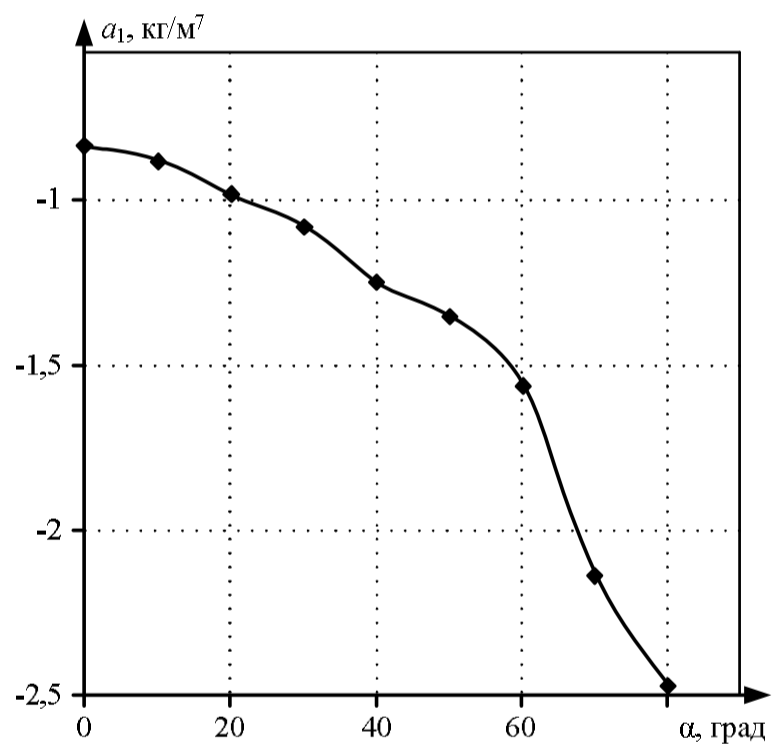


Рис. 4. Зависимость коэффициента  $a_2$  от угла  $\alpha$

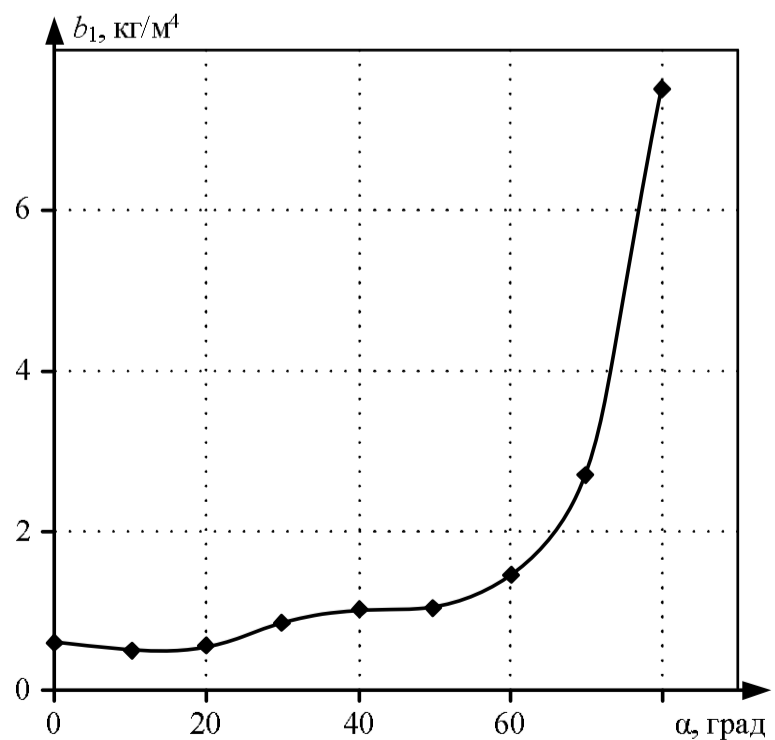


Рис. 5. Зависимость коэффициента  $b_1$  от угла  $\alpha$

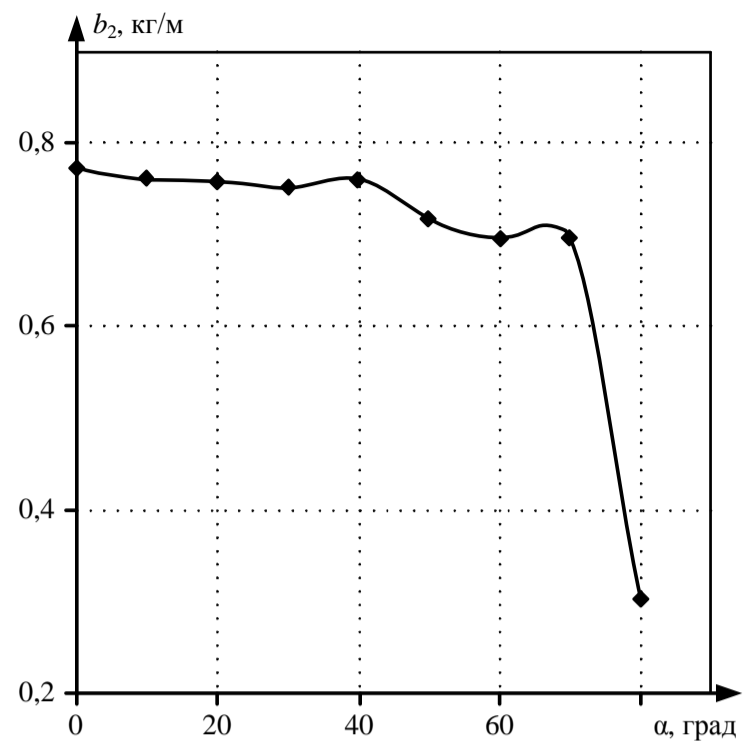


Рис. 6. Зависимость коэффициента  $b_2$  от угла  $\alpha$

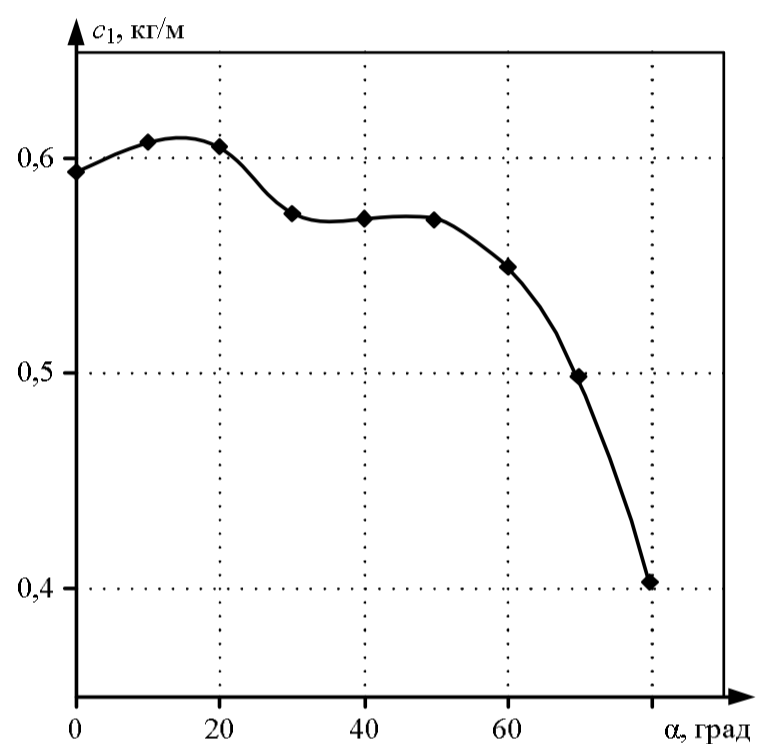


Рис. 7. Зависимость коэффициента  $c_1$  от угла  $\alpha$

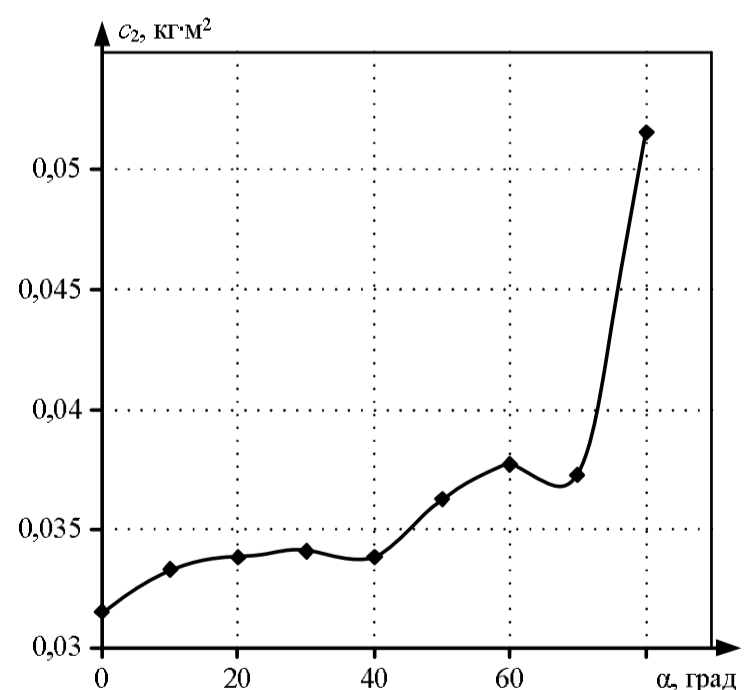


Рис. 8. Зависимость коэффициента  $c_2$  от угла  $\alpha$

Современные промышленные контроллеры ведущих фирм-производителей имеют модули расширения, позволяющие реализовывать сплайн-интерполяцию на уровне непосредственного управления технологическим процессом [14]. Однако представление графических характеристик сплайнами лишает их наглядности и ограничивает возможности теоретического анализа аналитических уравнений.

Стандартным решением является аппроксимация нелинейных графических зависимостей степенными полиномами различных порядков. Исследования показывают, что зависимости на **рис. 3-8** не могут быть аппроксимированы таким способом с приемлемой точностью во всем диапазоне изменения угла поворота лопаток ОНА [15]. Решением проблемы является ограничение диапазона изменения угла  $\alpha$  до значений, соответствующих области энергоэффективной работы вентилятора. Эта область определяется действующими нормами [16], которые ограничивают диапазон регулирования производительности вентиляторов условием энергоэффективности:

$$\eta \geq 0,9\eta_{\max}, \quad (3)$$

где  $\eta$  – КПД вентилятора при эксплуатации;  $\eta_{\max}$  – максимальный паспортный КПД вентилятора.

Зависимость КПД от производительности относится к паспортным характеристикам вентилятора и может быть приведена отдельно в виде семейства кривых  $\eta = f(Q)$ . Чаще информация о КПД вентилятора представляется в виде линий равных значений  $\eta$ , которые совмещаются с напорной характеристикой и характеристикой мощности [5]. В пределах контура, ограниченного линией, значение КПД больше некоторого установленного граничного значения.

На **рис. 1, 2** отмечена точка, соответствующая максимальному значению  $\eta_{\max}$  вентилятора. Пунктирной линией одинакового КПД обозначена область энергоэффективного регулирования, в пределах которой выполняется условие (3). Как видно из графиков, область определения зависимостей на **рис. 3** можно ограничить диапазоном значений

$$\alpha \in [0; \alpha_{\max}], \quad (4)$$

где  $\alpha_{\max}$  – максимальный угол поворота ОНА, соответствующий аэродинамическим характеристикам, лежащим в области энергоэффективного регулирования. Для характеристик на **рис. 1, 2** можно принять угол  $\alpha_{\max} = 50^\circ$ .

В диапазоне (4) зависимости на **рис. 3** могут быть аппроксимированы полиномами пятой степени:

$$a_1 = a_{1,5}\alpha^5 + a_{1,4}\alpha^4 + a_{1,3}\alpha^3 + a_{1,2}\alpha^2 + a_{1,1}\alpha + a_{1,0};$$

$$b_1 = b_{1,5}\alpha^5 + b_{1,4}\alpha^4 + b_{1,3}\alpha^3 + b_{1,2}\alpha^2 + b_{1,1}\alpha + b_{1,0}; \quad (5)$$

$$c_1 = c_{1,5}\alpha^5 + c_{1,4}\alpha^4 + c_{1,3}\alpha^3 + c_{1,2}\alpha^2 + c_{1,1}\alpha + c_{1,0};$$

$$a_2 = a_{2,5}\alpha^5 + a_{2,4}\alpha^4 + a_{2,3}\alpha^3 + a_{2,2}\alpha^2 + a_{2,1}\alpha + a_{2,0};$$

$$b_2 = b_{2,5}\alpha^5 + b_{2,4}\alpha^4 + b_{2,3}\alpha^3 + b_{2,2}\alpha^2 + b_{2,1}\alpha + b_{2,0}; \quad (6)$$

$$c_2 = c_{2,5}\alpha^5 + c_{2,4}\alpha^4 + c_{2,3}\alpha^3 + c_{2,2}\alpha^2 + c_{2,1}\alpha + c_{2,0},$$

где  $a_{1,5} \dots a_{1,0}$ ,  $b_{1,5} \dots b_{1,0}$ ,  $c_{1,5} \dots c_{1,0}$ ,  $a_{2,5} \dots a_{2,0}$ ,  $b_{2,5} \dots b_{2,0}$ ,  $c_{2,5} \dots c_{2,0}$  – постоянные коэффициенты.

Значения коэффициентов аппроксимирующих полиномов приведены в **табл. 2**. Подстановка значений коэффициентов в аппроксимирующие выражения (5) и (6) дает аналитическое описание зависимостей на **рис. 3**

с точностью, достаточной для инженерных расчетов.

**Таблица 2**  
Значения коэффициентов аппроксимирующих полиномов

	Значение коэффициентов при степени угла поворота $\alpha^n$					
	$n = 5$	$n = 4$	$n = 3$	$n = 2$	$n = 1$	$n = 0$
$a_{1,n}$	$-1,237 \cdot 10^{-7}$	$1,515 \cdot 10^{-5}$	$-6,282 \cdot 10^{-4}$	$7,751 \cdot 10^{-3}$	$-2,544 \cdot 10^{-2}$	$-2,959$
$b_{1,n}$	$6,313 \cdot 10^{-8}$	$-8,134 \cdot 10^{-6}$	$3,448 \cdot 10^{-4}$	$-4,862 \cdot 10^{-3}$	$1,212 \cdot 10^{-2}$	$0,6247$
$c_{1,n}$	$-1,275 \cdot 10^{-8}$	$1,567 \cdot 10^{-6}$	$-6,443 \cdot 10^{-5}$	$9,515 \cdot 10^{-4}$	$-3,207 \cdot 10^{-3}$	$0,5937$
$a_{2,n}$	$2,960 \cdot 10^{-8}$	$-3,570 \cdot 10^{-6}$	$1,514 \cdot 10^{-4}$	$-2,792 \cdot 10^{-3}$	$1,191 \cdot 10^{-2}$	$-0,8412$
$b_{2,n}$	$-1,121 \cdot 10^{-8}$	$1,299 \cdot 10^{-6}$	$-5,302 \cdot 10^{-5}$	$9,097 \cdot 10^{-4}$	$-6,291 \cdot 10^{-3}$	$0,7730$
$c_{2,n}$	$4,273 \cdot 10^{-10}$	$-4,903 \cdot 10^{-8}$	$2,060 \cdot 10^{-6}$	$-4,036 \cdot 10^{-5}$	$4,206 \cdot 10^{-4}$	$0,03159$

Конечные выражения для описания аэродинамических характеристик достаточно громоздки, поэтому их рационально представить в матричной форме.

Зададим матрицы коэффициентов полиномов (5) и (6) соответственно:

$$K_1 = \begin{bmatrix} a_{1,5} & a_{1,4} & a_{1,3} & a_{1,2} & a_{1,1} & a_{1,0} \\ b_{1,5} & b_{1,4} & b_{1,3} & b_{1,2} & b_{1,1} & b_{1,0} \\ c_{1,5} & c_{1,4} & c_{1,3} & c_{1,2} & c_{1,1} & c_{1,0} \end{bmatrix};$$

$$K_2 = \begin{bmatrix} a_{2,5} & a_{2,4} & a_{2,3} & a_{2,2} & a_{2,1} & a_{2,0} \\ b_{2,5} & b_{2,4} & b_{2,3} & b_{2,2} & b_{2,1} & b_{2,0} \\ c_{2,5} & c_{2,4} & c_{2,3} & c_{2,2} & c_{2,1} & c_{2,0} \end{bmatrix}.$$

Матрица-столбец переменного угла поворота лопаток:

$$A = \begin{bmatrix} \alpha^5 \\ \alpha^4 \\ \alpha^3 \\ \alpha^2 \\ \alpha^1 \\ \alpha^0 \end{bmatrix},$$

где  $\alpha^0 = 1$  соответствует множителю при свободных членах уравнений (5), (6).

Матрица-строка переменных напорной характеристики:

$$X = [Q^2 \quad \omega^2 Q \quad \omega^3].$$

Матрица-строка переменных характеристики мощности:

$$Y = [\omega Q^2 \quad \omega^2 Q \quad \omega^3].$$

Итоговое представление аэродинамических характеристик в компактной матричной форме:

$$H = X \cdot (K_1 \cdot A); \quad (7)$$

$$P = Y \cdot (K_2 \cdot A). \quad (8)$$

Выражения (7) и (8) являются функциями трех переменных: производительности  $Q$ , скорости  $\omega$  и угла поворота лопаток  $\alpha$ . Важной задачей является получение области определения производительности  $Q$  для любых произвольных значений скорости  $\omega$  и угла  $\alpha$  при реали-

зации энергоэффективных режимов регулирования.

Получим область определения  $Q$  исходя из условия (3). Для этого представим КПД вентилятора формулой

$$\eta = \frac{QH}{P}, \quad (9)$$

где  $QH$  – полезная мощность потока воздуха на выходе из вентилятора;  $P$  – механическая мощность, подводимая к валу вентилятора.

Примем для простоты, что угол  $\alpha$  имеет некоторое фиксированное значение и, соответственно, коэффициенты  $a_1, b_1, c_1, a_2, b_2, c_2$  постоянны. Подставив (1) и (2) в (9), с учетом условия энергоэффективности (3), получим:

$$\frac{a_1 Q^3 + b_1 \omega Q^2 + c_1 \omega^2 Q}{a_2 \omega Q^3 + b_2 \omega^2 Q + c_2 \omega^3} \geq 0,9\eta_{\max}.$$

После элементарных преобразований получим новую форму записи условия энергоэффективности:

$$a_1 Q^3 + (b_1 - 0,9\eta_{\max} a_2) \omega Q^2 + (c_1 - 0,9\eta_{\max} b_2) \omega^2 Q - 0,9\eta_{\max} c_2 \omega^3 \geq 0. \quad (10)$$

Левая часть неравенства (10) является целевой функцией трех переменных, которую в дальнейшем будем называть функцией энергоэффективности вентилятора:

$$F(Q, a, \omega) = a_1 Q^3 + (b_1 - 0,9\eta_{\max} a_2) \omega Q^2 + (c_1 - 0,9\eta_{\max} b_2) \omega^2 Q - 0,9\eta_{\max} c_2 \omega^3 \geq 0. \quad (11)$$

Для получения области определения  $Q$  необходимо решить уравнение  $F(Q, a, \omega) = 0$  при фиксированных значениях угла  $a$  и скорости  $\omega$ . В энергоэффективной области уравнение имеет два положительных корня. Третий, отрицательный корень не имеет смысла, поскольку соответствует движению воздушного потока в направлении, противоположном требуемому. Положительные корни  $Q_{\min}$  и  $Q_{\max}$  задают границы области определения производительности при энергоэффективном регулировании:

$$Q \in [Q_{\min}; Q_{\max}]. \quad (12)$$

Корни уравнения могут быть получены аналитически, численно или графически. Область определения (12) может быть получена для любого сочетания угла  $\alpha$  и скорости  $\omega$ . Отсутствие положительных корней определяет невозможность энергоэффективной работы вентилятора.

Графическое построение дает наиболее наглядное представление о свойствах функции энергоэффективности (рис. 9).

