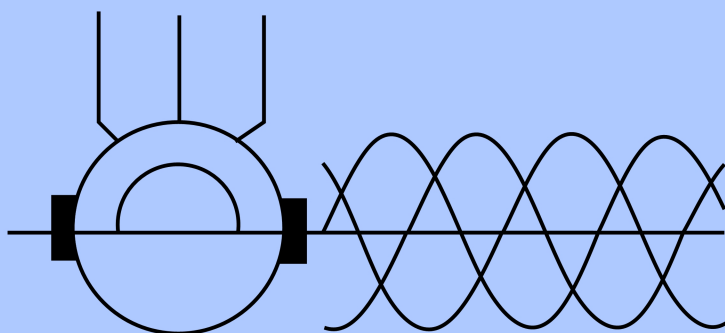
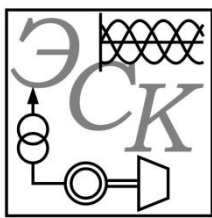


ISSN 2311-8318
ISSN (online) 2658-3151

Электротехнические Системы и Комплексы



№3(48), 2020



ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

ИЗДАЕТСЯ С ЯНВАРЯ 1996 Г.

№ 3(48), СЕНТЯБРЬ 2020

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

Редакционная коллегия

Председатель редакционной коллегии:

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

Главный редактор:

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

Ответственный редактор:

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

Секция теории и практики автоматизированного электропривода:

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

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

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

Секция электро- и теплоэнергетики:

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

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

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

Секция энерго- и ресурсосбережения:

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

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

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

Секция электроснабжения:

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

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

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

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

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

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

Секция электротехнологий в промышленности:

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

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

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

Секция мониторинга, контроля и диагностики электрооборудования:

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

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

Технические редакторы:

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

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

© ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2020

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

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

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

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

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

Адрес редакции:

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

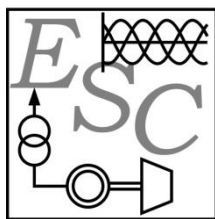
Адрес издателя:

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

Адрес типографии:

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

Выход в свет 28.09.2020. Заказ 242. Тираж 500 экз.
Цена свободная.



ELECTROTECHNICAL SYSTEMS AND COMPLEXES

PUBLISHED SINCE JAN., 1996

NO. 3(48), SEPT, 2020

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

Editorial Board

Head of the Editorial Board:

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

Editor in Chief:

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

Executive Editor:

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

Secton of Theory and Practice of Automated Electric Drive:

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

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

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

Secton of Power Engineerign:

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

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

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

Secton of Energy- and Resources-Economy:

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

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

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

Secton of Electric Power Supply:

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

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

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

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

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

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

Secton of Industrial Electro Technology:

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

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

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

Secton of Monitoring, Diagnostics and Control of Electric Equipment:

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

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

Technical Editors:

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

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

© FSBEI HE NMSTU, 2020

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

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

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

Founder – Nosov Magnitogorsk State Technical University (38, pr. Lenina, Magnitogorsk 455000, Chelyabinsk Region)

16+ in accordance with Federal Law no. 436-FZ dated 29.12.10

The 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: 28.09.2020. Order 242. Circulation: 500.
Open price.

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРО- И ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА	4
<i>Тюньков Д.А., Сапилова А.А., Грицай А.С., Алексеев Д.А., Хамитов Р.Н.</i>	
Методы краткосрочного прогнозирования выработки электрической энергии солнечными электростанциями и их классификация	4
<i>Варганова А.В.</i>	
Теплоэнергетическая модель промышленных электростанций.....	11
<i>Апросин К.И., Тавлинцев А.С., Семенов С.И.</i>	
Использование данных синхронизированных векторных измерений для реализации функций защиты цифровой подстанции	17
<i>Худжасидов Дж.Х., Русина А.Г., Матренин П.В., Дмитриев С.А., Сафаралиев М.Х.</i>	
Разработка моделей прогнозирования электропотребления на основе временных рядов в изолированных энергосистемах	23
ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА, АВТОМАТИКА И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ.....	28
<i>Мещеряков В.Н., Синюкова Т.В., Синюков А.В.</i>	
Исследование системы управления приводом моталки с разными типами наблюдателей скорости	28
<i>Николаев А.А., Денисевич А.С., Ложкин И.А., Лаптова В.А.</i>	
Повышение устойчивости преобразователей частоты с активными выпрямителями при провалах напряжения и параллельной работе с дуговой сталеплавильной печью	33
ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА	41
<i>Бочкарев И.В., Брякин И.В., Храмшин В.Р., Сандыбаева А.Р.</i>	
Разработка систем защиты от перегрева электродвигателей переменного тока	41
<i>Лебедев Г.Г., Сарваров А.С., Вечеркин М.В., Петушков М.Ю., Косматов В.И.</i>	
Определение тока холостого хода асинхронного электродвигателя	52
ИНФОРМАЦИОННОЕ, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ	59
<i>Логинов А.Ю., Обабков И.Н.</i>	
Представление компонентов с заготовками в информационных системах на этапе конструкторской подготовки производства.....	59
КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ	65
<i>Сорокин Н.С., Кушмил О.Е.</i>	
Использование средств SQL SERVER для разработки базы данных к САПР ЗРУ CAD	65
СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	70

CONTENT

ELECTRIC POWER SUPPLY	4
<i>Tyunkov D.A., Sapilova A.A., Gritsay A.S., Alekseenko D.A., Khamitov R.N.</i>	
Short-Term Forecast Methods of Electricity Generation by Solar Power Plants and their Classification	4
<i>Varganova A.V.</i>	
Thermal Power Model of Industrial Power Plants.....	11
<i>Aprosin K.I., Tavlintsev A.S., Semenenko S.I.</i>	
Making Use of Visual Information Board Data to Implement the Protection Function of a Digital Substation.....	17
<i>Khujasaidov J.Kh., Rusina A.G., Matrenin P.V., Dmitriev S.A., Safaraliev M.Kh.</i>	
Development of Models for the Forecasting of Electricity Consumption Based on Time Series in Isolated Electrical Power Systems	23
POWER ELECTRONICS, AUTOMATION AND CONTROL SYSTEMS	28
<i>Meshcheryakov V.N., Sinyukova T.V., Sinyukov A.V.</i>	
Investigation of the Coiler Drive Control System with Different Types of Speed Observers	28
<i>Nikolaev A.A., Denisevich A.S., Lozhkin I.A., Laptova V.A.</i>	
Improving the Stability of Operation of Electric Drives on the Basis of Frequency Converters with Active Rectifiers During the External Voltage Drops and Parallel Operation with Electric Arc Furnace.....	33
THEORY AND PRACTICE OF AUTOMATED ELECTRIC DRIVE	41
<i>Bochkarev I.V., Bryakin I.V., Khrumshin V.R., Sandybaeva A.R.</i>	
Development of Protection Systems Against Overheating of AC Electric Motors	41
<i>Lebedev G.G., Sarvarov A.S., Vecherkin M.V., Petushkov M.Yu., Kosmatov V.I.</i>	
Calculation of Idling Current of an Asynchronous Motor.....	52
TECHNICAL SYSTEMS DATAWARE AND SOFTWARE	59
<i>Loginov A.Yu., Obabkov I.N.</i>	
Using Components Having Workpieces in Information Systems During Production Preparation.....	59
BRIEF COMMUNICATION	65
<i>Sorokin N.S., Kushmil O.E.</i>	
Making Use of SQL Server Tools for Database Development for Closed Switchgear CAD	65
INFORMATION ABOUT THE AUTHORS	70

МЕТОДЫ КРАТКОСРОЧНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВЫРАБОТКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ СОЛНЕЧНЫМИ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯМИ И ИХ КЛАССИФИКАЦИЯ

В настоящее время мировое потребление энергии растет. Традиционные источники энергии становятся все более эффективными, но рост населения планеты ведет к общему увеличению энергопотребления. Так, по прогнозам Международного энергетического агентства, прогноз энергопотребления на 2030 год составит 33,4 трлн кВт·ч, а к 2050 году – до 41,3 трлн кВт·ч. В связи с этим для обеспечения роста глобальных запросов энергетике нужны принципиальные изменения, а именно децентрализация генерации, внедрение умных сетей (Smart Grid) и использование альтернативных источников энергии (энергии солнца и ветра). Лишь в этом случае удастся радикально снизить стоимость электроэнергии. Однако использование альтернативных источников энергии в рамках оптового рынка электроэнергии и мощности, действующего в настоящее время на территории Российской Федерации, невозможно без применения краткосрочных прогностических моделей «на сутки вперед». В данной статье проведен анализ существующих методов краткосрочного прогнозирования, которые применяются для построения прогнозов выработки электрической энергии на солнечных электростанциях, а также была проработана их классификация. На сегодняшний день существует уже довольно большое количество прогностических моделей, построенных в рамках каждого из выделенных методов краткосрочного прогнозирования, и все они отличаются своими особенностями. Поэтому для выделения наиболее перспективного для дальнейшего использования и развития метода краткосрочного прогнозирования был проведен анализ части из существующих прогностических моделей. В ходе исследования была оценена точность построения прогноза для каждого из методов краткосрочного прогнозирования и сделан вывод о перспективе использования и дальнейшего развития гибридного статистическо-адаптивного метода.

Ключевые слова: анализ данных, прогнозирование, электроэнергия, генерация, солнечные электростанции, возобновляемые источники энергии.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из наиболее перспективных и активно развивающихся направлений возобновляемой энергетики является солнечная генерация электрической энергии. По всему миру темпы развития солнечных электростанций с 2016 года превышают темпы развития угольных электростанций [1].

На сегодняшний момент в мировой солнечной энергетике краткосрочное прогнозирование производства солнечной энергии не имеет проверенной и до конца испытанной технологии и зачастую связано с большими ошибками прогноза, достигающими иногда 60-65%. В то же время прогноз на более длительный период дает более точный результат, то же верно и для области – более точечный прогноз дает менее точный результат.