Имеющийся в пределах диапазона (12) максимум позволяет сформулировать цель оптимального управления по критерию минимума потребления электроэнергии: при реализации любого из способов регулирования вентилятора (или сочетания способов), необходимо стремиться к тому, чтобы функция энергоэффективности приближалась к своему максимальному значению в заданной области определения:

$$F(Q, a, \omega) \rightarrow \max.$$

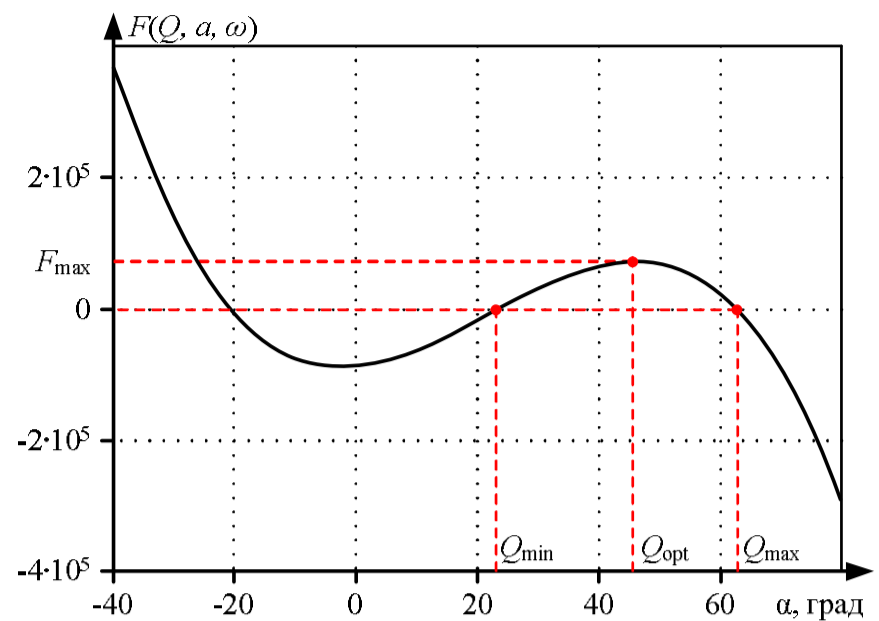


Рис. 9. Функция энергоэффективности вентилятора при  $\alpha=0$  и номинальной скорости вращения

Очевидно, что оптимальный режим работы вентилятора соответствует максимуму значению функции  $F_{\max}$ , определяемому значением производительности  $Q_{\text{opt}}$ . Очевидно, что значение  $Q_{\text{opt}}$  соответствует максимальному КПД вентилятора.

С помощью функции энергоэффективности можно также определить область определения скорости и угла поворота лопаток ОНА, которые соответствуют области энергоэффективного регулирования производительности вентилятора.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные выражения (7) и (8) являются аналитической моделью аэродинамических характеристик в пределах ограничений (4) и (12), накладываемых условием энергоэффективности (3). Целевая функция энергоэффективности (11) является удобным инструментом для поиска оптимальных режимов и определения допустимых диапазонов производительности  $Q$ , скорости вращения  $\omega$  и угла поворота лопаток  $\alpha$  при регулировании центробежных вентиляторов

#### Список источников

1. Лезнов Б.С. Энергосбережение и регулируемый привод в насосных и воздуховодных установках. М.: Энергоатомиздат, 2006. 360 с.
2. Вахвахов Г.Г. Работа вентиляторов в сети. М.: Стройиздат, 1975. 101 с.
3. Вахвахов Г.Г. Энергосбережение и надежность вентиляторных установок. М.: Стройиздат, 1989. 176 с.
4. Крупников А.В., Ваняшов А.Д., Январев И.А. Определение энергоэффективности установок воздушного охлаждения на базе аппаратов с различным числом вентиляторов // Омский научный вестник. 2010. №3 (93). С. 173-176.
5. Вечеркин М.В., Сарваров А.С. Исследование способов регулирования производительности вентиляторной станции ЛПЦ-10 ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2006. №4. С. 34-38.
6. Соломахова Т.С., Чебышева К.В. Центробежные вентиляторы. Аэродинамические схемы и характеристики. М.: Машиностроение, 1980. 176 с.
7. Сайт АО «Чебоксарский электромеханический завод». URL: <https://www.emz74.ru/catalog/?id=1361> (дата обращения 02.10.2022)
8. Гликман Б.Ф. Математические модели пневмогидравлических систем. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986.

- 368 с.
9. Костышин В.С. Моделирование режимов работы центробежных насосов на основе электрогидравлической аналогии: дис. ... канд. техн. наук. 05.15.13 / Костышин Владимир Степанович. Ивано-Франковск, 2003.
  10. Лохов С.П., Бузов А.А., Лохов А.С. Поиск электромеханических моделей турбомеханизмов // Вестник ЮУрГУ. 2001. №4. С. 100-105.
  11. Глебов Р.С., Туманов М.П., Антюшин С. С. Практические аспекты идентификации математической модели вентиляционной установки // Естественные и технические науки. 2012. № 2(58). С. 330-340.
  12. Онищенко Г.Б., Юньков М.Г. Электропривод турбомеханизмов. М.: Энергия, 1972. 240 с.
  13. Свечко М.В., Питолин В.Е. Метод сплайн-аппроксимации и интерполяции графических характеристик сложных энергетических объектов в расчетных моделях // Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. С, Фундаментальные науки. 2007. №3. С. 85-89.
  14. Сайт интернет-магазина техники автоматизации SIEMENS. URL: <https://simatic-market.ru/catalog/Siemens-SA01/5000511/info/> (дата обращения 02.10.2022).
  15. Вечеркин М.В., Сарваров А.С., Петушков М.Ю. Моделирование аэродинамических характеристик центробежных вентиляторов // Электротехнические системы и комплексы. 2006. №14. С 11-15.
  16. ГОСТ 10616-2015. Вентиляторы радиальные и осевые. Размеры и параметры. М.: Стандартинформ, 2016. 23 с.

Поступила в редакцию 12 сентября 2022 г.

Принята к печати 4 октября 2022 г.

## INFORMATION IN ENGLISH

### MODELING THE AERODYNAMIC PARAMETERS OF CENTRIFUGAL FANS WITH AN AXIAL DISTRIBUTOR

Maksim V. Vecherkin

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Department of Physics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, [vecherkin@inbox.ru](mailto:vecherkin@inbox.ru), <https://orcid.org/0000-0002-8679-9831>

Anvar S. Sarvarov

D.Sc. (Engineering), Professor, Department of Automated Electric Drive and Mechatronics, Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, [anvar.magtu@gmail.com](mailto:anvar.magtu@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-0529-4488>

Irina G. Samarina

Assistant Professor, Automated Control Systems Department, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, [ig\\_samarina@inbox.ru](mailto:ig_samarina@inbox.ru), <https://orcid.org/0000-0002-0045-9028>

Irina P. Romanova

Undergraduate Student, Department of Computer Science and Information Security, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, [romanova.irina.01@mail.ru](mailto:romanova.irina.01@mail.ru)

Irina Yu. Bogacheva

Assistant Professor, Department of Physics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, [bogachevirina@yandex.ru](mailto:bogachevirina@yandex.ru)

Centrifugal fans with high-voltage asynchronous drives consume a large proportion of the electricity at various production facilities. The majority of the fan installations, however, operate with excessive energy consumption. This can be reduced by adapting the performance of the fans to the operation needs. Selecting the most energy-efficient method requires the investigation of a mathematical model that takes all relevant site characteristics into account. The authors review a mathematical model of the centrifugal fan based on its rated aerodynamic parameters. This model is necessary to solve the optimal control problem for high-power industrial fans using the minimum power consumption criterion. Solving this problem requires a theoretical research of various fan output control methods and selecting the most energy-efficient method for the given operating conditions. This work rationalizes the modification of the known approximating functions of the aerodynamic parameters that do not account for the fan output control using the axial distributor. The authors provide an analytical description of aerodynamic parameters of a high-power fan using a power polynomial of three variables fit for the researching of fan energy efficiency under frequency control, throttling, and axial-distributor control. The article describes the model in a compact matrix form and sets forth the limitations of its applicability. The authors obtain a target function to solve the optimal control problem for fans. The maximum energy efficiency function determines the optimum mode of fan

operation according to the criterion of minimum energy consumption. The function determines the range of fan speed and blade angle of the axial distributor that corresponds to the energy-efficient control range of the fan performance.

**Keywords:** centrifugal fan, aerodynamic parameters, energy efficiency, output control, axial distributor

#### REFERENCES

1. Leznov B.S. *Energosberezhenie i reguliruemyy privod v nasosnyh i vozduhoduvnyh ustanovkah* [Energy saving and controlled drives in pumping and blowing plants]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 2006. 360 p. (In Russian)
2. Vakhvakhov G.G. *Rabota ventilyatorov v seti* [Network operation of fans]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1975. 101 p. (In Russian)
3. Vakhvakhov G.G. *Energosberezhenie i nadezhnost ventilyatornyh ustanovok* [Energy saving and fan unit reliability]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1989. 176 p. (In Russian)
4. Krupnikov A.V., Vanyashov A.D., Yanvarev I.A. Determining the energy efficiency of air cooling units based on systems with various numbers of fans. *Omskij nauchnyj vestnik* [Omsk Scientific Bulletin], 2010, no. 3 (93), pp. 173–176. (In Russian)
5. Vecherkin M.V., Sarvarov A.S. Researching the output control methods for the LPTs-10 fan station at Magnitogorsk Iron and Steel Works. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij*.

- Elektromekhanika*. [Russian Electromechanics], 2006, no. 4, pp. 34-38. (In Russian)
6. Solomakhova T.S., Chebysheva K.V. *Centrobezhnye ventilyatory. Aerodinamicheskie skhemy i karakteristiki* [Centrifugal fans. Aerodynamic designs and parameters: A handbook]. Moscow, Machine building Publ., 1980. 176 p. (In Russian)
  7. AO «Cheboksarskiy elektromekhanicheskiy zavod» (JSC Cheboksary Electromechanical Plant). Available at: <https://www.emz74.ru/catalog/?id=1361> (accessed 02 October 2022)
  8. Glikman B.F. *Matematicheskie modeli pnevmogidravlicheskikh sistem* [Mathematical models of pneumatic hydraulic systems]. Moscow, Science, Physics and Maths chief editorial board Publ., 1986. 368 p. (In Russian)
  9. Kostyshin V.S. *Modelirovanie rezhimov raboty centrobezhnykh nasosov na osnove elektrogidravlicheskoj analogii*. Kand. Diss. [Modeling the operating modes of centrifugal pumps based on electrohydraulic analogy. Kand. Diss.] Ivano-Frankivsk, 2000. 163 p. (In Russian)
  10. Lokhov S.P., Buzov A.A., Lokhov A.S. Searching for the electromechanical models of turbine mechanisms. *Vestnik YUzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of the South Ural State University], 2001, no. 4, pp. 100-105. (In Russian)
  11. Glebov R.S., Tumanov M.P., Antyushin S.S. Practical aspects of the identification of a mathematical model for a fan unit. *Estestvennye i tekhnicheskie nauki* [Natural and Technical Sciences], 2012, no. 2 (58), pp. 330-340. (In Russian)
  12. Onishchenko G.B., Yunkov M.G. *Elektroprivod turbomekhanizmov* [Electric drives of turbine mechanisms]. Moscow, Energy Publ., 1972. 240 p. (In Russian)
  13. Svechko M.V., Pitolin V.E. The spline approximation and graphic parameter interpolation method for complex power facilities in computing models. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta* [Vestnik of Polotsk State University. Series S, Fundamental Sciences], 2007, no. 3, pp. 85-89. (In Russian)
  14. *Sayt internet-magazina tekhniki avtomatizatsii SIEMENS* (Website of the online store of SIEMENS automation equipment)ю Available at: <https://simatic-market.ru/catalog/Siemens-CA01/5000511/info/> (accessed 02 October 2022)
  15. Vecherkin M.V., Sarvarov A.S., Petushkov M.Yu. Modeling the aerodynamic performance of centrifugal fans. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical systems and complexes], 2006, no. 14, pp. 11-15. (In Russian)
  16. GOST 10616-2015. Radial and axial Fans. Dimensions and parameters. Moscow, Standartinform Publ., 2016. 23 p. (In Russian)

Моделирование аэродинамических характеристик центробежных вентиляторов с осевым направляющим аппаратом / М.В. Вечеркин, А.С. Сарваров, И.Г. Самарина, И.П. Романова, И.Ю. Богачева // Электротехнические системы и комплексы. 2022. № 4(57). С. 69-75. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-4\(57\)-69-75](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-4(57)-69-75)

Vecherkin M.V., Sarvarov A.S., Samarina I.G., Romanova I.P., Bogacheva I.Yu. Modeling the Aerodynamic Parameters of Centrifugal Fans with an Axial Distributor. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2022, no. 4(57), pp. 69-75. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-4\(57\)-69-75](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-4(57)-69-75)

Корниенко В.Д., Наркевич М.Ю., Логунова О.С., Козлова А.Е., Зайцев И.П.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

## МЕТОДИКА СБОРА И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ТЕРРИТОРИИ, ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ НА ОПАСНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТАХ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

Целью исследования является повышение достоверности информации о состоянии территорий, зданий и сооружений на опасных производственных объектах металлургического предприятия, получаемой с использованием беспилотного воздушного судна. Объектом исследования является система производственного контроля за состоянием территории, зданий и сооружений на опасных производственных объектах металлургического предприятия. Предмет исследования – методика автоматизированного сбора и обработки информации, основанная на компьютерных методах обработки информации. Исследование проводится в рамках научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы на одном из ведущих предприятий черной металлургии РФ. В исследовании использованы следующие методы: анализа и синтеза для адекватного разложения объекта исследования на составные части – элементы, установление связей между ними и предметом исследования; декомпозиции для выделения из объекта и предмета исследований составляющих подзадач, для создания цепочек последовательности действий на выделенных подзадачах; эксперимента для изучения особенностей натуральных условий сбора информации. Результатом исследования являются разработанные методики: сбора информации о техническом состоянии территории, зданий и сооружений на опасных производственных объектах металлургического предприятия; обработки визуальной информации о техническом состоянии территории, зданий и сооружений на опасных производственных объектах металлургического предприятия. Результаты исследования являются основой для создания автоматизированной системы контроля состояния территории, зданий и сооружений на опасных производственных объектах металлургического предприятия, применение которой позволит обеспечить в режиме реального времени и на постоянной основе: поступление в систему управления промышленной безопасности сведений о текущих параметрах безопасной эксплуатации объекта контроля; сигнализирование персонала о малейших количественных изменениях ранее выявленных дефектов и повреждений, а также появлении новых; оперативное, а следовательно, эффективное адресное реагирование служб предприятия на сигналы системы мониторинга.

**Ключевые слова:** система интеллектуальной поддержки при принятии управленческих решений, машинное зрение, дистанционный контроль, промышленная безопасность, опасные производственные объекты, территория, здания и сооружения, обследование технического состояния, прикладная цифровая платформа, экспертная система, методы обработки изображений, беспилотное воздушное судно.

### ВВЕДЕНИЕ

Важнейшей особенностью технологических процессов на металлургических предприятиях полного цикла с точки зрения безопасности является эксплуатация опасных производственных объектов (ОПО), обладающих практически всеми признаками опасности согласно [1] (рис. 1). Официальная статистика декларирует, что около 35% всех аварий за последние 15 лет произошли на ОПО, функционирующих на металлургических предприятиях полного цикла [2]. При этом та же статистика свидетельствует о наиболее значительных последствиях аварий, которые сопровождались обрушениями зданий и сооружений (ЗиС) или их частей. Также причинами аварийных ситуаций на ОПО являются дорожно-транспортные происшествия, вызванные повреждениями дорожного полотна или оставленным мусором на обочинах дорог [3].

Существующая система контроля за техническим исправным состоянием ЗиС на ОПО промышленных предприятий РФ предусматривает эпизодические (в среднем 1 раз в 4-5 лет) обследования независимыми специалистами, при этом применяются методики, при которых 9 из 10 дефектов (повреждений) в элементах и узлах строительных конструкций определяются визуально специалистами-обследователями, а графическая

информация (фотоизображения) используется только для подтверждения факта и места наличия дефекта (повреждения) в ЗиС на ОПО [4, 5].

Учитывая агрессивный характер эксплуатационной среды металлургического производства по отношению к строительным конструкциям ЗиС и, как следствие, их повышенный износ, а также низкое качество, а в некоторых случаях формальное проведение ежегодных осенне-весенних осмотров ЗиС [6], сформулирована проблема о том, что существующая методика контроля за технически исправным состоянием ЗиС на ОПО не отвечает в полной мере современным задачам надежного и эффективного производства в ключевых отраслях экономики.

### АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И ПРАКТИЧЕСКИХ РАЗРАБОТОК В ОБЛАСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Одним из способов решения обозначенной проблемы Правительство РФ видит в использовании цифровых технологий при плавном переходе на систему дистанционного контроля (СДК) состояния ОПО [7, 8]. Так в рамках эксперимента по внедрению СДК на российских предприятиях 23 октября 2019 г. в ходе посещения председателем Правительства РФ компании ПАО «СИБУР Холдинг» продемонстрированы разработки в области СДК ОПО [9].



Рис. 1. Схема классификации ОПО по доминирующему признаку опасности (Красным цветом выделены признаки опасности, присутствующие на ОПО металлургического предприятия полного цикла)

Обозначено, что с 2015 г. на площадке ЗАО «Российская корпорация средств связи» реализуется пилотный проект Ситуационно-аналитического центра (САЦ), предназначенного для формирования глобальной картины состояния промышленной безопасности на ОПО. С 2016 г. к центру подключены предприятия ПАО «Газпром», ПАО «Сибур Холдинг», АО «СУЭК», ПАО «Газпром нефть», ПАО «Лукойл» [10].

Согласно обозначенным срокам, эксперимент по внедрению СДК должен завершиться в ближайшее время, однако по заявлению от 31.05.2022 г. зампреда Комитета РСПП по промышленной безопасности Олега Николаенко: «Он (эксперимент) никакой, не успешный, если мы не увидели результата. На элементарный вопрос о цели системы нет ответа» [11]. Кроме того, факт применения СДК лишь в системах контроля за отклонениями технологических параметров производственных процессов не решает проблему контроля за состоянием ЗиС и территорий на ОПО.

Опыт внедрения системы дистанционного контроля объектов зарубежных коллег представлен в [12-16].

Результаты исследований в области сбора (в том числе с помощью беспилотных воздушных средств) и обработки визуальной информации о состоянии объекта контроля описаны в [17-32].

#### Цели и задачи

Целью исследования является повышение достоверности информации о состоянии территории, ЗиС на ОПО металлургического предприятия, получаемой с использованием беспилотного воздушного судна.

Достижение поставленной цели обусловлено решением следующих задач:

- анализ существующей системы производственного контроля состояния территории, ЗиС на ОПО;
- критический анализ теоретических и практических разработок в системах автоматизированного контроля состояния территории, ЗиС на ОПО;

- анализ способов получения и обработки графической информации для систем интеллектуальной поддержки при принятии управленческих решений;

- разработка методики автоматизированного сбора и обработки информации для контроля состояния территории, ЗиС на ОПО.

В рамках исследования рассмотрено решение задачи по разработке методики автоматизированного сбора и обработки информации для контроля состояния территории, ЗиС на ОПО. Основой для решения данной задачи являются результаты предыдущих исследований научного коллектива авторов [33-38].

#### МЕТОДИКА СБОРА ИНФОРМАЦИИ О ТЕХНИЧЕСКОМ СОСТОЯНИИ ТЕРРИТОРИИ, ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ НА ОПО

Введение новых инструментов прикладной цифровой платформы (ПЦП) [33] в существующую систему контроля состояния территории, ЗиС на ОПО потребовало изменения бизнес-процессов и методик контроля.

На рис. 2, 3 приведены диаграмма декомпозиции А0 и А1 соответственно для системы производственного контроля и прогнозирования изменения технического состояния территории, ЗиС на ОПО. Диаграмма А0 построена с точки зрения менеджера обновленной системы и администратора управления ролями в системе с использованием ПЦП.

Требования федерального законодательства определяются следующими документами:

- Федеральный закон «О промышленной безопасности опасных производственных объектов»;
- Федеральный закон «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений»;
- Федеральный закон «Градостроительный кодекс Российской Федерации»;
- Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности;
- приказы Ростехнадзора.



Рис. 2. Диаграмма декомпозиции А0 для системы производственного контроля и прогнозирования изменения технического состояния территории, ЗиС на ОПО: УОТ и ПБ – управление охраной труда и промышленной безопасности, ПСП – производственные структурные подразделения

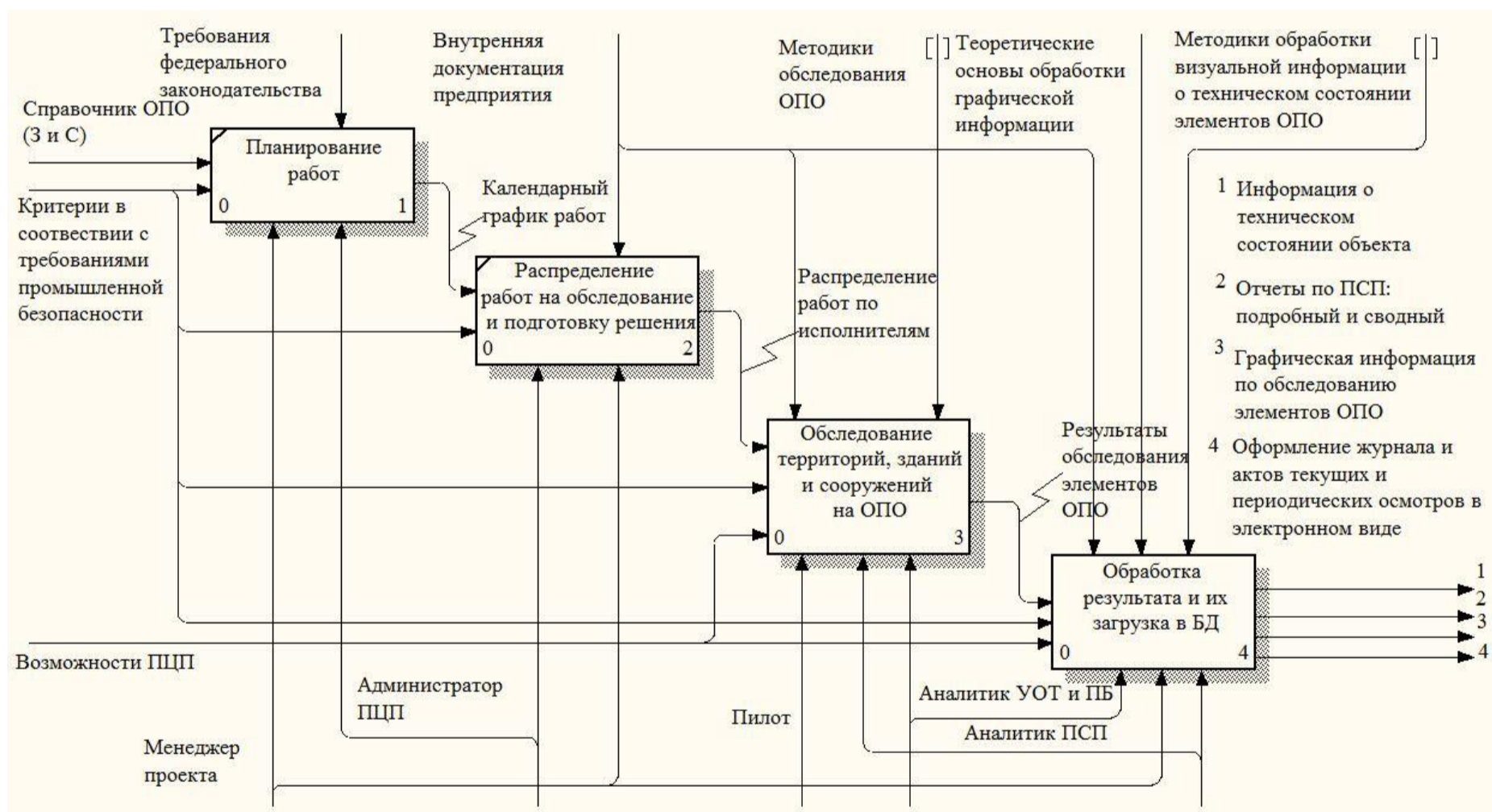


Рис. 3. Диаграмма декомпозиции А1 для системы производственного контроля и прогнозирования изменения технического состояния элементов ОПО

В состав внутренней документации предприятия входят:

- Положение о производственном контроле за соблюдением требований промышленной безопасности при эксплуатации ОПО;
- Положение о системе управления промышленной безопасностью;
- проектная документация, руководства по эксплуатации оборудования, технологические инструкции и регламенты;
- обоснования безопасности ОПО;

- заключения экспертизы промышленной безопасности (ЭПБ);
- декларации промышленной безопасности ОПО;
- План мероприятий по локализации и ликвидации последствий аварий в ОПО.

Указанные документы регламентируют функционирование процессов в системе контроля и прогнозирования изменения технического состояния элементов ОПО.

В обновленной системе производственного контроля и прогнозирования изменения технического состояния элементов ОПО без изменения остаются про-



цессы планирования (А1) и распределения (А2) работ по обследованию территорий и ЗиС (см. **рис. 3**). Введение новых технических средств для сбора информации в виде беспилотных воздушных средств (БВС) потребовало корректировки в распределении работ и введение новой методики на обследование, методики на обработку полученной визуальной информации с использованием программных средств.

Теоретические основы обработки графической информации предназначены для создания научно обоснованного фундамента выбора алгоритмов при обработке информации. Классификация изображений показала разделение видеопотоков на группы, которые определили основные алгоритмы траекторий: фильтрация, улучшение, сегментация, распознавание. Теоретическая основа этих алгоритмов подробно представлена в [39, 40] и примеры их использования в промышленном производстве в [41, 42].

В основном бизнес-процессе контроля и прогнозирования изменения технического состояния территории, ЗиС на ОПО выделены четыре основных этапа (см. **рис. 3**):

1) планирование работ, включающее построение календарного графика для текущего и планового обследований технического состояния территорий, ЗиС на основании требований федерального законодательства;

2) распределение работ на обследование и подготовку решения, включающее план обследования выбранных объектов согласно плану с детализацией решаемых задач и назначением исполнителя;

3) обследование территорий, ЗиС на ОПО, включающее непосредственное исполнение обследования объекта согласно заданию в указанный период времени с поправками на погодные условия и использования БВС;

4) обработка результата, в которой предусматривается подготовка изображения к обработке, непосред-

ственно обработка информации и подготовка сводных отчетов после подведения итогов и группировки.

Для каждого блока бизнес-процесса назначены исполнители в лице:

1) менеджера проекта, в функции которого входит соблюдение требований промышленной безопасности для ЗиС при планировании и назначении работ, ознакомление с итогами обследования и результатами оценки технического состояния ОПО;

2) администратора ПЦП, который определяет роли исполнителей проекта в условиях ПЦП;

3) пилоты, которые выполняют непосредственное выполнение работ по обследованию ОПО, размещению собранной с помощью БВС информации на ПЦП, подготовку информации для обработки на ПЦП, непосредственно обработку собранной информации на ПЦП и размещение полученных результатов в базу данных;

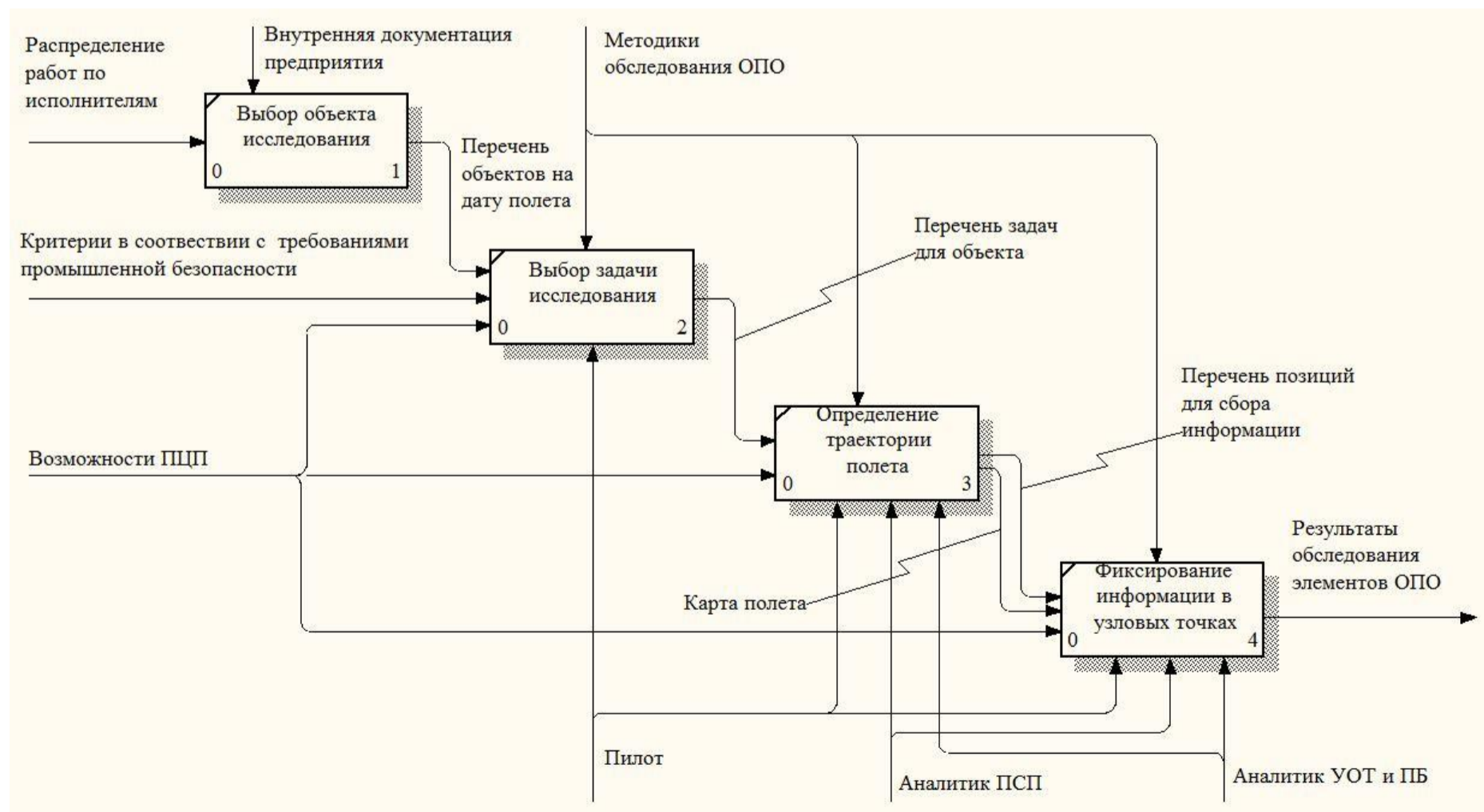
4) аналитики ПСП, управления охраны труда и промышленной безопасности (УОТиПБ), выполняющие функции по отбору качественных изображений для обработки, выделению фрагментов изображений для обработки, установлению порогов яркости, наполнению шаблонов для поиска, наполнению обучающих выборок.

Появление новых аппаратных и программных инструментов для сбора и обработки информации о техническом состоянии объектов потребовало разработки двух новых методик:

1) методики обследования состояния территорий и ЗиС на ОПО;

2) методики обработки визуальной информации о техническом состоянии территорий и ЗиС на ОПО.

На **рис. 4** приведена диаграмма декомпозиции процесса сбора информации в ходе полета БВС при обследовании технического состояния объекта с учетом возможностей БВС и ПЦП.



**Рис. 4.** Диаграмма декомпозиции А3 для сбора информации в ходе полета БВС при обследовании технического состояния объекта

МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ВИЗУАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ  
О ТЕХНИЧЕСКОМ СОСТОЯНИИ ТЕРРИТОРИИ, ЗДАНИЙ  
И СООРУЖЕНИЙ НА ОПО

Таблица 1

Перечень задач и их уточнения для различных объектов

Номер задачи	Объект	Подзадача		
		Факт наличия	Оценка доли площади или длины	Подсчет количества разрушений
1	Здание г.к. ЛПЦ. Здание склада	+	+	-
2	Здание г.к. ЛПЦ	+	+	-
3	Дымовая труба. Здание склада	+	-	+
4	Производственное здание	+	-	-
5	Здание литейного двора доменной печи. Здание конвейера	+	-	+
6	Дымовая труба доменного цеха	+	+	-
7	Здание конвейера	+	+	+
8	Территория промплощадки – автодорога	+	-	-
9	Территория промплощадки – автодорога. Здание конвейера	+	-	-

После обследования технического состояния территории и ЗиС на ОПО выполняется процесс обработки фото- и видеопотока для принятия решения о его соответствии или несоответствии требованиям ПБ (рис. 5). Обработка полученных материалов выполняется аналитиками ПСП или УОТиПБ. В процесс включены четыре операции:

- 1) чтение изображения из базы данных;
- 2) выбор задачи для анализа (табл. 1);
- 3) использование инструментов ПЦП [33];
- 4) загрузка результатов в базу данных и их обработка.

В табл. 1 представлены следующие технические задачи контроля:

- 1) обнаружение и оценка разрушения соединительных швов между панелями;
- 2) обнаружение и оценка площади поверхности объекта, покрытой ржавчиной;
- 3) обнаружение и оценка наклонных трещин на кирпичной кладке (количество, длина);
- 4) обнаружение и построение профиля обледенений (сосулек) на крыше объекта;
- 5) обнаружение отсутствия типовых элементов объектов;
- 6) обнаружение нарушений лакокрасочных покрытий на поверхности объекта;
- 7) обнаружение и оценка провалов на кровле объекта;
- 8) обнаружение разрушений дорожного покрытия;
- 9) обнаружение на обочине дорог и кровлях крыш посторонних объектов (мусор).

ПЦП построена с использованием девяти программных модулей (по одному модулю на каждую задачу обследования), для каждого из которых определена траектория обработки изображения.

Построение текущей информации в виде журналов и актов обследования формируется автоматически после занесения информации в базу данных. И на основе этой информации выполняется построение подробного и сводного отчетов.

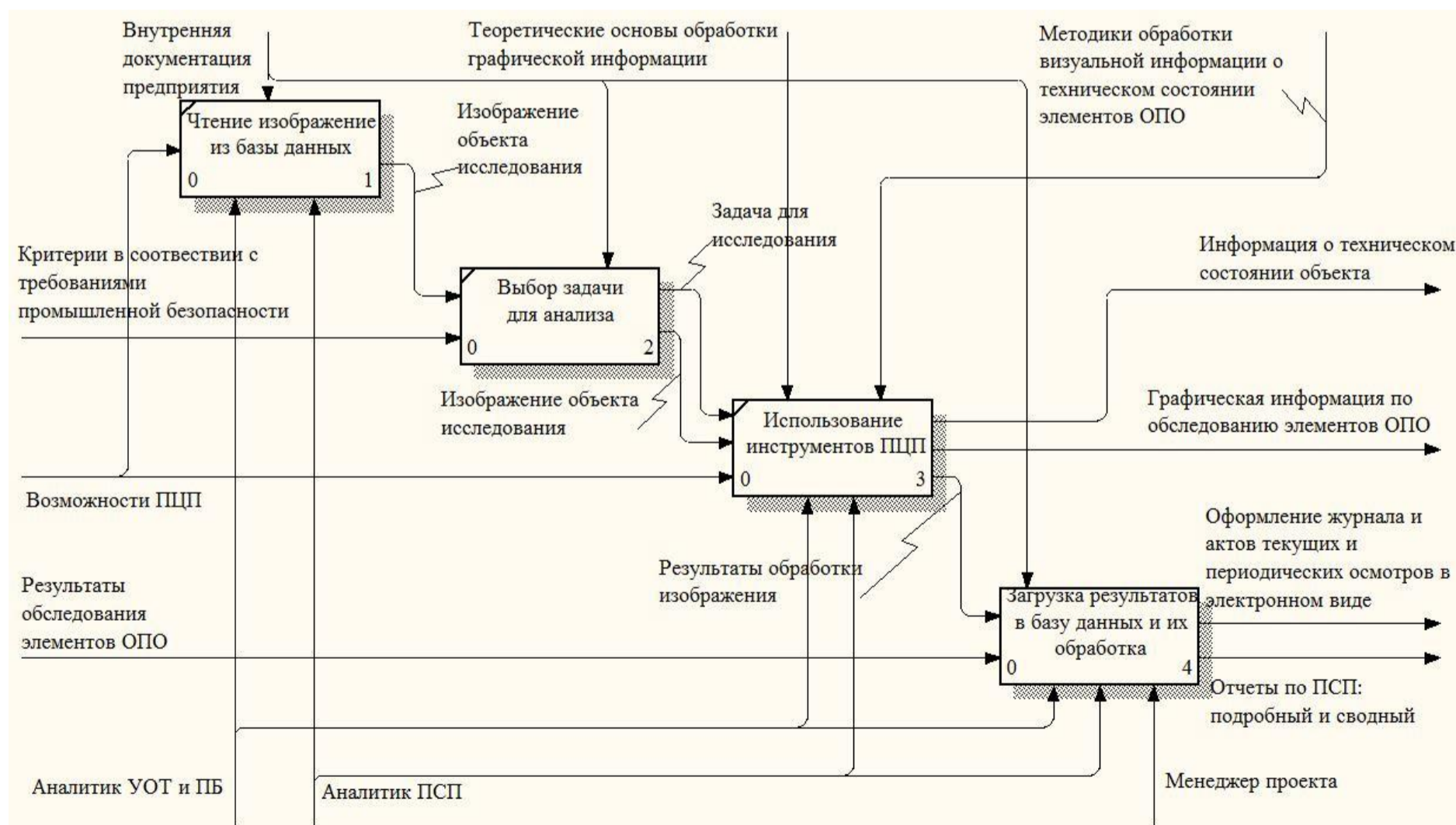


Рис. 5. Диаграмма декомпозиции А4 для процесса обработки результатов

Порядок расчета и оценки визуальных дефектов  
на поверхности объектов контроля.  
КРИТЕРИИ КОНТРОЛЯ

Согласно постановке задач, приведенной в табл. 1 и схеме классификации на рис. 6, две из них можно отнести к определению протяженности «дефектов» на поверхности исследуемого объекта:

- обнаружение разрушений соединительных швов между панелями задания, оценка количества разрушений и их общей протяженности, а также в горизонтальном и вертикальном направлении отдельно (задача 1);
- обнаружение и оценка наклонных трещин на кирпичной кладке (длина) (задача 3).

Согласно постановке задач, приведенной в табл. 1 и схеме классификации на рис. 6, три из них можно отнести к определению доли площади нарушения сплошности поверхности объекта:

- обнаружение и оценка площади поверхности объекта, покрытого ржавчиной (задача 2);
- обнаружение нарушений лакокрасочных покрытий на поверхности объекта (задача 6);
- обнаружение и оценка провалов на кровле объекта (задача 7).

Учитывая, что сбор исходных данных производился без применения измерительных инструментов, то

протяженность определяется в относительных единицах относительно длины изучаемых швов, захваченных на изображении. Введем обозначение:

- для величин протяженности разрушений (табл. 2);
- для величин по определению доли площади с нарушениями сплошности (табл. 3).

Для каждого показателя назначаются минимальный и максимальный пороги. Процесс назначения порога определяет заказчик проекта по одному из двух вариантов:

- 1) пороги устанавливаются экспертами и имеют вид неравенства

$$A_{\min} \leq P \leq A_{\max}, \quad (1)$$

где  $P$  – значение показателя;  $A_{\min}$ ,  $A_{\max}$  – соответственно минимальная и максимальная допустимые границы показателя, задаваемые экспертами;

- 2) пороги определяются в ходе адаптации программного обеспечения по стремлению показателя к заданному значению:

$$|P - A| \rightarrow \min, \quad (2)$$

где  $A$  – целевое значение показателя, определяемое в ходе адаптации.