Фактически прогноз количества произведенной солнечной электростанцией электрической энергии является прогнозом количества полученной солнечными батареями солнечного излучения. На это влияет множество факторов, главные из которых метеорологические и климатические условия, в частности положение солнца на небе, продолжительность светового дня, осадки, облачность, сила ветра и т. д.

Все существующие на данный момент методы прогнозирования генерации электрической энергии солнечными электростанциями можно разделить на четыре основных группы, показанных на **рис. 1** [1]:

1. Физические модели описывают физические отношения между погодными условиями и солнеч-

ной радиацией, полученными с использованием численного прогноза погоды, и выработкой электрической энергии на станции.

2. Статистические модели описывают взаимосвязь между плотностью потока солнечного излучения, полученным с использованием численного прогноза погоды, и генерацией электрической энергии на солнечной электростанции путем статистического анализа временных рядов ретроспективных данных без учета физических факторов.

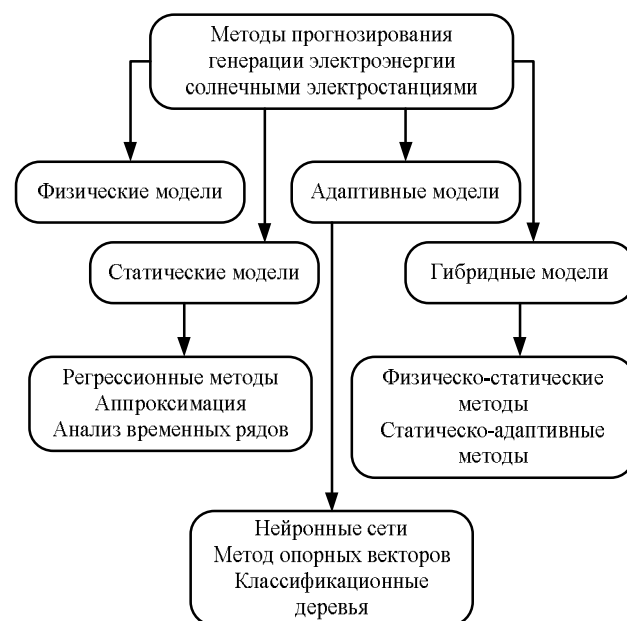


Рис. 1. Классификация методов прогнозирования генерации электроэнергии солнечной электростанции

3. Адаптивные модели используют системы искусственного интеллекта с целью определения связи между прогнозируемыми погодными условиями и выходной мощностью электростанции.

4. Гибридные модели в большинстве случаев представляют комбинацию физических и статистических моделей.

Численный прогноз погоды

Модели численного прогнозирования погоды в последние годы зачастую используются для выполнения краткосрочных прогнозов метеорологических переменных во многих различных применениях. Обычно эти модели классифицируют в соответствии с пространственно-временными характеристиками их прогнозов погоды. Каждая модель численного прогноза погоды прогнозирует атмосферные переменные со степенью качества, зависящей от географического расширения и временного разрешения их прогнозов [2]. Таким образом, модели с высоким пространственным масштабом получают прогнозы относительно более короткой временной достоверности, тогда как более длительные горизонты прогнозов достигаются с использованием моделей численного прогноза погоды меньшего пространственного масштаба [3].

Физические модели

В качестве входных переменных для физических моделей прогнозирования служат: численный прогноз погоды, местные метеорологические измерения, данные рельефа и тип земной поверхности, а также ретроспективные данные выходной мощности солнечной электростанции. Помимо этого, существует возможность использования спутниковых систем для отслеживания направления и скорости движения облаков, что предоставляет возможность прогнозирования солнечной радиации в режиме реального времени.

Практическое использование различных физических моделей в прогнозировании генерации электрической энергии показано в работах [4, 5].

В работе [4] рассматривается влияние значения аэрозольной оптической глубины на качество прогнозирования солнечного излучения с использованием моделей численного прогноза погоды MM5 [6] или Eta [7]. В результате работы показано, что при значении аэрозольной оптической глубины меньше 0,1 ошибка прогнозирования приемлема и составляет порядка 3-4%, а при значении аэрозольной оптической глубины больше 0,1 среднее отклонение составляет около 100 Вт/м².

В [5] представлена одна из физических моделей прогнозирования, основанная на кратковременных изменениях масштаба Октантов и изменениях температуры для определения среднечасовой выходной мощности фотоэлектрических систем на малых солнечных электростанциях, расположенных в городах Санандадж и Рашт. Данная модель имеет приемлемую точность при прогнозировании генерации солнечной энергии в облачную погоду, в то время как в солнечную она выдает в разы худшие результаты.

Статистические модели

В качестве входных данных для статистических моделей прогнозирования используются данные чис-

ленного прогноза погоды, в частности информация о солнечном излучении и ретроспективные данные генерации электрической энергии солнечной электростанцией. Статистические модели наиболее широко применяются для средне- и долгосрочного процессов прогнозирования [8].