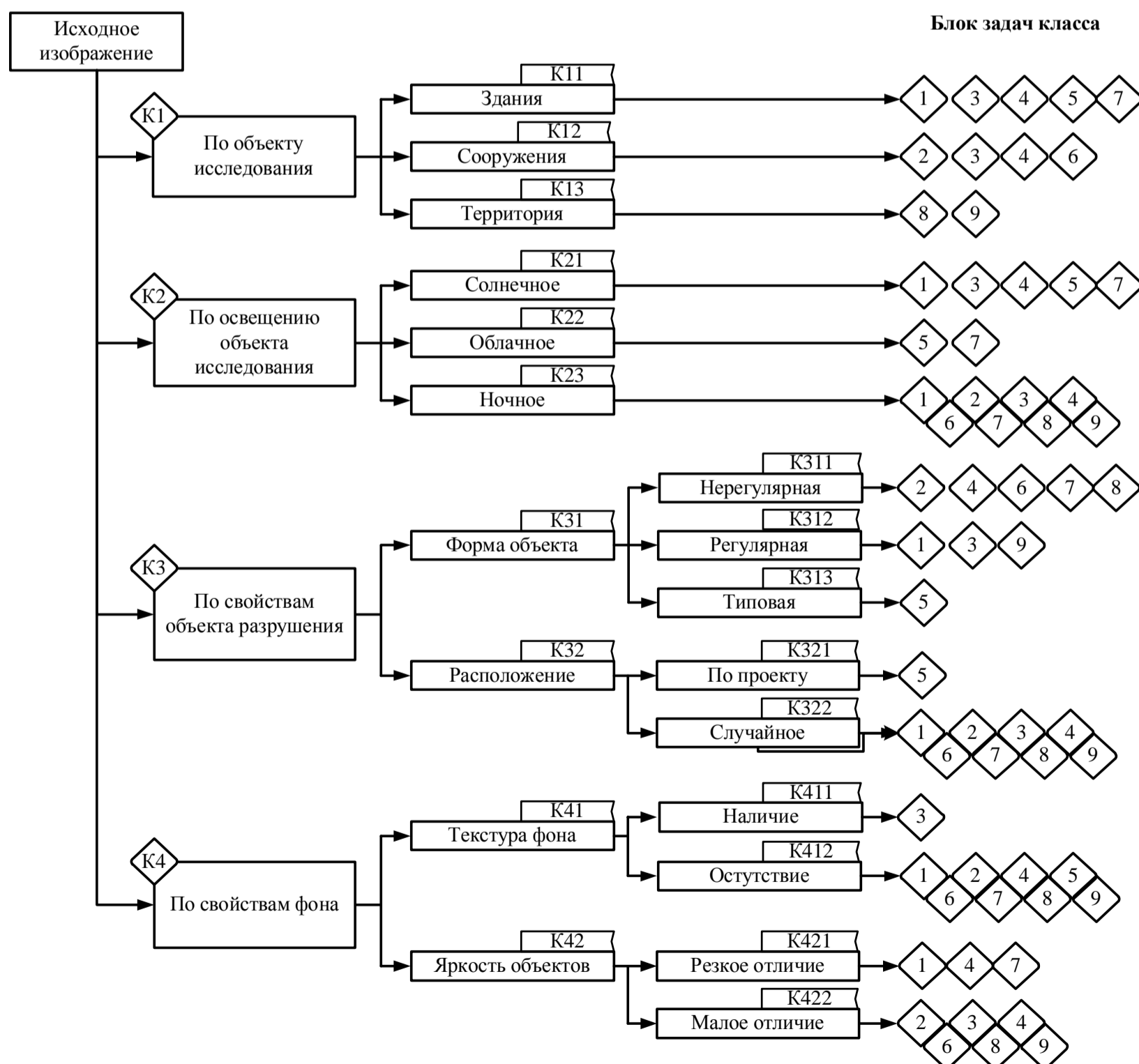


Рис. 6. Схема классификации исходных данных

Таблица 2

Перечень обозначений для величины разрушения соединительных швов между панелями здания

Название величины	Обозначение	Расчетная формула	Описание
Количество объектов, определяющих разрушение соединительного шва между панелями на всем изображении	$n$	–	Определяется по количеству объектов, имеющих максимальный размер в горизонтальном и вертикальном направлении
Количество объектов, определяющих разрушение соединительного шва между панелями по горизонтали	$n_g$	–	Определяется по количеству объектов, имеющих максимальный размер в горизонтальном направлении
Количество объектов, определяющих разрушение соединительного шва между панелями по вертикали	$n_v$	–	Определяется по количеству объектов, имеющих максимальный размер в вертикальном направлении
Протяженность объектов, определяющих разрушение соединительного шва между панелями по всем изображениям, %	$d$	$d = \frac{S_d}{S}$	$S_d = \sum_{i=1}^n l_i,$ $S_d$ – суммарная максимальная протяженность выделенных объектов в горизонтальном или вертикальном направлении; $l_i$ – максимальная протяженность выделенных объектов в горизонтальном или вертикальном направлении; $i$ – номер объекта
Протяженность объектов, определяющих разрушение соединительного шва между панелями по вертикали, %	$d_v$	$d_v = \frac{S_{n_v}}{S_v}$	$S_{n_v} = \sum_{i=1}^n l_{iv},$ $S_{n_v}$ – суммарная максимальная протяженность выделенных объектов в вертикальном направлении; $l_{iv}$ – максимальная протяженность выделенных объектов в горизонтальном или вертикальном направлении; $i$ – номер объекта
Протяженность объектов, определяющих разрушение соединительного шва между панелями по горизонтали, %	$d_g$	$d_g = \frac{S_{n_g}}{S_g}$	$S_{n_g} = \sum_{i=1}^n l_{ig},$ $S_{n_g}$ – суммарная максимальная протяженность выделенных объектов в горизонтальном направлении; $l_{ig}$ – максимальная протяженность выделенных объектов в горизонтальном направлении; $i$ – номер объекта

Таблица 3

Перечень обозначений величины для решения по определению доли площади с нарушениями сплошности

Название величины	Обозначение	Расчетная формула	Описание
Количество объектов, определяющих нарушение сплошности	$n$	–	Определяется по количеству сплошных областей нерегулярной формы с яркостью в заданном диапазоне
Доля площади объекта, занимаемая разрушениями, %	$d_s$	$d_s = \frac{K_p}{K} \cdot 100 \%$	$K_p$ – количество точек изображения в диапазоне яркости провалов; $K$ – количество точек выделенной полигональной области

Отличительными признаками задачи 3 является применение этой методики после обнаружения и удаление элементов текстуры в виде швов кирпичной кладки.

К классу задач по обнаружению факта наличия

нарушения сплошности поверхности объекта относятся:  
 – обнаружение разрушений дорожного покрытия (задача 8);  
 – обнаружение на обочине дорог и кровлях крыш посторонних объектов (мусор) (задача 9);

– обнаружение и построение профиля обледенений (сосулек) на крыше объекта (задача 4).

Каждая из указанных задач работает с объектами нерегулярной формы со случайным местом расположения. В основу распознавания объектов закладываются алгоритмы рекурсивного построения области объекта и теории искусственных нейронных сетей.

Критерием контроля для определения факта наличия является изменение логической переменной на значении True при начальной инициализации False. Визуально найденные объекты изменяют цветовую гамму для привлечения внимания пользователя.

К классу задач по подсчету заданных объектов относятся:

– обнаружение и оценка наклонных трещин на кирпичной кладке (задача 3);

– обнаружение отсутствия типовых элементов объектов (задача 5);

– обнаружение и оценка провалов на кровле объекта (задача 7).

Для подсчета количества объектов достаточно завести переменную счетчик, значение которой увеличивается на одну единицу при обнаружении объекта:

$$K_{i+1}=K_i+1, \quad (3)$$

где  $K_i$  – количество объектов на  $i$ -м шаге, причем  $K_0=0$ ;  $K_{(i+1)}$  – количество объектов на следующем  $i+1$ -м шаге.

Критерием обнаружения объекта разрушения является неравенство

$$K_{i+1}>0. \quad (4)$$

В каждой из указанных задач для сегментации объекта разрушения используются уникальные алгоритмы:

1) задача 3 – комбинация алгоритмов фильтрации Фурье, алгоритм Хафа, алгоритмы пороговой обработки;

2) задача 5 – алгоритмы формирования шаблонов и определения наличия шаблонов на изображении;

3) задача 6 – синтез алгоритмов отделения полигональной области и порогового отделения объекта.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследования:

– разработана методика сбора информации о техническом состоянии территории, ЗиС на ОПО металлургического предприятия, позволяющая получить исходный фото- и видеоматериал высокого разрешения технически значимых участков (в том числе труднодоступных) элементов ОПО, формирующий рабочую память экспертной системы;

– разработана методика обработки визуальной информации о техническом состоянии территории, ЗиС на ОПО металлургического предприятия, позволяющая на основе машинного зрения выявлять и измерять в режиме реального времени дефекты и повреждения элементов ОПО.

Основной вывод исследования заключается в том, что разработанные методики являются базой для создания автоматизированной системы контроля состояния территории, ЗиС на ОПО металлургического пред-

приятия, применение которой позволит эффективно использовать материальные и кадровые ресурсы для поддержания основных фондов предприятия в работоспособном состоянии за счёт превентивных мер и мер оперативного реагирования.

*Исследования выполняются при финансовой поддержке по договору № 247715 от 05.07.2021 г. между ПАО «ММК» и ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова» «Разработка и применение методик контроля территорий, зданий и сооружений ПАО «ММК» с использованием беспилотных воздушных судов (БВС)».*

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Приказ Ростехнадзора от 30 ноября 2020 г. № 471 «Требования к регистрации объектов в государственном реестре опасных производственных объектов и ведению государственного реестра опасных производственных объектов, формы свидетельства о регистрации опасных производственных объектов в государственном реестре опасных производственных объектов. Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору». URL: <https://docs.cntd.ru/document/573140185> (дата обращения: 07.02.2022).
2. Годовые отчеты о деятельности федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору. М.: Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору (Ростехнадзор). URL: <http://www.gosnadzor.ru/public/> (дата обращения: 24.10.2022).
3. Веселов А.В., Корниенко В.Д. Новая перспективная конструкция дорожной одежды с монолитным ребристым цементобетонным покрытием // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2018. № 5-6(232-233). С. 38-41.
4. ГОСТ 31937-2011. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния. М.: Стандартинформ, 2014. 55 с.
5. Наркевич М.Ю. Основы метрологии, стандартизации, сертификации и контроля качества. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2012. 136 с.
6. Вепржицкий И.Ю., Рытик Н.А., Кустикова Ю.О. Эксплуатационный контроль зданий и сооружений // Молодёжные инновации: сборник материалов семинара молодых учёных XXII Международной научной конференции, Ташкент, 2019. М.: Нац. исс. Мос. гос. строит. ун-т, 2019. С. 210-213.
7. Система адаптивного дистанционного мониторинга и контроля эксплуатации опасных объектов на основе риск-ориентированного подхода / А.В. Панфилов, О.А. Бахтеев, В.В. Дерюшев, А.А. Короткий // Безопасность техногенных и природных систем. 2020. № 2. С. 19-29. doi: 10.23947/2541-9129-2020-2-19-29.
8. Панова Е.А., Альбрехт А.Я. Уточненные удельные электрические параметры двухцепных ЛЭП 110 кВ для дистанционного определения места повреждения // Электротехнические системы и комплексы. 2016. № 4(33). С. 35-40. doi: 10.18503/2311-8318-2016-4(33)-35-40.
9. Постановление Правительства РФ от 31 декабря 2020 г. № 2415 «О проведении эксперимента по внедрению системы дистанционного контроля промышленной безопасности». URL: <https://docs.cntd.ru/document/573319188> (дат обращения 22.11.2022).
10. О внедрении систем дистанционного контроля в рамках реализации реформы контрольно-надзорной деятельности / Правительство России. URL: <http://government.ru/news/38172/>

- (дата обращения: 02.11.2022).
11. Бизнес не видит смысла в эксперименте Ростехнадзора по внедрению системы дистанционного контроля на ОПО: Рамблер. URL: [https://finance.rambler.ru/economics/48755960/?utm\\_content=finance\\_media&utm\\_medium=read\\_more&utm\\_source=copуlink](https://finance.rambler.ru/economics/48755960/?utm_content=finance_media&utm_medium=read_more&utm_source=copуlink) (дата обращения: 02.11.2022).
  12. Zaurin R., Catbas F.N. Integration of computer imaging and sensor data for 912 structural health monitoring of bridges // *Smart Mater. Struct.* 2010. Vol. 19(1). 015019. doi: 10.1088/0964-1726/19/1/015019.
  13. Duran O., Althoefer K., Seneviratne L. State of the art in sensor technologies for sewer inspection // *IEEE Sensors Journal*. 2002. Vol. 2(2). Pp. 73-81. doi: 10.1109/JSEN.2002.1000245.
  14. Guo W., Soibelman L., Garrett J.H. Automated defect detection for sewer pipeline inspection and condition assessment // *Automation in Construction*. 2009. Vol. 18(5). Pp. 87-96. doi: 10.1016/j.autcon.2008.12.003.
  15. Duran O., Althoefer K., Seneviratne L.D. Automated pipe defect detection and categorization using camera/laser-based profiler and artificial neural network // *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*. 2007. Vol. 4(1). Pp. 118-126. doi: 10.1109/TASE.2006.873225.
  16. Yang M.-D., Su T.-C. Automated diagnosis of sewer pipe defects based on machine learning approaches // *Expert Systems with Applications*. 2008. Vol. 35(3). Pp. 1327-1337. doi: 10.1016/j.eswa.2007.08.013.
  17. Фаворская М.Н., Нишчхал Н. Верификация разливов нефти на водных поверхностях по аэрофотоснимкам на основе методов глубокого обучения // *Информатика и автоматизация*. 2022. № 21(5). С. 937-962. doi: 10.15622/ia.21.5.4.
  18. Белозерский Л.А., Орешкина Л.В. Автоматизация обработки и анализа гистограмм в задачах распознавания космических изображений // *Исследование Земли из космоса*. 2009. № 3. С. 47-54.
  19. UAV photogrammetry for mapping and 3D modeling – Current status and future perspectives / F. Remondino, L. Barazzetti, F. Nex, M. Scaioni, D. Sarazzi // *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2011. № XXXVIII-1/C22. Pp. 25-31. doi: 10.5194/isprsarchives-XXXVIII-1-C22-25-2011.
  20. Aber J.S., Marzoff I., Ries J.B. *Small-Format Aerial Photography: Principles, Techniques and Geoscience Applications*. Elsevier, 2010. 266 p.
  21. Siebert S., Teizer J. Mobile 3D mapping for surveying earthwork projects using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) system // *Automation in Construction*. 2014. Vol. 41. Pp. 1-14. doi: 10.1016/j.autcon.2014.01.004.
  22. Tziavou O., Pytharouli S., Souter J. Unmanned Aerial Vehicle (UAV) based mapping in engineering geological surveys: Considerations for optimum results // *Engineering Geology*. 2018. Vol. 232(9). Pp. 12-21. doi: 10.1016/j.enggeo.2017.11.004.
  23. State-of-the-art technologies for UAV inspections / S. Jordan, J. Moore, S. Hovet, J. Box, J. Perry, K. Kirsche, D. Lewis, Z.T.H. Tse // *IET Radar, Sonar & Navigation*. 2017. Vol. 12(2). Pp. 151-164. doi: 10.1049/iet-rsn.2017.0251.
  24. Efficient trajectory planning for WSN data collection with multiple UAVs / D. Alejo, J.A. Cobano, G. Heredia, J.R. Martínez-de Dios, A. Ollero // *in Cooperative Robots and Sensor Networks 2015. Studies in Computational Intelligence*. Vol. 604. Springer, Cham., 2015. Pp. 53-75. doi: 10.1007/978-3-319-18299-5\_3.
  25. Sensor planning for a symbiotic UAV and UGV system for precision agriculture / P. Tokekar, J. Vander Hook, D. Mulla, V. Isler // *IEEE Transactions on Robotics*. 2016. Vol. 32. Pp. 1498-1511. doi: 10.1109/TRO.2016.2603528.
  26. The Flight Assembled Architecture installation: Cooperative construction with flying machines / F. Augugliaro, S. Lushashin, M. Hamer, C. Male, M. Hehn, M.W. Mueller, J.S. Willmann, F. Gramazio, M. Kohler, R. D'Andrea // *IEEE Control Systems Magazine*. 2014. Vol. 34(4). Pp. 46-64. doi: 10.1109/MCS.2014.2320359.
  27. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2019660078. Система сбора и анализа информации о качестве продукции 8D. Управление качеством (8D.Управление качеством); заявитель ООО «АСКОН-Бизнес-решения»; заявл. 17.06.2019, опубл. 30.07.2019.
  28. Comparative assessment of text-image fusion models for medical diagnostics / A.A. Lobantsev, N.F. Gusarova, A.S. Vatian, A.A. Kapitonov, A.A. Shalyto // *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy [Information and Control Systems]*. 2020. № 5. Pp. 70-79. doi: 10.31799/1684-8853-2020-5-70-79.
  29. Development of automated computer vision methods for cell counting and endometrial gland detection for medical images processing / D.I. Sergeev, A.E. Andreev, A.O. Drobintseva, S. Cenevska, N. Kukavitsa, P.D. Drobintsev // *Proceedings of the Institute for System Programming of the RAS*. 2020. Vol. 32(3). Pp. 119-130. doi: 10.15514/ISPRAS-2020-32(3)-11.
  30. Alexandrov D.V. Overview of face recognition algorithms for person identification // *Programmnyaya Ingeneria*. 2022. Vol. 13(7). Pp. 331-343. doi: 10.17587/prin.13.331-343.
  31. Козлов Д.А., Карнаухов Д.Д. Исследование процесса распознавания и сравнения отпечатков пальцев // *Вестник молодых ученых и специалистов Самарского университета*. 2018. № 2(13). С. 61-71.
  32. Посохов И.А. Визуализация и обработка информации о качестве непрерывнолитой заготовки // *Электротехнические системы и комплексы*. 2016. № 2(31). С. 35-43. doi: 10.18503/2311-8318-2016-2(31)-35-43.
  33. Прикладная цифровая платформа для оценки динамики качества опасных производственных объектов на металлургическом предприятии: структура и алгоритмы / М.Ю. Наркевич, О. С. Логунова, М.Б. Аркулис, А.И. Сагадатов, С.С. Климов, В.В. Кабанова, А.А. Николаев, Д.И. Дерябин // *Вестник Череповецкого государственного университета*. 2022. № 5(110). С. 29-48. doi: 10.23859/1994-0637-2022-5-110-3.
  34. Наркевич М.Ю., Корниенко В.Д., Полякова М.А. Визуальный контроль как основа для разработки автоматизированных систем дистанционного контроля и оценки качества зданий и сооружений на опасных производственных объектах // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2021. № 5. С. 570-576. doi: 10.24412/2071-6168-2021-5-570-576.
  35. Мониторинг состояния зданий и сооружений с помощью беспилотных летательных аппаратов: результаты пилотного эксперимента / М.Ю. Наркевич, О.С. Логунова, В.Д. Корниенко, А.А. Николаев, А.Н. Тюлюмов, Н.В. Злыдарев, Д.И. Дерябин // *Программное обеспечение для цифровизации предприятий и организаций: сб. тр. Всерос. науч.-практ. конф. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова*, 2021. С. 33-37.
  36. Разработка и применение методик контроля территории, зданий и сооружений ПАО «ММК» с использованием беспилотных воздушных судов (БВС). Этап № 01: отчет о НИОКР (промежуточ.); рук. М.Ю. Наркевич; исполн.: О.С. Логунова [и др.]. № ГР 121092000078-4. Магнитогорск, 2021. 274 с.
  37. Разработка и применение методик контроля территории, зданий и сооружений ПАО «ММК» с использованием беспилотных воздушных судов (БВС). Этап № 02: отчет о НИОКР (промежуточ.); рук. М. Ю. Наркевич; исполн.: О.С. Логунова [и др.]. № ГР 121092000078-4. Магнитогорск, 2021. 124 с.
  38. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2021666037. Automatic detection of damage parameters

from digital images / Наркевич М.Ю., Корниенко В.Д., Николаев А.А., Злыдарев Н.В., Логунова О.С., Тюлюмов А.Н.; заявитель ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»; заявл. 30.09.2021, опублик. 06.10.2021.

39. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2005. 1072 с.  
 40. Шапиро Л., Стокман Дж. Компьютерное зрение. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. 752 с.  
 41. Логунова О.С., Нуров Х.Х. Структура и алгоритмы про-

Поступила в редакцию 30 сентября 2022 г.

граммного обеспечения для автоматизированной оценки качества непрерывнолитого слитка // Автоматизация технологических и производственных процессов в металлургии. 2004. № 1. С. 168-174.

42. Организация автоматизированного рабочего места для оценки качества макроструктуры непрерывнолитых сортовых заготовок / О.С. Логунова, Х.Х. Нуров, В.В. Павлов, В.Г. Суспицын // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2006. № 3(15). С. 51-55.

Принята к печати 26 октября 2022 г.

## INFORMATION IN ENGLISH

### METHODOLOGY FOR COLLECTING AND PROCESSING INFORMATION TO MONITOR THE STATE OF THE TERRITORY, BUILDINGS AND STRUCTURES AT HAZARDOUS PRODUCTION FACILITIES OF A METALLURGICAL ENTERPRISE

Vladimir D. Kornienko

Postgraduate student, Leading engineer in the field of industrial safety expertise, The Institute of Energy and Computing Systems, the Department of Computer Science and Programming, The Research Institute "Prombezopasnost", Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, volodya.Kornienko2319@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0637-5765>

Mikhail Yu. Narkevich

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Head of the Department, the Department of Design and Construction of Buildings, Director of the Research Institute "Prombezopasnost", Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, narkevich\_mu@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6608-8293>

Oksana S. Logunova

D.Sc. (Engineering), Professor, Director of the Institute of Construction, Architecture and Art, Head of the Department of Computer Science and Programming, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, logunova66@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7006-8639>

Anna E. Kozlova

Master's Degree Student, the Institute of Energy and Computing Systems, the Department of Computer Science and Programming, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, kozlova-ann99@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3109-2185>

Ivan P. Zaytsev

Master's Degree Student, Engineer, the Institute of Construction, Architecture and Art, the Department of Urban Studies and Engineering Systems, the Research Institute "Prombezopasnost", Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, otakuvans@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6851-6017>

The purpose of the study is to increase the information reliability on the state of territories, buildings and structures at hazardous production facilities of a metallurgical enterprise, obtained using an unmanned aerial vehicle. The object of the study is the system of production control over the state of the territory, buildings and structures at hazardous production facilities of a metallurgical enterprise. The subject of the research is a technique for automated collection and processing of information based on computer methods of information processing. The study is carried out as part of research and development work at one of the leading ferrous metallurgy enterprises of the Russian Federation. The following methods were used in the study: analysis and synthesis for adequate decomposition of the study object into its constituent parts - elements, establishing links between them and the subject of study; decomposition to isolate constituent subtasks from the object and subject of research, to create chains of sequences of actions on selected subtasks; the experiment to study the features of natural conditions for collecting information. The result of the study are the developed methods: collection of information on the technical condition of the territory, buildings and structures at

hazardous production facilities of a metallurgical enterprise; processing visual information about the technical condition of the territory, buildings and structures at hazardous production facilities of a metallurgical enterprise. The results of the study are the basis for creating an automated system for monitoring the state of the territory, buildings and structures at hazardous production facilities of a metallurgical enterprise, the use of which will ensure in real time and on an ongoing basis: the receipt of information on the current parameters of the safe operation of the facility into the industrial safety management system control; signaling personnel about the slightest quantitative changes in previously identified defects and damage, as well as the appearance of new ones; operational and, consequently, effective targeted response of enterprise services to signals from the monitoring system.

**Keywords:** system of intellectual support in making managerial decisions; machine vision; remote control; Industrial Safety; hazardous production facilities; territory, buildings and structures; examination of the technical condition; applied digital

platform; expert system; image processing methods; unmanned aerial vehicle

REFERENCES

1. Order of Rostekhnadzor dated November 30, 2020 no. 471. Requirements for registration of objects in the state register of hazardous production facilities and maintenance of the state register of hazardous production facilities, forms of a certificate of registration of hazardous production facilities in the state register of hazardous production facilities. Moscow, MINYUST Publ., 2020. 157 p. (In Russian)
2. *Federalnaya sluzhba po ekologicheskomu, tekhnologicheskomu i atomnomu nadzoru* [Federal Service for Ecological, Technological and Nuclear Supervision]. Available at: <http://www.gosnadzor.ru/public/> (accessed 04 November 2022).
3. Veselov A. V., Kornienko V.D. A new promising design of pavement with a monolithic ribbed cement concrete pavement. *Stroitelnye materialy, oborudovanie, tekhnologii XXI veka* [Building materials, equipment, technologies of the XXI century], 2018, no. 5-6 (232-233), pp. 38-41. (In Russian)
4. GOST 31937-2011. Buildings and constructions. Rules of inspection and monitoring of the technical condition. Moscow, STANDARTINFORM Publ., 2014. 55 p. (In Russian)
5. Narkevich M. Yu. *Osnovy metrologii, standartizatsii, sertifikatsii i kontrolya kachestva* [Basics of metrology, standardization, certification and quality control]. Magnitogorsk, Novosibirsk State Technical University Publ., 2012. 136 p. (In Russian)
6. Veprzhitskiy I. Yu., Rytik N. A., Kustikova Yu. O. Operational control of buildings and structures. *Molodezhnye innovatsii: Sbornik materialov seminara molodykh uchenykh XXII Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii* [Collection of materials of the seminar of young scientists of the XXII International scientific conference "Youth innovations"]. Tashkent, 2019. Moscow: National Research Moscow State University of Civil Engineering Publ., 2019, pp. 210-213. (In Russian)
7. Panfilov A.V., Bakhteev O.A., Deryushev V.V., Korotkiy A.A. A system of adaptive remote monitoring and control of the operation of hazardous facilities based on a risk-based approach. *Bezopasnost tekhnogennykh i prirodnykh sistem* [Safety of technogenic and natural systems], 2020, no. 2, pp. 19-29. (In Russian). doi: 10.23947/2541-9129-2020-2-19-29
8. Panova E.A., Albrekht A.Ya. Refined specific electrical parameters of double-circuit power lines 110 kV for remote location of damage. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical systems and complexes], 2016, no. 4(33), pp. 35-40. (In Russian). doi: 10.18503/2311-8318-2016-4(33)-35-40
9. Decree of the Government of the Russian Federation dated December 31, 2020 no. 2415 "On conducting an experiment to introduce an industrial safety remote control system". URL: <https://docs.cntd.ru/document/573319188> (accessed 02 November 2022).
10. *O vnedrenii sistem distantsionnogo kontrolya v ramkakh realizatsii reform kontrolno-nadzornoj deyatel'nosti*. [On the introduction of remote control systems as part of the implementation of the reform of control and supervisory activities]. Available at: <http://government.ru/news/38172/> (accessed 02 November 2022).
11. *Biznes ne vidit smysla v eksperimente Rostekhnadzora po vnedrenii sistemy distantsionnogo kontrolya na OPO*. [Business does not see the point in Rostekhnadzor's experiment on the introduction of a remote control system at the OPO]. Available at: [https://finance.rambler.ru/economics/48755960/?utm\\_content=finance\\_media&utm\\_medium=read\\_more&utm\\_source=copypaste](https://finance.rambler.ru/economics/48755960/?utm_content=finance_media&utm_medium=read_more&utm_source=copypaste) (accessed 02 November 2022).
12. Zaurin R., Catbas F. N. Integration of computer imaging and sensor data for 912 structural health monitoring of bridges. *Smart Mater. Struct.* 2010, vol. 19(1). 015019. doi: 10.1088/0964-1726/19/1/015019
13. Duran O., Althoefer K., Seneviratne L. State of the art in sensor technologies for sewer inspection. *IEEE Sensors Journal*. 2002, vol. 2(2), pp. 73-81. doi: 10.1109/JSEN.2002.1000245
14. Guo W., Soibelman L., Garrett J.H. Automated defect detection for sewer pipeline inspection and condition assessment. *Automation in Construction*. 2009, vol. 18(5), pp. 87-96. doi: 10.1016/j.autcon.2008.12.003
15. Duran O., Althoefer K., Seneviratne L.D. Automated pipe defect detection and categorization using camera/laser-based profiler and artificial neural network. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*. 2007, vol. 4(1), pp. 118-126. doi: 10.1109/TASE.2006.873225
16. Yang M.-D., Su T.-C. Automated diagnosis of sewer pipe defects based on machine learning approaches. *Expert Systems with Applications*. 2008, vol. 35(3), pp. 1327-1337. doi: 10.1016/j.eswa.2007.08.013
17. Favorskaya M.N., Nishchikh N. Verification of oil spills on water surfaces from aerial photographs based on deep learning methods. *Informatika i avtomatizatsiya* [Computer Science and automation], 2022, vol. 21, no. 3, pp. 937-962. (In Russian). doi: 10.15622/ia.21.5.4
18. Belozerskiy L.A., Oreshkina L.V. Automation of histogram processing and analysis in space image recognition tasks. *Issledovanie Zemli iz kosmosa* [Exploration of the Earth from space], 2009, no. 3, pp. 47-54. (In Russian)
19. Remondino, F., Barazzetti, L., Nex, F., Scaioni, M., Sarazzi, D. (2011). UAV photogrammetry for mapping and 3D modeling – Current Status and Future Perspectives. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2011. no. XXXVIII-1/C22, pp. 25–31. doi: 10.5194/isprsarchives-XXXVIII-1-C22-25-201
20. Aber J.S., Marzloff I., Ries J.B. *Small-Format Aerial Photography: Principles, Techniques and Geoscience Applications*. Elsevier, 2010. 266 p.
21. Siebert S., Teizer J. Mobile 3D mapping for surveying earthwork projects using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) system. *Automation in Construction*. 2014, vol. 41, pp. 1-14. doi: 10.1016/j.autcon.2014.01.004
22. Tziavou O., Pytharouli S., Souter J. Unmanned Aerial Vehicle (UAV) based mapping in engineering geological surveys: Considerations for optimum results. *Engineering Geology*. 2018, vol. 232(9), pp. 12-21. doi: 10.1016/j.enggeo.2017.11.004
23. Jordan S., Moore J., Hovet S., Box J., Perry J., Kirsche K., Lewis D., Tse Z.T.H. State-of-the-art technologies for UAV inspections. *IET Radar, Sonar & Navigation*. 2017, vol. 12(2), pp. 151-164. doi: 10.1049/iet-rsn.2017.0251
24. Alejo D., Cobano J.A., Heredia G., Martínez-de Dios J.R., Ollero A. Efficient trajectory planning for WSN data collection with multiple UAVs. *Cooperative Robots and Sensor Networks 2015. Studies in Computational Intelligence*. Vol. 604. Springer, Cham., 2015, pp. 53-75. doi: 10.1007/978-3-319-18299-5\_3
25. Tokekar P., Vander Hook J., Mulla D., Isler V. Sensor planning for a symbiotic UAV and UGV system for precision agriculture. *IEEE Transactions on Robotics*. 2016, vol. 32, pp. 1498-1511. doi: 10.1109/TRO.2016.2603528
26. Augugliaro F., Lupashin S., Hamer M., Male C., Hehn M., Mueller M.W., Willmann J.S., Gramazio F., Kohler M., D'Andrea R. The Flight Assembled Architecture installation: Cooperative construction with flying machines, 2014, vol. 34(4), pp. 46-64. doi: 10.1109/MCS.2014.2320359
27. LLS "ASKON-Biznes-resheniya". System for collecting and analyzing information on product quality 8D. Quality management (8D. Quality management). Computer program RF, no. 2019660078, 2019. (In Russian)
28. Lobantsev A.A., Gusarova N.F., Vatian A.S., Kapitonov A.A., Shalyto A.A. Comparative assessment of



- text-image fusion models for medical diagnostics. *Information and Control Systems*. 2020, no. 5(108), pp. 70-79. doi: 10.31799/1684-8853-2020-5-70-79
29. Sergeev D.I., Andreev A.E., Drobintseva A.O., Cenevska S., Kukavitsa N., Drobintsev P.D. Development of automated computer vision methods for cell counting and endometrial gland detection for medical images processing. *Proceedings of the Institute for System Programming of the RAS*. 2020, vol. 32(3), pp. 119-130. doi: 10.15514/ISPRAS-2020-32(3)-11
  30. Alexandrov D. V. Overview of Face Recognition Algorithms for Person Identification. *Programmnyaya Ingeneria*. 2022, vol. 13(7), pp. 331-343. doi: 10.17587/prin.13.331-343
  31. Kozlov D.A., Karnaukhov D.D. Process of recognition and comparison of fingerprints. *Vestnik molodykh uchenykh i spetsialistov Samarskogo universiteta* [Bulletin of young scientists and specialists of the Samara University], 2018, no. 2(13), pp. 61-71. (In Russian)
  32. Posokhov I.A. Visualization and processing of information about the quality of continuously cast billet. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical systems and complexes], 2016, no. 2(31), pp. 35-43. (In Russian). doi: 10.18503/2311-8318-2016-2(31)-35-43
  33. Narkevich M. Yu., Logunova O.S., Arkulis M.B. An applied digital platform for assessing the quality dynamics of hazardous production facilities at a metallurgical enterprise: structure and algorithms. *Vestnik Cherepovetskogo gosudarstvennogo universiteta*. [Bulletin of Cherepovets State University], 2022, no. 5, pp. 29-48. (In Russian). doi:10.23859/1994-0637-2022-5-110-3
  34. Narkevich M.Yu., Kornienko V.D., Polyakova M.A. Visual control as a basis for the development of automated systems for remote control and assessment of the quality of buildings and structures at hazardous production facilities. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Bulletin of the Tula State University. Technical science], 2021, no. 5, pp. 570-576. (In Russian). doi: 10.24412/2071-6168-2021-5-570-576
  35. Narkevich M.Yu., Logunova O.S., Kornienko V.D., Nikolaev A.A., Tyulyumov A.N., Zlydarev N.V., Deryabin D.I. Monitoring the condition of buildings and structures using unmanned aerial vehicles: results of a pilot experiment. *Sbornik trudov Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Programmnoe obespechenie dlya tsifrovizatsii predpriyatiy i organizatsiy»* [Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference "Software for digitalization of enterprises and organizations"]. Magnitogorsk, NMSTU Publ., 2021, pp. 33-37. (In Russian)
  36. Narkevich M.Yu., Logunova O.S., Kornienko V.D., Kalitaev A.N., Egorova L.G., Nikolaev A.A., Tyulyumov A.N., Zlydarev N.V., Deryabin D.I. *Razrabotka i primeneniye metodik kontrolya territorii, zdaniy i sooruzheniy PAO "MMK" s ispolzovaniem bespilotnykh vozdushnykh sudov (BVS)* [Development and application of methods for monitoring the territory, buildings and structures of PJSC MMK using unmanned aerial vehicles (UAVs)]. Stage No. 01: R&D report (interim). Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2021. 274 p. (In Russian)
  37. Narkevich M.Yu., Logunova O.S., Kornienko V.D., Sagadatov A.I., Kalitaev A.N., Egorova L.G., Nikolaev A.A., Tyulyumov A.N., Zlydarev N.V., Deryabin D.I., Kozlova A.E., Chernyshova A.S., Gavrilov K.V. *Razrabotka i primeneniye metodik kontrolya territorii, zdaniy i sooruzheniy PAO "MMK" s ispolzovaniem bespilotnykh vozdushnykh sudov (BVS)* [Development and application of methods for monitoring the territory, buildings and structures of PJSC MMK using unmanned aerial vehicles (UAVs)]. Stage No. 02: R & D report (interim). Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2021. 124 p. (In Russian)
  38. Narkevich M.Yu., Kornienko V.D., Nikolaev A.A., Zlydarev N.V., Logunova O.S., Tyulyumov A.N. Automatic detection of damage parameters from digital images. *Computer program RF*, no. 2021665102, 2021.
  39. Gonsales R., Vuds R. *Tsifrovaya obrabotka izobrazheniy* [Digital image processing], Moscow, Tekhnosfera Publ., 2005. 172 p. (In Russian).
  40. Shapiro L., Stokman Dzh. *Kompyuternoe zreniye* [Computer vision], Moscow, BINOM. Laboratoriya znaniy Publ., 2006. 752 p. (In Russian)
  41. Logunova O.S., Nurov Kh.Kh. Structure and algorithms of software for automated quality assessment of continuously cast ingots. *Avtomatizatsiya tekhnologicheskikh i proizvodstvennykh protsessov v metallurgii* [Automation of technological and production processes in metallurgy], 2004, no. 1, pp. 168-174 (In Russian)
  42. Logunova O.S., Nurov Kh.Kh., Pavlov V.V., Suspitsyn V.G. Organization of an automated workplace for assessing the quality of the macrostructure of continuously cast varietal blanks. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Bulletin of Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov], 2006, no. 3(15), pp.51-55. (In Russian)

Методика сбора и обработки информации для контроля состояния территории, зданий и сооружений на опасных производственных объектах металлургического предприятия / В.Д. Корниенко, М.Ю. Наркевич, О.С. Логунова, А.Е. Козлова, И.П. Зайцев // *Электротехнические системы и комплексы*. 2022. № 4(57). С. 76-87. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-4\(57\)-76-87](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-4(57)-76-87)

Kornienko V.D., Narkevich M.Yu., Logunova O.S., Kozlova A.E., Zaytsev I.P. Methodology for Collecting and Processing Information to Monitor the State of the Territory, Buildings And Structures at Hazardous Production Facilities of a Metallurgical Enterprise. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2022, no. 4(57), pp. 76-87. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-4\(57\)-76-87](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-4(57)-76-87)

Васильев Г.В., Бердонос В.Д.

Комсомольский-на-Амуре государственный университет

## МЕТОДИКА ПО ЭФФЕКТИВНОМУ ПРИМЕНЕНИЮ ГИБРИДНЫХ МОДЕЛЕЙ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ

Планирование энергосистемы отвечает за производство, передачу и распределение электроэнергии. Таким образом, точный прогноз потребления электроэнергии имеет важное значение, поскольку он служит основой для управления энергопотреблением и оперативных решений. Это стало бы большим шагом вперед для производителей энергии. Кроме того, усовершенствованная обработка данных об энергии открывает новые возможности для сбора данных, их изучения, а также для более точного прогнозирования. В результате исследователи во всем мире предпринимают попытки повысить прогнозы спроса на энергию. Поэтому энергетическим компаниям необходимо исследовать модели, чтобы лучше прогнозировать и планировать использование энергии. Одним из подходов к решению этой проблемы является оценка потребления энергии на уровне потребителя. Задача прогнозирования энергопотребления представляет собой задачу регрессии временных рядов. Она состоит в прогнозировании потребления энергии на следующие несколько дней с учетом конечной истории клиента. Методы машинного обучения показали многообещающие результаты в различных задачах, включая задачи временных рядов и регрессии. Часть этих многообещающих результатов связана с глубокими нейронными сетями. Хотя глубокие архитектуры моделей исследовались в других областях, они не использовались для решения проблемы прогнозирования энергопотребления. В этой работе предлагается новая эффективная система для прогнозирования ежемесячного потребления энергии с использованием методов глубокого обучения. Авторы проанализировали две модели машинного обучения, разработали несколько архитектур моделей нейронных сетей. Исследование моделей проводилось на наборе данных, который включал в себя исторические данные за 10 лет. Результаты показали, что итоговая архитектура гибридной модели может прогнозировать ежечасное потребление энергии с относительной ошибкой 5%. Предлагаемое решение могло бы подействовать на производителей/распределителей энергии в качестве помощи интеллектуальным счетчикам для принятия более эффективных решений по сокращению общего потребления энергии за счет ограничения производства энергии.