Регрессионные методы

Одними из широко используемых статистических методов для прогнозирования электрической энергии являются регрессионные методы [9]. Они позволяют учитывать большое количество влияющих на прогноз факторов, в том числе метеорологических [10, 11].

При использовании регрессионных методов можно оценить причинно-следственные связи и зависимости в данных [12]. Кроме того, преимуществом данных методов является то, что они позволяют предсказать значение зависимой переменной по значениям независимых, но необходимо, чтобы значения признаков были некоррелированными.

Уравнение линейной регрессии имеет следующий вид:

$$Y = a + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n + \varepsilon, \quad (1)$$

где Y – результирующий признак; $x_1 \dots x_n$ – факторные признаки; $b_1 \dots b_n$ – коэффициенты регрессии; a – свободный член уравнения; ε – «ошибка» модели.

Преимущество регрессионных методов состоит в простоте их реализации, а основным недостатком является непредсказуемость параметров, которые влияют на фактические значения. При возникновении резких изменений в имеющихся ретроспективных данных произойдет нарушение достоверности прогноза. Использование регрессионных методов хорошо применимо для поиска закономерностей в данных и для определения значимых факторов модели, но они не обеспечивают высокой точности при построении краткосрочных моделей прогнозирования генерации выработки электроэнергии.

Методы, основанные на временных рядах

Одним из наиболее часто используемых методов временных рядов является модель Бокса-Дженкинса – ARIMA (интегрированная модель авторегрессии – скользящего среднего) [13]. Данная модель применяется к нестационарным временным рядам, приводимым к стационарным, путем взятия разности некоторого порядка от исходных значений временного ряда.

Для нестационарного временного ряда X_t модель ARIMA имеет следующий вид:

$$\Delta^d X_t = c + \sum_{i=1}^p a_i \Delta^d X_{(t-i)} + \sum_{j=1}^q b_j \varepsilon_{t-j} + \varepsilon_t, \quad (2)$$

где ε_t – стационарный временной ряд; c , a_i , b_j – параметры модели; Δ^d – оператор разности временного ряда порядка d (последовательное взятие d раз разностей первого порядка – сначала от временного ряда, затем от полученных разностей первого порядка, затем от второго порядка и т.д.)

Также данная модель интерпретируется как AR-MA ($p + d$, q) – модель с d единичными корнями. При $d = 0$ имеем обычные ARMA-модели.

Методы, основанные на теории временных рядов, получили широкое распространение при построении краткосрочных прогнозов генерации электрической энергии, поскольку предприятия имеют большое количество ретроспективных данных о генерации электрической энергии солнечными электростанциями, а методы в данной группе нацелены на обработку больших массивов данных и позволяют находить в них закономерности, а также использовать эти закономерности при построении моделей прогноза. Основным недостатком данных методов является не обеспечение требуемой точности прогнозирования. Но при использовании методов временных рядов в комплексе, например с адаптивными моделями, требуемая точность достижима, но используемые в данном случае методы будут относиться к гибридным моделям.

В работах [14-19] показано практическое применение статистических моделей к прогнозированию выработки электрической энергии.

В [14] описывается двухэтапный метод прогнозирования электроэнергии солнечной электростанцией. На первом этапе производится статистическая нормализация солнечной энергии с использованием модели ясного неба, модель ясного неба была предложена в [20]. На втором этапе рассчитываются прогнозы нормированной солнечной энергии с использованием моделей временных рядов, в частности авторегрессионная модель и авторегрессионная модель с экзогенным входом, на который подается численный прогноз погоды. В результате работы показано, что использование авторегрессионной модели с экзогенным входом дает на 12% лучший результат, чем использование простой авторегрессионной модели при прогнозировании короткого горизонта и на 23% при прогнозировании следующего дня.

В работе [15] предложена модель прогнозирования солнечной энергии, учитывающая стохастичность облаков за счет применения различных параметров, учитывающих ослабление мощности. Основываясь на статистическом поведении параметров, был предложен простой процесс переключения между тремя классами: «солнечно», «облачно», «переменная облачность». Прогноз строится путем идентификации текущего режима и предположений о сохранении в этом режиме.

В работе [16] авторами предлагается очень краткосрочное прогнозирование солнечной энергии с применением классической концепции «сезонности», с выделением среднего значения или тренда и быстрых колебаний вокруг него. Особенностью данной работы является очень короткий временной горизонт в 1, 15 и 60 минут.

АДАПТИВНЫЕ МОДЕЛИ

Адаптивные модели имеют процесс «обучения», основанный на ретроспективном анализе данных. Данные модели в отличие от статистических могут неявно описывать сложные нелинейные взаимосвязи между погодными условиями и вырабатываемой солнечной электростанцией. Основным фактором, влияющим на точность прогноза, служит выборка и структура исходных данных, использованных для построения модели.