**Ключевые слова:** машинное обучение, нейронные сети, XGBoost, LSTM, RNN, CNN, прогнозирование энергопотребления, временные ряды, энергетика

### ВВЕДЕНИЕ

По мере того, как с годами росли наши города, росла и наша зависимость от энергии для обеспечения комфортных условий для нахождения в здании. Потребление энергии в жилом секторе резко возросло в последние годы, в основном из-за роста населения и потребности в увеличении жилых и коммерческих площадей.

Сейчас мир стремится к сокращению выбросов. Текущие технологии дают возможность для повышения энергоэффективности. Когда дело доходит до зданий, вопрос энергоэффективности вызывает огромную озабоченность у владельцев и управляющих недвижимостью, так как это является частью их расходов. Поскольку такая огромная часть энергоснабжения идет на коммерческие здания, такие как школы и офисы, которые люди часто посещают ежедневно, легко понять, сколько денег и энергии можно сэкономить, если наши здания будут максимально эффективными. Так уж получилось, что лучшая стратегия для достижения энергоэффективности в зданиях – это так называемое «прогнозирование». Энергетическое прогнозирование – это практика использования статистических данных для прогнозирования уровней потребления и соответствующих расходов на коммунальные услуги как в краткосрочной, так и в долгосрочной перспективе.

С ростом исследований в области энергоэффективности зданий и разработки решений прогнозирование энергопотребления зданий набирает обороты. Благодаря достижениям в развитии датчиков и программ-

ного обеспечения мы теперь можем предсказывать ее. Стратегически потребляя энергию на основе прогнозов использования и внешних условий, здания могут быть более прибыльными. Прогнозирование энергопотребления здания может служить инструментом предварительной оценки для управляющих объектами и систем автоматизации зданий для выявления любых различий между прогнозируемым и фактическим энергопотреблением. Чтобы прогнозировать спрос на энергию, руководители объектов и проекты по вводу в эксплуатацию зданий используют точные прогнозы энергопотребления для принятия стратегий энергосбережения и улучшения работы чиллеров, бойлеров, накопителей энергии и т.п.

Главная задача – это предсказать, как потребители будут использовать энергию, а затем соответствующим образом организовать работу коммунальных служб. И также учитывать новые элементы, такие как программное обеспечение для управления энергопотреблением, и заботу о перезарядке электромобилей.

Авторы провели анализ моделей машинного обучения [1], нейронных сетей [1-3, 5] и гибридных моделей искусственного интеллекта [2, 6-9], таких как XGBoost [10], RNN [4, 11], LSTM [2, 12-18], CNN [19], которые применяются в разных сферах. Изучили работу с временными рядами [1, 20-28].

### АКТУАЛЬНОСТЬ

Чрезвычайная ситуация со спросом на электроэнергию усугубляется недавним сильным экономическим развитием и быстрой урбанизацией. Прогнозирование спроса на электроэнергию становится критиче-

ски важным в электроэнергетическом секторе, поскольку оно служит основой для принятия важных решений в области эксплуатации и управления энергосистемой.

Ценообразование на энергию в значительной степени зависит от экономики спроса и предложения. В идеальном мире, по крайней мере в контексте традиционной энергосистемы, которая непрерывно генерирует и распределяет электроэнергию, нам потребуется одинаковое количество энергии в течение дня. К сожалению, это не так. Каждый день спрос на электроэнергию чередуется с периодами низкого и высокого спроса. Рано утром, когда большинство людей еще не встали с постели, потребление электроэнергии относительно невелико. Но во время дневной суеты, когда большинство людей включают свет, возятся с термостатами или печатают на своих компьютерах, потребность в электроэнергии резко возрастает. Колебания спроса на электроэнергию также зависят от того, какой сейчас день недели. Потребление энергии в праздничные и выходные дни обычно намного меньше по сравнению с потреблением энергии в обычный будний день, поскольку многие предприятия закрыты и, следовательно, им не требуется столько энергии.

Прогнозирование потребления электроэнергии считается проблемой временного ряда, в котором датчики производят данные с неопределенностями, избыточностью, пропущенными значениями и т. д.

С появлением машинного обучения становится все более возможным точное прогнозирование будущего энергопотребления. Точные прогнозы дают двойную выгоду: во-первых, менеджеры получают ключевое представление о факторах, влияющих на потребление энергии их зданием, предоставляя возможности для их устранения и повышения энергоэффективности. Во-вторых, прогнозы служат эталоном для выявления аномально высокого/низкого энергопотребления и предупреждают менеджеров о неисправностях в здании.

Обычные методы машинного обучения из всех сил пытаются надежно прогнозировать использование энергии из-за неустойчивых элементов поведения или сезонных тенденций. Трудность заключается в нелинейности и изменчивости потребления энергии в реальном времени, которое очень чувствительно к изменениям внешних факторов. Например, известно, что температура окружающей среды значительно влияет на потребность здания в энергии через отопление и кондиционирование воздуха.

Соответствие потребления электроэнергии правильному уровню снабжения имеет решающее значение, поскольку избыточное количество поставляемой электроэнергии невозможно сохранить, если только оно не будет преобразовано в другие формы, что влечет за собой дополнительные затраты и ресурсы. В то же время недооценка энергопотребления может иметь фатальные последствия, поскольку избыточный спрос может привести к перегрузке линии снабжения и даже к отключению электроэнергии. Очевидно, что тщательный мониторинг энергопотребления зданий – будь то офисные, коммерческие или бытовые – дает ощутимые преимущества.

## МЕТОДИКА

Сформулируем задачу прогнозирования электропотребления заданного географического района в виде задачи регрессии временного ряда.

Задача решается на ближайшие 3 дня. Эта установка оправдана экономической и управленческой ценностью ожидаемого объема производства – легко спланировать энергоснабжение на следующую неделю, имея прогнозируемый спрос на потребление энергии.

Потребление электроэнергии измеряется в Вт·ч. С точки зрения электромагнетизма один ватт – это скорость, с которой выполняется работа.

В целом предлагаемое техническое решение включает следующие шаги:

- Шаг 1 – предварительная обработка данных [29].
- Шаг 2 – разработка модели.
- Шаг 3 – оценка модели.

### *Шаг 1: предварительная обработка данных*

Для проверки гипотезы и моделей был выбран набор данных, который находится в свободном доступе. Этот набор данных содержит более 10 лет данных о почасовом потреблении энергии от PJM в мегаваттах.

PJM Interconnection LLC – региональная передающая организация в США. Она является частью сети Eastern Interconnection, управляющей системой электропередачи, обслуживающей все или некоторые штаты Делавэр, Иллинойс, Индиана, Кентукки, Мэриленд, Мичиган, Нью-Джерси, Северная Каролина, Огайо, Пенсильвания, Теннесси, Вирджиния.

Во время анализа набора данных были решены несколько проблем, а именно:

- сортировка данных по дате и времени;
- удаление дубликатов.

### *Шаг 2: разработка модели*

Для сравнения моделей результаты будут представлены в виде графика, где синей линией будут показаны реальные значения ежечасного потребления энергии, а зеленой линией показаны прогнозируемые значения.

Prophet – это процедура прогнозирования данных временных рядов на основе аддитивной модели, в которой нелинейные тренды соответствуют годовой, еженедельной и ежедневной сезонности. Он лучше всего работает с временными рядами, которые имеют сильные сезонные эффекты и несколько сезонов исторических данных. Prophet устойчив к отсутствующим данным и сдвигам в тренде и обычно хорошо справляется с выбросами. Prophet является программным обеспечением с открытым исходным кодом, выпущенным командой американских разработчиков. Результат обучения представлен на **рис. 1**.

Extreme Gradient Boosting (XGBoost) – это библиотека с открытым исходным кодом, которая обеспечивает эффективную и действенную реализацию алгоритма повышения градиента. Проблемы регрессионного прогнозного моделирования включают прогнозирование числового значения, такого как курс доллара. XGBoost можно использовать непосредственно для прогнозного регрессионного моделирования. Результат обучения представлен на **рис. 2**.

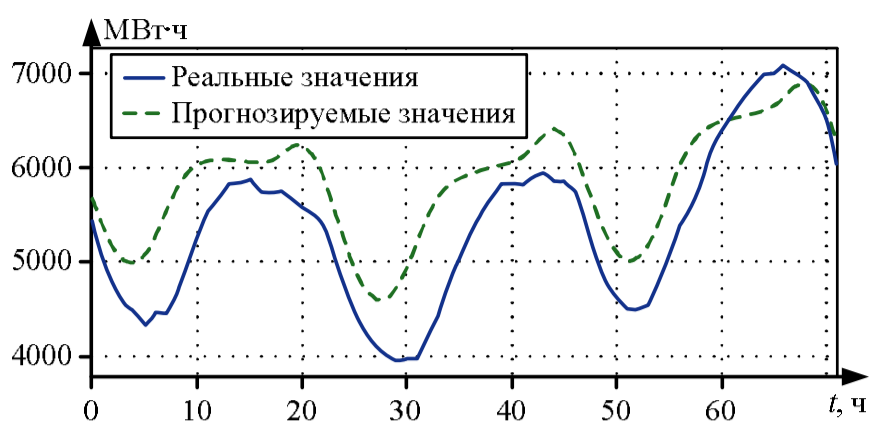


Рис. 1. Результаты обучения на модели Prophet

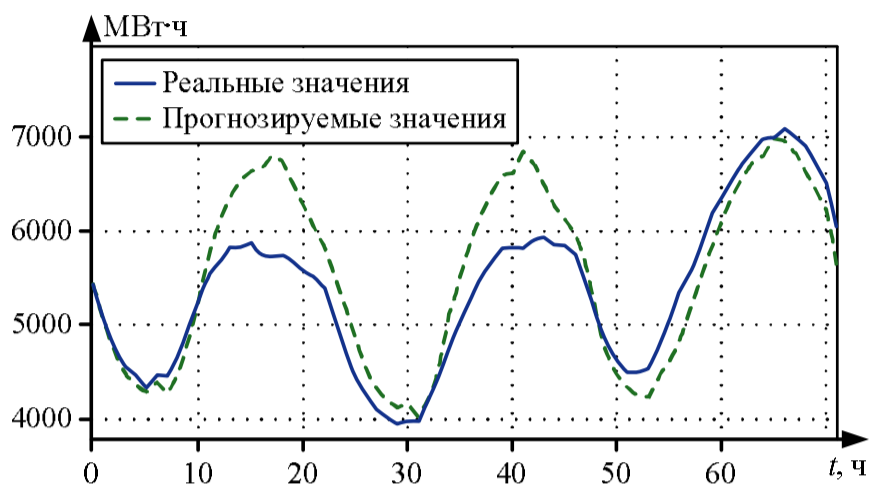


Рис. 2. Результаты обучения на модели XGBRegressor

LSTM. Сети с долговременной кратковременной памятью, представляют собой особый вид рекуррентной нейронной сети, способный изучать долгосрочные зависимости. LSTM специально разработана, чтобы избежать проблемы долгосрочной зависимости. Запоминание информации в течение длительного периода времени практически является их поведением по умолчанию. LSTM имеет возможность удалять или добавлять информацию в состояние ячейки, тщательно регулируемую структурами, называемыми воротами. Ворота – это способ опционального пропуска информации. Они состоят из слоя сигмовидной нейронной сети и операции поточечного умножения. Результат обучения представлен на рис. 3.

Multi-layer LSTM. Модель состоит из трех слоев LSTM. Это обеспечивается следующим путем. Каждая ячейка памяти LSTM требует ввода матрицы. Когда LSTM обрабатывает одну входную последовательность временных шагов, каждая ячейка памяти будет выводить одно значение для всей последовательности в виде двумерного массива. Чтобы сложить слои LSTM, была изменена конфигурация предыдущих слоев LSTM, чтобы вывести матрицу в качестве входных данных для последующего слоя. Результат обучения представлен на рис. 4.

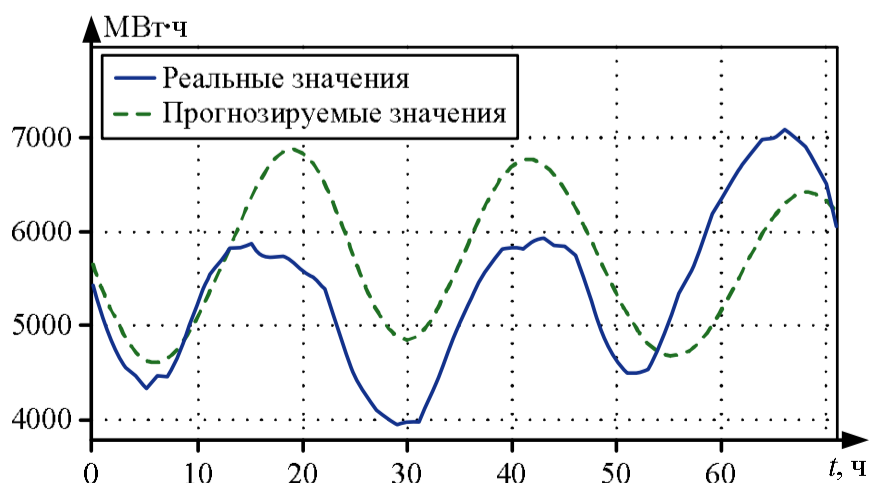


Рис. 3. Результаты обучения на модели LSTM

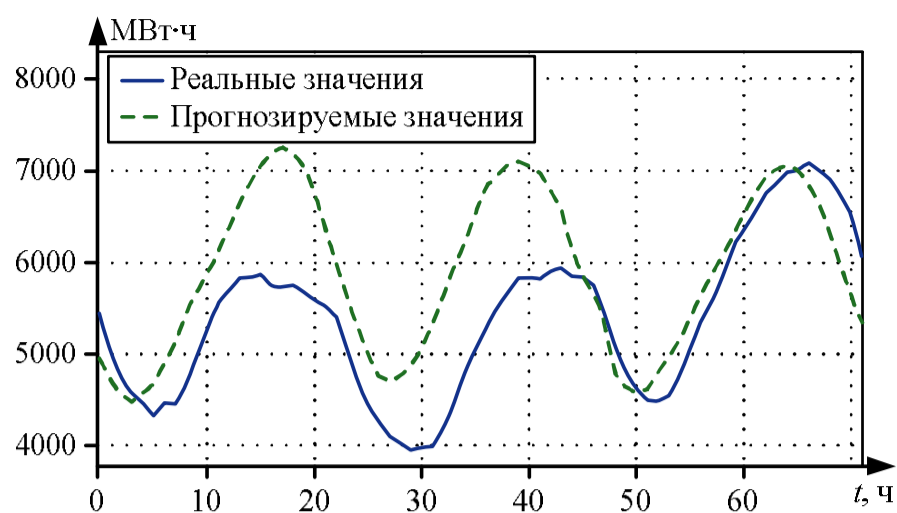


Рис. 4. Результаты обучения на модели Multi-layer LSTM

Bidirectional LSTM. Двухнаправленная долговременная память – это процесс, при котором любая нейронная сеть получает информацию о последовательности в обоих направлениях назад (из будущего в прошлое) или вперед (из прошлого в будущее). В двухнаправленном режиме наш ввод течет в двух направлениях, что отличает Bidirectional LSTM от обычного LSTM. С помощью обычного LSTM мы можем сделать поток ввода в одном направлении, либо назад, либо вперед. Однако в двухнаправленном режиме мы можем сделать входной поток в обоих направлениях, чтобы сохранить будущую и прошлую информацию. Результат обучения представлен на рис. 5.

Conv + LSTM. Одномерный слой свертки (например, временная свертка). Этот слой создает ядро свертки, которое сворачивается с входными данными слоя в одном пространственном (или временном) измерении для создания тензора выходных данных. Преимущества данной гибридной модели следующие. Слой Conv1D сглаживают входные временные ряды, поэтому нам не нужно добавлять значения скользящего среднего или скользящего стандартного отклонения во входные функции. Результат обучения представлен на рис. 6.

TimeDistributed Conv + LSTM. Эта оболочка позволяет применять слой к каждому временному срезу ввода. Измерение индекса первого входа будет считаться временным измерением. Результат обучения представлен на рис. 7.

Модель TimeDistributed Conv + Bidirectional LSTM + LSTM. Модель объединяет вышеописанные архитектуры. Результат обучения представлен на рис. 8, а.

ConvLSTM2D. Подобно LSTM, но входные преобразования и рекуррентные преобразования являются сверточными. Вместо умножения матриц модель выполняет операции свертки и сохраняет входные размеры. Результат обучения представлен на рис. 8, б.

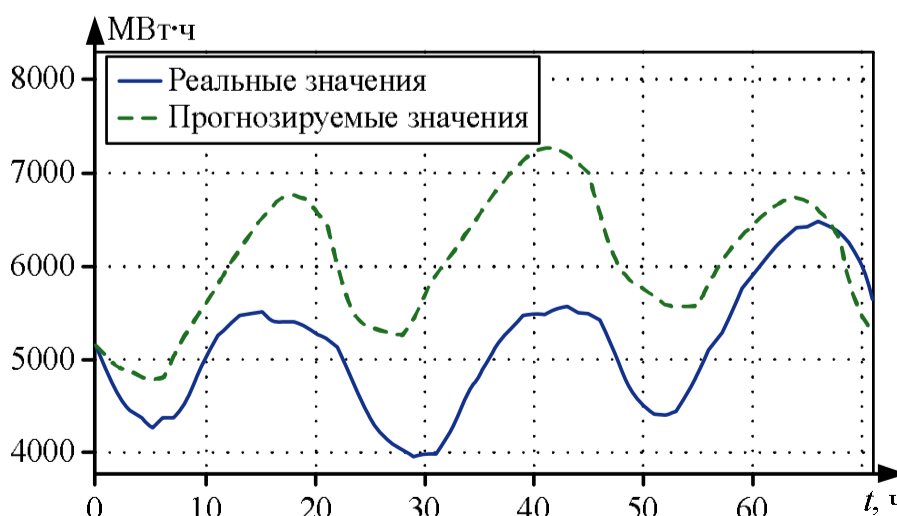


Рис. 5. Результаты обучения на модели Bidirectional LSTM

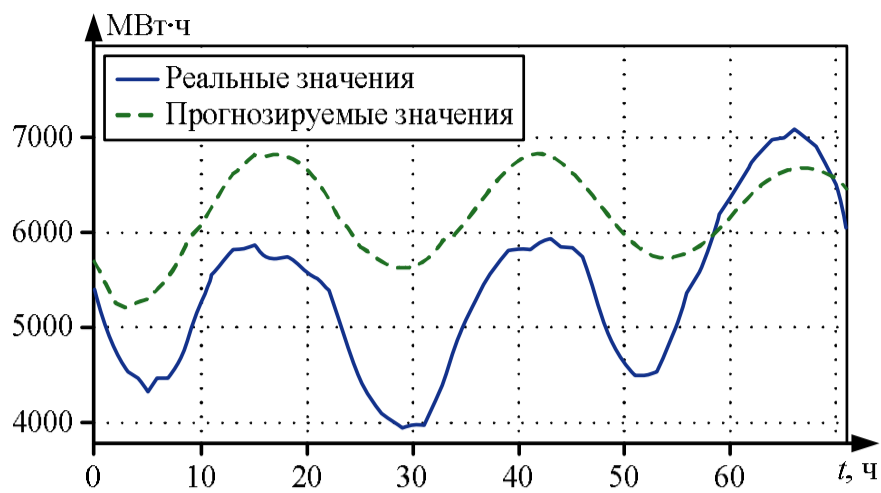


Рис. 6. Результаты обучения на модели Conv + LSTM

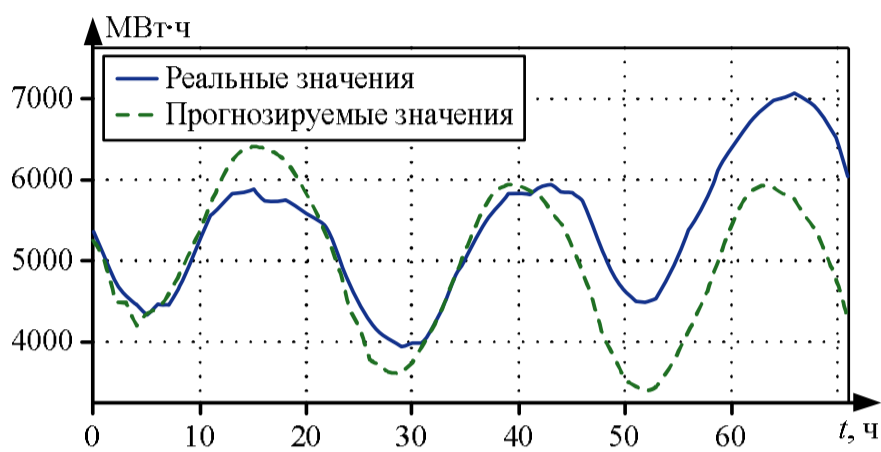


Рис. 7. Результаты обучения на модели TimeDistributed Conv + LSTM

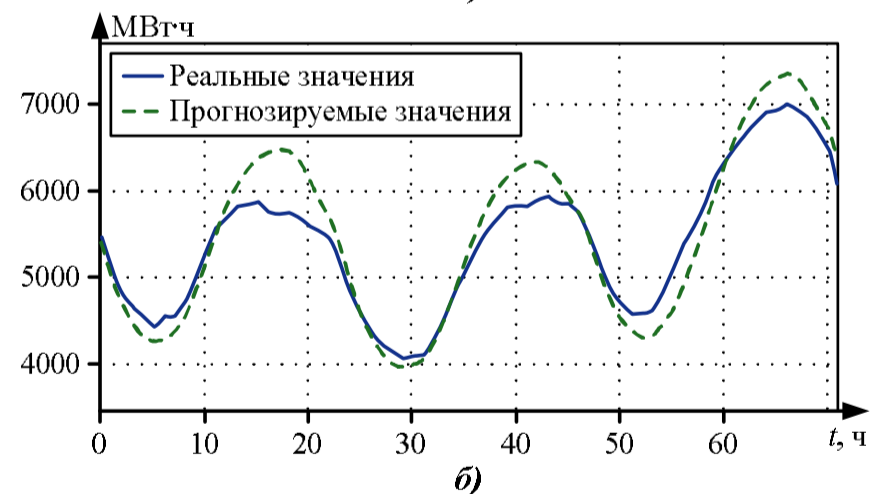
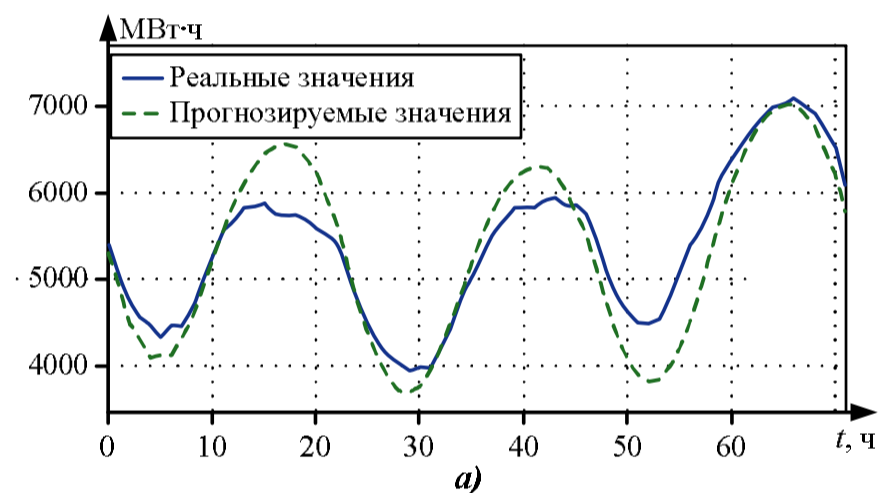


Рис. 8. Результаты обучения на модели TimeDistributed Conv + Bidirectional LSTM + LSTM (а) и ConvLSTM2D (б)

Шаг 3: Оценка модели

Для нейронных сетей функция активации была выбрана ReLU (Rectified Linear Unit).

Выпрямленная линейная функция активации – это нелинейная функция или кусочно-линейная функция, которая будет выводить входные данные напрямую, если она положительна, в противном случае она будет выводить ноль. Функция более эффективна, чем ее предшественники, такие как sigmoid или tanh.

Математически это выражается как:

$$f(x) = \max(0, x).$$

ReLU используется в скрытых слоях вместо sigmoid или tanh, поскольку использование sigmoid или tanh в скрытых слоях приводит к печально известной проблеме «исчезающего градиента». «Исчезающий градиент» предотвращает получение важной информации более ранними слоями при обратном распространении сети. Сигмовидную функцию, которая является логистической функцией, предпочтительнее использовать в задачах, связанных с бинарной классификацией, и только в выходном слое, поскольку выходные данные сигмовидной функции колеблются от 0 до 1.

Преимущества ReLU:

- Более простые вычисления: производная остается постоянной, то есть 1 для положительного входа, и, таким образом, сокращает время, необходимое для обучения модели и минимизации ошибок.

- Репрезентативная разреженность: функция способна выводить истинное нулевое значение.

- Линейность: функции линейной активации легче оптимизировать и они обеспечивают плавный поток. Таким образом, функция лучше всего подходит для контролируемых задач на больших наборах размеченных данных.

Функция потерь была выбрана MSE. Среднеквадратическая ошибка (Mean Squared Error – MSE) измеряет количество ошибок в статистических моделях. Она оценивает среднюю квадратичную разницу между наблюдаемыми и прогнозируемыми значениями. Когда модель не имеет ошибок, MSE равняется нулю. По мере увеличения ошибки модели ее значение увеличивается. Среднеквадратическая ошибка также известна как среднеквадратичное отклонение (Mean Squared Deviation - MSD).

В регрессии среднеквадратическая ошибка представляет собой среднеквадратичную невязку. В статистических моделях невязка – это разница между наблюдаемым значением и средним значением, которое модель предсказывает для этого наблюдения. Остаточные значения особенно полезны в процедурах регрессии и дисперсионного анализа, поскольку они показывают степень, в которой модель учитывает вариации наблюдаемых данных.

По мере того как точки данных приближаются к линии регрессии, модель имеет меньшую ошибку, уменьшая MSE. Модель с меньшей ошибкой дает более точные прогнозы.

Формула для MSE следующая:

$$MSE = \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{n},$$

где  $y_i$  – наблюдаемое значение;  $\hat{y}_i$  – соответствующее прогнозируемое значение;  $n$  – количество наблюдений.

Вычисления среднеквадратичной ошибки аналогичны дисперсии.

MSE представляет собой средний квадрат расстояния между наблюдаемыми и прогнозируемыми значениями. Поскольку в нем используются квадратные единицы, а не натуральные единицы данных, интерпретация менее интуитивна. Возведение разностей в квадрат устраняет отрицательные значения разностей и гарантирует, что среднеквадратическая ошибка всегда больше или равна нулю. Это почти всегда положительное значение. Кроме того, возведение в квадрат

увеличивает влияние больших ошибок. Эти расчеты непропорционально наказывают большие ошибки больше, чем меньшие ошибки.

Среднеквадратичную ошибку RMSE (Root Mean Square Error – RMSE) и среднюю абсолютную ошибку MAE (Mean Absolute Error) авторы также учитывали в процессе обучения. Формула RMSE следующая:

$$RMSE = \sqrt{MSE}.$$

RMSE аналогичен стандартному отклонению.

MAE – это функция потерь, используемая для регрессии. Потери – это средние наблюдаемые данные абсолютных разностей между истинными и прогнозируемыми значениями. MAE определяется по формуле:

$$MAE = \frac{\sum |y_i - \hat{y}_i|}{n}.$$

Относительное отклонение являлось ключевой метрикой. Дополнительными метриками было время обучения и абсолютное отклонение.

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для экспериментов каждой модели была поставлена задача спрогнозировать потребление энергии на 3 дня вперед. Авторы составили план экспериментов, в котором установили контрольные значения: время обучения 15 мин; абсолютная ошибка 500 МВт·ч; относительная ошибка 10%.

Эксперименты проводились на следующем техническом оборудовании:

- CPU AMD Ryzen 9 5900HX.
- GPU GeForce RTX 3060 6 Гб, 100 Вт, ~3840 CUDA ядер.
- RAM 32 Гб, 3200 МГц.

В ходе исследований было выявлено, что машинное обучение хорошо справляется со структурированными данными. Тем не менее авторы смогли разработать архитектуру нейронной сети, которая выполняла контрольные значения.

После проведения ряда экспериментов авторы выбрали последнюю разработанную архитектуру гибридной нейронной сети. Модель принимает массив данных, после чего для каждого значения из массива получает ряд значений на N шагов назад. То есть, если исходными данными будет массив  $Y = [1434,0 \ 1489,0 \ 1620,0]$ , то для обучения модели получаем матрицу:

$$X = \begin{bmatrix} 1621,0 & 1536,0 & 1500,0 \\ 1536,0 & 1500,0 & 1434,0 \\ 1500,0 & 1434,0 & 1489,0 \end{bmatrix},$$

где первая строка «1621,0 1536,0 1500,0» является значениями на 3 шага назад – от 1434,0 и т.д.

Для прогнозирования более 3 дней реализован алгоритм, который считывает прогнозируемые значения с выхода гибридной модели. Далее полученные значения подставляются в текущий набор данных и отправляются на обучения и т.д. Если запустить алгоритм на прогнозирование ежечасного потребления электроэнергии на 6 дней вперед, то модель принимает временной ряд, обучается и выдает прогноз на 3 дня вперед, после чего этот

прогноз объединяет с входным варенным рядом (dataset – набор данных) и обучается повторно, после чего снова выдает прогноз на 3 дня вперед. Тем самым получаем уже прогноз на 6 дней вперед.

Для оптимизации работы гибридной модели были вынесены следующие параметры: количество скрытых слоев и количество шагов.

Для избегания переобучения нейронной сети реализована функция, которая принимает аргументом минимально допустимое значение ошибки. Помимо этого, еще сохраняются веса модели. Таким образом, если следующий цикл обучения будет хуже, чем предыдущий, то для прогнозирования будет использоваться предыдущий файл с весами.

Для решения проблем с изменением климата авторы реализовали лямбду-архитектуру. Процесс разделен на два потока. Первый поток «долгий». Модель прогнозирует значения энергопотребления на год вперед на основе набора данных, состоящих из показателей энергии за несколько лет. Такой объем вычислений выполняется не быстро.

Второй поток «быстрый». Он выполняется на существенно меньшем объеме данных и прогнозирует потребление энергии на месяц вперед. Данный поток выполняется намного быстрее, чем первый поток процесса. Таким образом, второй поток «быстрый», с большей вероятностью учтет изменения климата, так как объем данных будет невелик. То есть в наборе данных будут входить все значения с уже измененным климатом, а исторические данные с далеким прошлым, где климат был другой, не будут присутствовать. В итоге, когда первый поток «долгий» завершится, происходит корректировка данных относительно результатов с «быстрого» потока. Если отклонения выше порогового значения между двумя результатами «быстрого» и «медленного» потока, то взять средние или более точные данные с одного или другого потока.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Когда дело доходит до оптимизации управления зданием, прогнозирование позволяет руководителям объектов планировать определенные задачи так, чтобы они совпадали с часами пиковой или непииковой нагрузки, что позволит максимально равномерно распределить потребление энергии в течение дня. Это стратегическое планирование снижает энергетическую нагрузку в час пик, когда электроэнергия является наиболее дорогой, снижая затраты на электроэнергию и обеспечивая максимальную экономию. Прогнозирование энергопотребления уникально для каждого здания из-за таких факторов, как географическое положение (поскольку расстояние от источника питания напрямую влияет на затраты на электроэнергию), текущие погодные условия за пределами здания и функция здания (независимо от того, является ли оно офисным зданием, торговая площадь, многоквартирный дом и др.). Таким образом, управляющие объектами должны проявлять инициативу в прогнозировании энергопотребления, чтобы разработать наиболее эффективный способ максимизировать свои финансовые сбережения, а также снизить свой углеродный след.

Прогноз потребления электроэнергии имеет решающее значение в функционировании энергосистемы, а обработка временных рядов представляет собой сложную задачу.

Сильные стороны искусственной нейронной сети (ИНС) включают явный прирост производительности по сравнению с обычными методами машинного обучения. Однако компромиссом для такого повышения производительности является то, что требуются большие объемы данных (проклятие размерности), и, таким образом, вычислительные затраты могут стать большими как во времени, так и в денежном аспекте. Внутренняя работа того, как учится ИНС, также остается «черным ящиком».

В заключение авторы построили точную гибридную модель нейронной сети для прогнозирования энергопотребления на несколько дней вперед. Модель превысила контрольную ключевую метрику «относительная ошибка» в два раза, а дополнительная метрика «время обучения» была удовлетворена. Тем самым обеспечивая благоприятные условия использования. Таким образом, затраты временных и денежных ресурсов будут небольшими.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Kitov V.V., Mishustina M.V., Ustyuzhanin A.O. Time series prediction survey of statistical, machine learning and deep learning methods: historical aspects // Вопросы истории. 2022. № 4-2. С. 201-218. doi: 10.31166/VoprosyIstorii202204Statyi40
2. Berdonosov V.D., Vasilev G.V., Zhivotova A.A. Analysis and development potential of predictive models for energy flows of autonomous hybrid energy systems // Journal of physics: conference series. 2021. Vol. 2096. 012024. doi: 10.1088/1742-6596/2096/1/012024
3. Исследование и применение архитектур глубоких нейронных сетей для классификации на многомерных временных рядах / А.С. Есенков, Е.М. Захарова, М.Д. Ковалева, Д.Е. Константинов, И.С. Макаров, Е.А. Панковец // Известия российской академии наук. Теория и системы управления. 2022. № 4. С. 133-142. doi: 10.31857/s0002338822040072
4. Васильев Г.В., Бердонос В.Д. Разработка и сравнение моделей прогнозирования потребления электроэнергии с помощью рекуррентных нейросетей с долгой краткосрочной памятью // Наука, инновации и технологии: от идей к внедрению: материалы Международной научно-практической конференции. Комсомольск-на-Амуре, 2022. С. 203-206.
5. Васильев Г.В., Бердонос В.Д. Анализ моделей потоков энергий гибридных энергетических систем // Актуальные проблемы информационно-телекоммуникационных технологий и математического моделирования в современной науке и промышленности: материалы I Международной научно-практической конференции молодых учёных. Комсомольск-на-Амуре, 2022. С. 191-194. doi: 10.17084/978-5-7765-1488-3-2021-191
6. Deep CNN-LSTM-based dstatcom for power quality enhancement in microgrid / P. Kandasamy, K. Chandrasekaran, R. Natarajan, J. Selvaraj // Journal of circuits, systems, and computers. 2022. Vol. 31. No. 7. 2250130. doi: 10.1142/S0218126622501304
7. Enterprise economic forecasting method based on ARIMA-LSTM model / X. Dong, X. Zong, J. Wang, P. Li // Lecture notes of the institute for computer sciences, social-informatics and telecommunications engineering. 2022. Vol. 429. Pp 36-57. doi: 10.1007/978-3-030-99188-3\_4
8. Sentinel-1 spatiotemporal simulation using convolutional LSTM for flood mapping / N.I. Ulloa, S.H. Chiang, S.H. Yun, R. Furuta // Remote sensing. 2022. Vol. 14. No. 2. 246. doi: 10.3390/rs14020246
9. Automated detection of rehabilitation exercise by stroke patients using 3-layer CNN-LSTM model / Z.U. Rahman, S.I. Ullah, A. Salam, T. Rahman, I. Khan, B. Niazi // Journal of Healthcare Engineering. 2022. Vol. 2022. 1563707. doi: 10.1155/2022/1563707
10. Адаптивные ансамблевые модели для среднесрочного прогнозирования выработки электроэнергии гидроэлектростанциями в изолированных энергосистемах с учетом изменений температуры / М.Х. Сафаралиев, П.В. Матренин, С.А. Дмитриев, Дж.С. Ахьеев, С.Е. Кокин // Электротехнические системы и комплексы. 2022. № 1(54). С. 38-45. doi: 10.18503/2311-8318-2022-1(54)-38-45
11. Zhao B., Li X., Lu X. CAM-RNN: Co-attention model based RNN for video captioning // IEEE Trans. Image Process. 2019. Vol. 28. No. 11. Pp. 5552-5565. doi: 10.1109/TIP.2019.2916757
12. Predicting Alzheimer's disease using LSTM / X. Hong, R. Lin, C. Yang, N. Zeng, C. Cai, J. Gou, J. Yang // IEEE Access. 2019. Vol. 7. Pp. 80893-80901. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2919385
13. Алексеев А.О., Антонов В.И. Подтверждение Конфигурации Электрической сети с помощью LSTM-нейронной сети // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике: материалы XIII Всероссийской научно-технической конференции. Чебоксары, 2022. С. 340-344.
14. Hasoon S.O., Al-Hashimi M.M. Hybrid deep neural network and long short term memory network for predicting of sunspot time series // International Journal of Mathematics and Computer Science. 2022. Vol. 17. No. 3. Pp. 955-967.
15. Мейзер М.В., Северьянова Е.Д. Пример прогнозирования временных рядов с помощью рекуррентной нейронной сети LSTM // Профессиональные коммуникации в научной среде - фактор обеспечения качества исследований: материалы XI Всероссийской научно-практической конференции. Санкт-Петербург, 2022. С. 211-214.
16. Тимофеев А.Г., Лебединская О.Г. Модель применения сверточной нейронной сети (CNN) в сочетании с долговременной памятью (LSTM) прогнозирования цены на нефть в условиях неопределенности // Транспортное дело России. 2022. № 2. С. 54-59. doi: 10.52375/20728689\_2022\_2\_54
17. Истамкулов Х.С. Анализ использования и применения архитектуры LSTM // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. 2022. № 6. С. 77-80. doi: 10.37882/2223-2966.2022.06.16
18. A wind power forecasting model using LSTM optimized by the modified bald eagle search algorithm / W. Tuerxun, L. Guo, C. Xu, H. Guo, Y. Gao, N. Zeng // Energies. 2022. Vol. 15. No. 6. 2031. doi: 10.3390/en15062031
19. Zhao R., Lam K., Lun D.P.K. Enhancement of a CNN-based denoiser based on spatial and spectral analysis // IEEE international conference on image processing (ICIP). Taipei, Taiwan, 2019. Pp. 1124-1128. doi: 10.1109/ICIP.2019.8804295
20. Бахметенко О.А., Елисеева А.А. Разработка алгоритма управления микросетью с возобновляемыми источниками энергии учетом краткосрочных прогнозов выработки и потребления электрической энергии // Электроэнергетика глазами молодежи: материалы XI Международной научно-технической конференции. Ставрополь: Северо-Кавказский федеральный университет, 2020. Т. 2. С. 149-150.
21. Методы определения индивидуального потребления тепловой энергии, реализованные на базе интеллектуальной системы контроля энергоресурсов / Ю.И. Штерн, Я.С. Кожевников, В.А. Медведев, Р.Е. Миронов, И.С. Караваев // Измерительная техника. 2013. № 2. С. 46-50.
22. Слюсарева В.А., Буданцев А.В. Исследование и прогнозирование временных рядов // Актуальные исследования. 2022. № 21 (100). С. 33-37.
23. Context-aware deep model for joint mobility and time prediction / Y. Chen, C. Long, G. Cong, C. Li // Proceedings of the 13th International Conference on Web Search and Data Mining (WSDM). NY, United States, 2020. Pp. 106-114. doi: 10.1145/3336191.3371837
24. Мейзер М.В., Северьянова Е.Д., Мокшин В.В. Пример прогнозирования временных рядов с помощью рекуррентной нейронной сети LSTM // Молодой ученый. 2022. № 9 (404). С. 13-15.