Методы с использованием нейронных сетей

Методы с использованием искусственных нейронных сетей в последнее время получили распространение не только при решении задач краткосрочного прогнозирования генерации солнечной энергии, но и средне- и долгосрочного прогнозирования. Искусственные нейронные сети состоят из множества нейронов входного, скрытых и выходного слоев, взаимодействующих друг с другом [21, 22]. Нейроны имеют функцию активации, зависящую от весовых коэффициентов связей между нейронами и смещения.

Для получения прогноза требуется проведение обучения нейронной сети. В процессе обучения подбираются значения смещений и весов для каждого нейрона так, чтобы выходной сигнал нейронной сети был как можно ближе к фактическому значению. Существует большое количество методов обучения нейронной сети [23], которые нашли применение и в прогнозировании генерации электроэнергии солнечными электростанциями.

Преимуществом нейронных сетей являются быстрые алгоритмы обучения и возможность работы при наличии шумовых входных сигналов. Соблюдение требований построения структуры нейронной сети с учетом избыточности нейронов, которое зависит от количества и выборки информативных признаков, сформированных для обучения искусственной нейронной сети, обеспечивает высокую надежность такой сети [24].

Метод опорных векторов

Метод опорных векторов является одной из популярных методологий обучения по прецедентам. Метод опорных векторов относится к семейству линейных классификаторов и применяется в задачах регрессионного анализа и классификации. Основная идея метода - перевод векторов в пространство большей размерности и поиск разделяющей гиперплоскости с максимальным зазором в ней [25]. От гиперплоскости, разделяющей классы по обеим сторонам, строятся две параллельные гиперплоскости. Гиперплоскость, у которой расстояние между двумя параллельными плоскостями максимально, и будет разделяющей.

Основными преимуществами метода опорных векторов являются способность получения правильного решения задачи при наличии неполных и искаженных данных и возможность учета большого количества дополнительных факторов, влияющих на качество прогнозирования [26]. Недостатком является необходимость обучения и повышенные требования к программно-аппаратным ресурсам.

Применение адаптивных моделей для прогнозирования генерации электроэнергии показано в работах [27-33].

В работе [27] демонстрируют применение деревьев решений для очень краткосрочного прогнозирования генерации электроэнергии солнечной электростанцией. В работе показано, что точность прогноза с использованием градиентного бустинга составила 75-65%. Прогноз строится на 1 час вперед.

В работе [28] рассматривается применение искусственной нейронной сети, адаптивной сети на основе системы нечеткого вывода и обобщенной нейронной

сети. Входными параметрами для предложенной модели служат: уровень солнечной радиации, температура окружающей среды, скорость ветра и температура модуля. В результате работы показано, что использование обобщенной нейронной сети дает наилучший результат.

В [29] авторы используют сеть радиально-базисных функций для прогнозирования солнечной энергии. В качестве входных данных используются данные об измерениях мощности и метеорологических прогнозах солнечного излучения, относительной влажности воздуха и температуры в месте расположения. Особенностью данной работы является предварительная классификация типа погоды (солнечно, облачно, дождливо) и применение для каждого класса различной структуры сети.

В работе [30] предлагается использование глубокой сети доверия для прогнозирования генерации солнечной энергии. В качестве входных параметров для сети используются данные об уровне солнечной радиации, температуры окружающей среды, относительной влажности и ретроспективные данные генерации солнечной энергии за пять дней до прогноза. В работе также было показано, что скорость ветра слабо влияет на генерацию солнечной энергии. В результате работы было показано, что модель, основанная на глубокой сети доверия, показывает лучший результат, чем модель, основанная на нейронной сети с обратным распространением ошибки.

ГИБРИДНЫЕ МОДЕЛИ

Гибридные методы объединяют в себе различные сочетания методов из других групп. Так, например, часто встречаются сочетания методов физических, статистических и адаптивных моделей.

Применение физических моделей не всегда оправдано из-за сложности точного учета определенных факторов, что требует введения статистического подхода для их определения. Статистические подходы имеют более высокую точность при расчете усредненных значений солнечного излучения за длительный период времени (день, месяц, год), в то время как за более короткий промежуток времени (минуты, часы), когда физические процессы, например облачность, не могут быть усреднены для данного интервала, они имеют гораздо меньшую точность. Для оптимальной точности гибридных моделей производится адаптация статистической модели к постоянно меняющимся условиям, которые описываются физическими моделями.

Большинство комбинированных подходов прогнозирования генерации солнечной энергии, как правило, могут использоваться либо для расчета ясных дней, либо облачных.

Еще одним примером гибридных моделей могут служить методы, сочетающие различные методы из статистических и адаптивных моделей. Такие гибридные методы имеют перспективы, поскольку позволяют учесть специфику физического процесса и использовать возможности адаптивных методов [34, 35]. Методы данной группы являются развивающимися, и экспертами находятся различные сочетания методов, обеспечивающих необходимую точность.

Применение гибридных моделей для прогнозирования генерации электроэнергии показано в работах [36, 37].