25. Шишков Е.М., Проничев А.В., Савельев А.А. Прогнозирование временных рядов с применением методов машинного обучения на примере графика выдачи мощности электрической станции // Международный научно-исследовательский журнал. 2022. № 2-1 (116). С. 56-60. doi: 10.23670/IRJ.2022.116.2.009
26. Емалетдинова Л.Ю., Кабирова А.Н., Вильданов Н.Р. Нейросетевое моделирование задачи прогнозирования значений временного ряда // Вестник технологического университета. 2022. Т. 25. № 10. С. 101-106. doi: 10.55421/1998-7072\_2022\_25\_10\_101
27. Девришев Н.Э., Хэ Ю., Петросян О.Л. Обнаружение аномалий во временных рядах с помощью методов прогнозирования // Процессы управления и устойчивость. 2022. Т. 9. № 1. С. 202-209.
28. Евстигнеев И.П. Прогнозирование временных рядов // Системный администратор. 2022. № 7-8 (236-237). С. 138-139.
29. Тимофеев Г.А., Бердоносков В.Д. Использование актуальных инструментов для сбора и анализа данных // Наука, инновации и технологии: от идей к внедрению: материалы Международной научно-практической конференции. Комсомольск-на-Амуре, 2022. С. 257-258.

Поступила в редакцию 14 сентября 2022 г.

Принята к печати 15 октября 2022 г.

## INFORMATION IN ENGLISH

### METHODOLOGY FOR EFFECTIVE APPLICATION OF HYBRID MODELS OF NEURAL NETWORKS FOR ENERGY CONSUMPTION PREDICTION

Gordei V. Vasilev

Postgraduate student, Komsomolsk-on-Amur State University, Komsomolsk-on-Amur, Russia, gordeyvasilev@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0485-8664>

Viktor D. Berdonosov

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Department of Applied Mathematics, Komsomolsk-on-Amur State University, Komsomolsk-on-Amur, Russia, berd1946@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4093-779X>

Power system planning is responsible for the generation, transmission and distribution of electricity. Thus, an accurate forecast of electricity consumption is essential as it serves as the basis for energy management and operational decisions. This would be a big step forward for energy producers. In addition, improved energy data processing opens up new opportunities for data collection, exploration and more accurate forecasting. As a result, researchers around the world are trying to improve energy demand forecasts.

Therefore, energy companies need to explore models in order to better predict and plan energy use. One approach to solving this problem is the assessment of energy consumption at the consumer level. The energy consumption forecasting concern is a time series regression concern. It consists of predicting energy consumption for the next few days, given the customer's end story. Machine learning methods have shown promising results in a variety of tasks including time series and regression concerns. Some of these promising results are related to deep neural networks. Although deep model architectures have been explored in other areas, they have not been used to solve the power consumption prediction concern.

In this paper, we propose a new, efficient system for predicting monthly energy consumption using deep learning methods. The authors analyzed two machine learning models. Several architectures of neural network models have been developed. Model studies were carried out on a dataset that included historical data for 10 years. The results showed that the resulting architecture of the hybrid model can predict hourly energy consumption with a relative error of 5%.

The proposed solution could act on energy producers/distributors to help smart meters make better decisions to reduce overall energy consumption by limiting energy production.

**Keywords:** machine learning, neural networks, XGBoost, LSTM, RNN, CNN, energy forecasting, time series, energy

#### REFERENCES

1. Kitov V. V., Mishustina M.V., Ustyuzhanin A.O. Time series prediction survey of statistical, machine learning and deep learning methods: historical aspects. *Voprosy Istorii* [Issues of history], 2022, no. 4-2, pp. 201-218. (In Russian). doi: 10.31166/VoprosyIstorii202204Statyi40
2. Berdonosov V.D., Vasilev G.V., Zhivotova A.A. Analysis and development potential of predictive models for energy flows of autonomous hybrid energy systems// *Journal of physics: conference series*. 2021, vol. 2096, 012024. doi: 10.1088/1742-6596/2096/1/012024
3. Yesenkov A.S., Zakharova E.M., Kovaleva M.D., Konstantinov D.E., Makarov I.S., Pankovets E.A. Research and application of architectures of deep neural networks for classification on multidimensional time series. *Izvestiya rossiyской akademii nauk. Teoriya i sistemy upravleniya* [Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Theory and control systems], 2022, no. 4, pp. 133-142. (In Russian). doi: 10.31857/s0002338822040072
4. Vasiliev G.V., Berdonosov V.D. Development and comparison of models for predicting electricity consumption using recurrent neural networks with long short-term memory. *Nauka, innovatsii i tekhnologii: Materialy Mezhdunarodnoy naucho-prakticheskoy konferentsii*. [Proceedings of the International Scientific and Practical Conference "Science, innovations and technologies: from ideas to implementation"]. Komsomolsk-on-Amur, 2022, pp. 203-206. (In Russian)
5. Vasiliev G.V., Berdonosov V.D. Analysis of energy flow models of hybrid energy systems. *Aktualnye problemy informatsionno-telekommunikatsionnykh tekhnologiy i matematicheskogo modelirovaniya v sovremennoy nauke i promyshlennosti: Materialy I mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii molodykh uchenykh* [Proceedings of the 1<sup>st</sup> International Scientific and Practical Conference of Young Scientists "Actual problems of information and telecommunication technologies and mathematical modeling in modern science and industry"]. Komsomolsk-on-Amur, 2022, pp. 191-194. DOI: 10.17084/978-5-7765-1488-3-2021-191. (In Russian)
6. Kandasamy P., Chandrasekaran K., Natarajan R., Selvaraj J. Deep CNN-LSTM-based dstatcom for power quality enhancement in microgrid. *Journal of circuits, systems, and computers*. 2022, vol. 31, no. 7, p. 2250130. doi: 10.1142/S0218126622501304
7. Dong X., Zong X., Wang J., Li P. Enterprise economic forecasting method based on ARIMA-LSTM model. Lecture notes



- of the institute for computer sciences, social-informatics and telecommunications engineering. 2022, vol. 429 LNICST, pp. 36-57. doi: 10.1007/978-3-030-99188-3\_4
8. Ulloa N.I., Chiang S.H., Yun S.H., Furuta R. Sentinel-1 spatiotemporal simulation using convolutional LSTM for flood mapping. *Remote sensing*. 2022, vol. 14, no. 2, pp. 246. doi: 10.3390/rs14020246
  9. Rahman Z.U., Ullah S.I., Salam A., Rahman T., Khan I., Niazi B. Automated detection of rehabilitation exercise by stroke patients using 3-layer CNN-LSTM model. *Journal of Healthcare Engineering*. 2022, vol. 2022, pp. 1563707. doi: 10.1155/2022/1563707
  10. Safaraliev M.H., Matrenin P.V., Dmitriev S.A., Akhieev J.S., Kokin S.E. Adaptive ensemble models for medium-term forecasting of electricity generation by hydroelectric power plants in isolated energy systems, taking into account changes in temperature. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical systems and complexes]. 2022, no. 1(54), pp. 38-45. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-1\(54\)-38-45](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-1(54)-38-45)
  11. Zhao B., Li X., Lu X. CAM-RNN: Co-attention model based RNN for video captioning. *IEEE Trans. Image Process.* 2019, vol. 28, no. 11, pp. 5552-5565. doi: 10.1109/TIP.2019.2916757
  12. Hong X., Lin R., Yang C., Zeng N., Cai C., Gou J., Yang J. Predicting Alzheimer's disease using LSTM. *IEEE Access*. 2019, vol. 7, pp. 80893-80901. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2919385
  13. Alekseev A.O., Antonov V.I. Confirmation of the Electrical Network Configuration using the LSTM Neural Network. *Informatsionnye tekhnologii v elektrotekhnike i elektroenergetike: Materialy XIII Vserossiyskoy nauchno-tekhnologicheskoy konferentsii* [Proceedings of the 13<sup>th</sup> All-Russian Scientific and Technical Conference "Information technologies in electrical engineering and electric power industry"]. Cheboksary, 2022, pp. 340-344. (In Russian)
  14. Hasoon S.O., Al-Hashimi M.M. Hybrid deep neural network and long short term memory network for predicting of sun-spot time series. *International journal of mathematics and computer science*. 2022, vol. 17, no. 3, pp. 955-967.
  15. Meizer M.V., Severyanova E.D. An example of time series forecasting using a recurrent neural network LSTM. *Factor obespecheniya kachestva issledovaniy: Professionalnye kommunikatsii v nauchnoy srede - Materialy XI Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Proceedings of the 11<sup>th</sup> All-Russian Scientific and Practical Conference "Professional communications in the scientific environment - a factor in ensuring the quality of research"]. St. Petersburg, 2022, pp. 211-214. (In Russian)
  16. Timofeev A.G., Lebedinskaya O.G. Model of application of convolutional neural network (CNN) in combination with long-term memory (LSTM) for forecasting oil prices under uncertainty. *Transportnoe delo Rossii* [Transport business of Russia], 2022, no. 2, pp. 54-59. (In Russian). doi: 10.52375/20728689\_2022\_2\_54
  17. Istamkulov H.S. Analysis of the use and application of LSTM architecture. *Sovremennaya nauka: aktualnye problem teorii i praktiki. Seriya: estestvennye i tekhnicheskienauki*. [Modern Science: Actual Problems of Theory and Practice. series: natural and technical sciences], 2022, no. 6, pp. 77-80. (In Russian). doi: 10.37882/2223-2966.2022.06.16
  18. Tuerxun W., Guo L., Xu C., Guo H., Gao Y., Zeng N. A wind power forecasting model using LSTM optimized by the modified bald eagle search algorithm. *Energies*. 2022, vol. 15, no. 6, p. 2031. doi: 10.3390/en15062031
  19. Zhao R., Lam K., Lun D.P.K. Enhancement of a CNN-based denoiser based on spatial and spectral. *IEEE international conference on image processing (ICIP)*. IEEE, 2019, pp. 1124-1128. doi: 10.1109/ICIP.2019.8804295
  20. Bakhmetenko O.A., Eliseeva A.A. Development of an algorithm for managing a microgrid with renewable energy sources taking into account short-term forecasts for the generation and consumption of electrical energy. *Elektroenergetika glazami molodezhi: Materialy XI Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Proceedings of the 11<sup>th</sup> International Scientific and Technical Conference "Power industry through the eyes of youth"]. Stavropol, North Caucasian Federal University Publ., 2020, pp. 149-150. (In Russian)
  21. Stern Yu.I., Kozhevnikov Ya.S., Medvedev V.A., Mironov R.E., Karavaev I.S. Methods for determining the individual consumption of thermal energy, implemented on the basis of an intelligent system for monitoring energy resources. *Izmeritel'naya tekhnika* [Measuring equipment], 2022, no. 2, pp. 46-50. (In Russian)
  22. Slyusareva V.A., Budantsev A.V. Research and forecasting of time series. *Aktualnye issledovaniya* [Actual research], 2022, no. 21 (100), pp. 33-37. (In Russian)
  23. Chen Y., Long C., Cong G., Li C. Context-aware deep model for joint mobility and time prediction. *WSDM 2020 Proceedings of the 13<sup>th</sup> International Conference on Web Search and Data Mining (WSDM)*. Association for Computing Machinery, 2020, pp. 106-114. doi: 10.1145/3336191.3371837
  24. Meizer M.V., Severyanova E.D., Mokshin V.V. An example of time series forecasting using a recurrent neural network LSTM. *Molodoy uchenyi* [Young scientist], 2022, no. 9(404), pp. 13-15. (In Russian)
  25. Shishkov E.M., Pronichev A.V., Savelyev A.A. Forecasting time series using machine learning methods on the example of the power output schedule of a power plant. *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skiy zhurnal* [International Research Journal], 2022, no. 2-1(116), pp. 56-60. (In Russian). doi: 10.23670/IRJ.2022.116.2.009
  26. Emaletdinova L.Yu., Kabirova A.N., Vildanov N.R. Neural network modeling of the problem of predicting the values of the time series. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Technological University], 2022, vol. 25, no. 10, pp. 101-106. (In Russian). doi: 10.55421/1998-7072\_2022\_25\_10\_101
  27. Devrishev N.E., He Yu., Petrosyan O.L. Detection of anomalies in time series using forecasting methods. *Protsessy upravleniya i ustoychivost* [Management processes and stability], 2022, vol. 9, no. 1, pp. 202-209. (In Russian)
  28. Evstigneev I.P. Time Series Forecasting. *Sistemnyi administrator* [System Administrator], 2022, no. 7-8(236-237), pp. 138-139. (In Russian)
  29. Timofeev G.A., Berdonosov V.D. Use of actual tools for data collection and analysis. *Nauka, innovatsii i tekhnologii: ot idey k vnedreniyu: Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Proceedings of the International Scientific and Practical Conference "Science, innovations and technologies: from ideas to implementation"]. Komso-molsk-na-Amur, 2022, pp. 257-258. (In Russian)

Васильев Г.В., Бердоносков В.Д. Методика по эффективному применению гибридных моделей нейронных сетей для прогнозирования энергопотребления // Электротехнические системы и комплексы. 2022. № 4(57). С. 88-95. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-4\(57\)-88-95](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-4(57)-88-95)

Vasilev G.V., Berdonosov V.D. Methodology for Effective Application of Hybrid Models of Neural Networks for Energy Consumption Prediction. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2022, no. 4(57), pp. 88-95. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-4\(57\)-88-95](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-4(57)-88-95)

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Безгин Алексей Сергеевич** – канд. техн. наук, и.о. заведующего кафедрой, кафедра автоматизированного электропривода, электромеханики и электротехники, институт энергетики, электроники и связи, Оренбургский государственный университет, Оренбург, Россия, alex11\_81@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8597-6616>

**Бердонос Виктор Дмитриевич** – канд. техн. наук, доцент, кафедра прикладной математики, Комсомольский-на-Амуре государственный университет, Комсомольск-на-Амуре, Россия, berd1946@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4093-779X>

**Богачева Ирина Юрьевна** – старший преподаватель, кафедра физики, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия, bogachevirina@yandex.ru.

**Вечеркин Максим Викторович** – канд. техн. наук, доцент, кафедра физики, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия, vecherkin@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8679-9831>

**Васильев Гордей Владимирович** – аспирант, Комсомольский-на-Амуре государственный университет, Комсомольск-на-Амуре, Россия, gordeyvasilev@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0485-8664>

**Гасияров Вадим Рашитович** – д-р техн. наук, доцент, профессор, кафедра автоматики и управления, Московский политехнический институт, Москва, Россия, магистрант, кафедра автоматизированных систем управления, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, gasiyarovvr@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9635-4716>

**Гилемов Ильдар Галиевич** – аспирант, кафедра автоматизированного электропривода и мехатроники, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия, gilemov.ig@outlook.com, <https://orcid.org/0000-0002-2481-3378>

**Греков Эдуард Леонидович** – канд. техн. наук, доцент, кафедра автоматизированного электропривода, электромеханики и электротехники, институт энергетики, электроники и связи, Оренбургский государственный университет, Оренбург, Россия, aertpm@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4675-7378>

**Гуломзода Анвари Хикмат** – аспирант, кафедра автоматизированных электроэнергетических систем, Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия, anvar\_4301@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4344-6462>

**Дмитриева Анна Алексеевна** – аспирант, кафедра автоматизированных электрических систем, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия, Korelina-aa@yandex.ru

**Зайцев Иван Павлович** – магистрант, инженер, институт строительства, архитектуры и искусства, кафедра урбанистики и инженерных систем, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия, otakuvans@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6851-6017>

**Карякин Александр Ливиевич** – д-р техн. наук, профессор, старший научный сотрудник, кафедра электрификации горных предприятий, Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия, karyakin.a@ursmu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6196-3263>

**Кирьянова Наталья Геннадьевна** – ассистент, кафедра автоматизированных электроэнергетических систем, Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия, kytianova.2010@corp.nstu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3145-8869>

**Козлова Анна Евгеньевна** – магистрант, институт энергетики и автоматизированных систем, кафедра вычислительной техники и программирования, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия, kozlova-ann99@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3109-2185>

**Корниенко Владимир Дмитриевич** – аспирант, ведущий инженер в области экспертизы промышленной безопасности, Институт энергетики и автоматизированных систем, кафедра информатики и вычислительной техники, НИИ «Промбезопасность», Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия, volodya.Kornienko2319@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0637-5765>

**Курбанов Александр Рафаилович** – студент, кафедра электроснабжения промышленных предприятий, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.

**Логунова Оксана Сергеевна** – д-р техн. наук, профессор, директор института, заведующая кафедрой, институт строительства, архитектуры и искусства, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия, logunova66@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7006-8639>

**Маклаков Александр Сергеевич** – канд. техн. наук, доцент, старший научный сотрудник, управление научной и инновационной деятельности, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия, alexandr.maklakov.ru@ieee.org, <https://orcid.org/0000-0001-7950-708X>

**Матренин Павел Викторович** – канд. техн. наук, доцент, старший преподаватель, кафедра систем электроснабжения предприятий, Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск,

Россия, matrenin.2012@corp.nstu.ru,  
<https://orcid.org/0000-0001-5704-0976>

**Морщакин Александр Эдуардович** – магистрант, кафедра электроснабжения промышленных предприятий, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

**Наркевич Михаил Юрьевич** – канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой, директор НИИ, кафедра проектирования и строительства зданий, НИИ «Промбезопасность», Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия, narkevich\_mu@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6608-8293>

**Николаев Александр Аркадьевич** – канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой, кафедра автоматизированного электропривода и мехатроники, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия, aa.nikolaev@magtu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5014-4852>

**Новиков Иван Витальевич** – студент, кафедра электроснабжения промышленных предприятий, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия, <https://orcid.org/0000-0003-1327-2526>

**Панова Евгения Александровна** – канд. техн. наук, доцент, кафедра электроснабжения промышленных предприятий, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия, кафедра электроэнергетики, Тюменский индустриальный университет, филиал ТИУ в Тобольске, Тобольск, Россия, ea.panova@magtu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9392-3346>

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

**Петухова Ольга Игоревна** – канд. техн. наук, доцент, кафедра электроснабжения промышленных предприятий, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

**Правинова Александра Александровна** – аспирант, заведующая, сектор надежности, НИИ АЭМ ТУСУР, Томск, Россия, bezruchenko@niiuem.tomsk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0474-2912>

**Радионов Андрей Александрович** – д-р техн. наук, профессор, кафедра автоматика и управление, Московский политехнический университет, Москва, Россия, radionov.mail@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3914-4429>

**Романова Ирина Павловна** – студент, кафедра информатики и информационной безопасности, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия, romanova.irina.01@mail.ru.

**Рулевский Виктор Михайлович** – д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры, ректор, кафедра компьютерных систем в управлении и проектировании, факультет вычислительных систем ТУСУР, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, Россия, rector@tusur.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3546-3921>

**Самарина Ирина Геннадьевна** – старший преподаватель, кафедра автоматизированных систем управления, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия, ig\_samarina@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0045-9028>

**Сарваров Анвар Сабулханович** – д-р техн. наук, профессор, кафедра автоматизированного электропривода и мехатроники, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия, anvar.magtu@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0529-4488>

**Сабирова Регина Радиковна** – студентка, кафедра электроснабжения промышленных предприятий, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия, <https://orcid.org/0000-0002-2675-6231>

**Сафаралиев Муродбек Холназарович** – инженер-исследователь, кафедра автоматизированных электрических систем, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия, murodbek\_03@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3433-9742>

**Сенюк Михаил Дмитриевич** – ведущий инженер, кафедра автоматизированных электрических систем, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия, mdsenuk@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5589-7922>

**Тарасов Владимир Маркелович** – канд. техн. наук, доцент кафедры, кафедра электроснабжения промышленных предприятий, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

**Харисов Ильдар Ришатович** – аспирант, кафедра электрификации горных предприятий, Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия, nexukharisa@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5078-0533>

---

## Уважаемые коллеги!

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 21.10.2022 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.magtu.ru](http://esik.magtu.ru) в разделе «Руководство для авторов». Там же находится инструкция по его заполнению, в которой приведены требования к оформлению статей.

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

**Пакет подаваемых документов (отправляется по электронной почте [ecis.red@gmail.com](mailto: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.