В работе [36] для прогнозирования генерации электроэнергии использовалась гибридная физико-статистическая модель. Два параметра, коэффициент прозрачности и коэффициент диффузии, определялись с использованием статистических моделей. Все остальные параметры определялись с использованием физических моделей. В результате применения метода ошибка составила 22,3%.

В [37] используется двухступенчатая модель, объединяющая работающие на первом этапе модель авторегрессионного интегрированного скользящего среднего, модель опорных векторов наименьших квадратов, искусственная нейронная сеть и адаптивная сеть на основе системы нечеткого вывода с генетическим алгоритмом на втором этапе. Ошибка метода в результате исследования составила порядка 5,21%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе была приведена основная классификация моделей прогнозирования генерации электрической энергии солнечными электростанциями на основе последних работ и публикаций. Кроме того, были рассмотрены различные способы применения методов прогнозирования. Средняя ошибка прогноза у представленных физических моделей составляет порядка 21–26%, статистических моделей – 20–24%, адаптивных – 15–19%, гибридных физико-статистических моделей – 19–24%, статистическо-адаптивных – 5–10%. На основе этого можно сделать вывод, что применение гибридных статистическо-адаптивных моделей дает наилучшие результаты прогнозирования и является наиболее перспективным направлением в области построения прогностических моделей генерации электрической энергии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ерошенко С.А., Халыямаа А.И., Снегирев Д.А. Подходы к прогнозированию плотности потока энергии солнечного излучения для СЭС // Энергоэксперт. 2017. № 5. С. 28–31.
2. Толстых М.А., Фролов А.В. Некоторые современные проблемы численного прогноза погоды // Известия РАН. ФАО. 2005. Т. 41. № 3. С. 315–327.
3. Грицай А.С. Гибридный метод краткосрочного прогнозирования потребления электрической энергии для энергосбытового предприятия с учетом метеофакторов. Омск, 2017. 153 с.
4. The Accuracy of Solar Irradiance Calculations Used in Mesoscale Numerical Weather Prediction / R.J. Zamora, E.G. Dutton, M. Trainer, S.A. McKeen, J.M. Wilczak, Y.T. Hou // Monthly Weather Review. 2005. Vol. 133. No. 4. P. 783–792.
5. Short-term solar power forecasting considering cloud coverage and ambient temperature variation effects / F.H. Gandoman, S.A. Aleem, N. Omar, A. Ahmadi, F.Q. Alenezi // Renewable Energy. 2018. Vol. 123. P. 793–805.
6. Akter N., Islam Md.N. Use of MM5 model for weather forecasting over Bangladesh region // BRAC University Journal. 2007. Vol. IV. P. 75–79.
7. Lazic L., Pejanovic G., Zivkovic M. Wind forecasts for wind power generation using the Eta model // Renewable Energy. 2009. Vol. 35. P. 1236–1243.
8. Кивчун О.Р. Метод векторного рангового анализа при управлении электропотреблением объектов военной инфраструктуры // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2018. № 11. С. 550–560.

9. Тимчук С.А., Катюха И.А. Разработка критерия качества подбора коэффициентов регрессии в задачах прогнозирования электропотребления // Восточно-европейский журнал передовых технологий. 2014. Т. 5. № 8(71). С. 16–20.
10. Прогнозирование электропотребления с учетом температуры воздуха и естественной освещенности для региональных диспетчерских управлений / И.И. Надтока, А.В. Демур, С.О. Губский, А.Я. Ваколюк, В.В. Горбачев // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: технические науки. 2012. №1(33). С. 156–161.
11. Манусов В.З., Хохлова С.В. Сравнительный анализ двух моделей прогнозирования электрической нагрузки промышленных предприятий, построенных на основе регрессионного анализа и искусственных нейронных сетей // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. 2008. № 1 (30). С. 147–159.
12. Грицай А.С., Тюньков Д.А. Классификация методов краткосрочного прогнозирования электропотребления для субъектов ОРЭМ // Актуальные вопросы энергетики: материалы Всероссийской научной конференции студентов, магистрантов, аспирантов. Омск: ОмГТУ, 2016. С. 41–45.
13. Магнус Я.Р., Катышев П.К., Пересецкий А.А. Эконометрика. Начальный курс. М.: Дело, 2007. 504 с.
14. Bacher P., Madsen H., Nielsen H.A. Online short-term solar power forecasting // Solar Energy. 2009. Vol. 83. No. 10. P. 1772–1783.
15. Ramakrishna R., Scaglione A. A Compressive Sensing framework for the analysis of Solar Photo-Voltaic Power // Proceedings of 50th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers. Pacific Grove: IEEE, 2016. P. 308–3012.
16. Binding Statistical and Machine Learning Models for Short-Term Forecasting of Global Solar Radiation / L. Mora-López, I. Martínez-Marchena, M. Piliouge, M. Sidrach-de-Cardona // Lecture Notes in Computer Science. 2011. Vol. 7014. P. 294–305.
17. Модели краткосрочного прогнозирования выработки солнечных электростанций / Д.А. Снегирев, С.А. Ерошенко, А.И. Хальясмаа, В.В. Дубайлова // Электроэнергетика глазами молодежи – 2018: материалы IX Международной молодежной научно-технической конференции. Казань: КГЭУ, 2018. Т. 3. С. 179–182.
18. Кузнецов Н.П., Лысенко О.В. Статистический анализ энергетических показателей солнечной радиации (на примере данных Токмакской солнечной электростанции) // Проблемы региональной энергетики. 2017. №2(34). С. 139–147.
19. Кивчун О.Р. Метод векторного рангового анализа электропотребления объектов региональной инфраструктуры // Промышленная энергетика. 2018. №5. С. 36–43.
20. Chowdhury B.H., Rahman S. Forecasting sub-hourly solar irradiance for prediction of photovoltaic output // Proceedings of IEEE Photovoltaic Specialists Conference. New Orleans: IEEE, 1987. P. 171–176.
21. Манусов В.З., Бирюков Е.В. Краткосрочное прогнозирование электрической нагрузки на основе нечеткой нейронной сети и ее сравнение с другими методами // Известия Томского политехнического университета. 2006. Т. 309. № 6. С. 153–157.
22. Использование нейронной сети для построения краткосрочного прогноза электропотребления ООО «Омская энергосбытовая компания» / В.И. Потапов, А.С. Грицай, Д.А. Тюньков, Г.Э. Силин // Известия томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2016. Т. 327. № 8. С. 44–51.
23. Хайкин С. Нейронные сети: пер. с англ. – М.: Вильямс, 2006. 1104 с.
24. Потапов В.И. Об эффективности обеспечения надежности избыточной нейронной системы со случайным периодом контроля и восстановления работоспособности после отказов нейронов // Омский научный вестник. 2010. №3(93). С. 202–203.
25. Вьюгин В.В. Математические основы теории машинного обучения и прогнозирования. М.: МЦМНО, 2013. 387 с.
26. Надтока И.И., Аль-Зихери Б.М. Краткосрочное прогнозирование нагрузки с помощью теории наименьших квадратов опорных векторов (LS-SVM) // Современные проблемы науки и образования. 2013. №6. Режим доступа: <https://www.science-education.ru/ru/article/view?id=11213>, свободный (дата обращения: 02.03.2019).
27. Eroschenko S., Khalyasmaa A., Snegirev D. Machine learning techniques for short-term solar power stations operational mode planning // E3S Web of Conferences. 2018. Vol. 51. doi: 10.1051/e3sconf/20185102004.
28. Generalized neural network methodology for short term solar power forecasting / V.P. Singh, V. Vijay, M.S. Bhatt, D.K. Chaturvedi // Proceedings of 13th International Conference on Environment and Electrical Engineering (E3E). – Wroclaw: IEEE, 2013. doi: 10.1109/eeeic-2.2013.6737883.
29. Online 24-h solar power forecasting based on weather type classification using artificial neural network / C. Chen, S. Duan, T. Cai, B. Liu // Solar Energy. 2011. Vol. 85. No. 11. P. 2856–2870.
30. Short-term output power forecasting of photovoltaic systems based on the deep belief net / L.L. Li, P. Cheng, H.C. Lin, H.Dong // Advances in Mechanical Engineering. 2017. Vol. 9. No. 9. doi: 10.1177/1687814017715983.
31. Степанов С.М., Искра Н.А. Нейросетевое прогнозирование генерации электроэнергии солнечными панелями // Доклады Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. 2018. №3(113). С. 26–31.
32. Воротынцев Д.В., Тягунов М.Г. Применение интеллектуальных информационных технологий в задаче прогнозирования солнечной энергии // Вестник Московского энергетического института. 2018. №4(4). С. 53–57.
33. Камшилова Ю.А. Прогноз выработки электроэнергии инвариантных ветроэнергетических установок методом нечеткой логики // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2015. Т. 1. № 11. С. 316–318.
34. Гибридный метод краткосрочного прогнозирования электропотребления в условиях оптового рынка электроэнергии / А.С. Грицай, Д.А. Тюньков, Р.Н. Хамитов, Д.Д. Дугин, Г.Э. Силин // Электроэнергетика глазами молодежи: материалы VIII Международной научно-технической конференции. Самара: СамГТУ, 2017. Т. 3. С. 163–166.
35. О методе построения обучающей выборки в задачах краткосрочного прогнозирования электропотребления с учетом критериев информативности и компактности / Р.Н. Хамитов, А.С. Грицай, Д.А. Тюньков, Д.Д. Дугин, Г.Э. Силин // Промышленная энергетика. 2017. № 8. С. 23–28.
36. Особенности прогнозирования выработки электроэнергии солнечными электростанциями / Д.А. Снегирев, Р.Т. Валиев, С.А. Ерошенко, Ф.И. Хальясмаа // Электроэнергетика глазами молодежи: материалы VIII Международной научно-технической конференции. Самара: СамГТУ, 2017. Т. 3. С. 139–142.
37. Wu Y.K., Chen C.R., Rahman H.A. A Novel Hybrid Model for Short-Term Forecasting in PV Power Generation // International Journal of Photoenergy. 2014. Vol. 2014. doi: 10.1155/2014/569249.

Поступила в редакцию 04 июня 2020 г.

INFORMATION IN ENGLISH

SHORT-TERM FORECAST METHODS OF ELECTRICITY GENERATION BY SOLAR POWER PLANTS AND THEIR CLASSIFICATION

Dmitry A. Tyunkov

Post-graduate student, Teaching assistant, Department of Computer Science and Computer Engineering, Omsk State Technical University, Omsk, Russia. E-mail: dmitry.tyunkov@gmail.com. ORCID: 0000-0001-6496-7956

Alina A. Sapilova

Graduate student, Engineer, Department of Computer Science and Computer Engineering, Omsk State Technical University, Omsk, Russia. E-mail: alinka.s97@mail.ru

Aleksandr S. Gritsay

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Department of Computer Science and Computer Engineering, Omsk State Technical University, Omsk, Russia. E-mail: aleksandr.gritsay@gmail.com. ORCID: 0000-0003-0805-2086

Denis A. Alekseenko

Teaching assistant, Department of Computer Science and Computer Engineering, Omsk State Technical University, Omsk, Russia. E-mail: gnom1981@bk.ru

Rustam N. Khamitov

D.Sc. (Engineering), Professor, Department of Electrical Engineering, Omsk State Technical University, Omsk, Russia. E-mail: apple_27@list.ru. ORCID: 0000-0001-9876-5471

Currently, global energy consumption is growing. Traditional energy sources are becoming more efficient, but the growth of the world's population leads to a general increase in energy consumption. Thus, according to the forecasts of the International Energy Agency, the forecast for energy consumption for 2030 will be 33.4 trillion kW * h, and by 2050 it will increase to 41.3 trillion kW * h. In this regard, to ensure the growth of global demands, the energy sector needs fundamental changes, namely, decentralization of generation, introduction of smart grids (Smart Grid), and the use of alternative energy sources (solar energy and wind energy). Only in this case will it be possible to radically reduce the cost of electricity. However, the use of alternative energy sources within the framework of the wholesale electricity and capacity market currently operating on the territory of the Russian Federation is impossible without the use of such short-term day-ahead forecast models. This article analyzed the existing methods of short-term forecasting, which are used to build forecasts of the generation of electric energy in solar power plants. And also, their classification was worked out. To date, there is already a fairly large number of prognostic models built within the framework of each of the selected methods for short-term forecasting, and all of them differ in their features. Therefore, to highlight the most promising method for short-term forecasting for further use and development, an analysis of some of the existing prognostic models was carried out. During the study, the accuracy of forecasting for each of the short-term forecasting methods was evaluated and a conclusion was drawn on the prospects for the use and further development of a hybrid statistical-adaptive method.

Keywords: data mining, forecast, electricity, generation, solar power plants, renewable energy sources.

REFERENCES

1. Eroshenko S.A., Khalyasmaa A.I., Snegirev D.A. Approaches to prediction of the flux density of solar energy for SPS. *Energoekspert* [Energy expert], 2017, no. 5, pp. 28–31. (In Russian)
2. Tolstykh M.A., Frolov A.V. Some current problems in numerical weather prediction. *Izvestiya RAN*. [Proceedings of the Russian Academy of Sciences], 2005, vol. 41, no. 3, pp. 285–295. (In Russian)
3. Gritsay A.S. *Gibridnyy metod kratkosrochnogo prognozirovaniya potrebleniya elektricheskoy energii dlya energosbytovogo predpriyatiya s uchetom meteo faktorov* [Hybrid method of short-term forecasting of electric energy consumption for a power sales company taking into account meteorological factors]. Omsk, 2017. 153 p. (In Russian)
4. Zamora R.J., Dutton E.G., Trainer M., McKeen S.A., Wilczak J.M., Hou Y.T. The Accuracy of Solar Irradiance Calculations Used in Mesoscale Numerical Weather Prediction. *Monthly Weather Review*, 2005, vol. 133, no. 4, pp. 783–792.
5. Gandoman F.H., Aleem S.A., Omar N., Ahmadi A., Alinezi F.Q. Short-term solar power forecasting considering cloud coverage and ambient temperature variation effects. *Renewable Energy*, 2018, vol. 123, pp. 793–805.
6. Akter N., Islam Md.N. Use of MM5 model for weather forecasting over Bangladesh region. *BRAC University Journal*, 2007, vol. IV, pp. 75–79.
7. Lazic L., Pejanovic G., Zivkovic M. Wind forecasts for wind power generation using the Eta model. *Renewable Energy*, 2009, vol. 35, pp. 1236–1243.
8. Kivchun O.R. The vector rank analysis in energy management of military infrastructure objects. *Izvestiya Tulskego gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Proceedings of Tula State University. Technical sciences]. 2018, no. 11, pp. 550–560. (In Russian)
9. Timchuk S.A., Katyuha I.A. Development of regression coefficient selection quality criterion in power consumption forecasting problems. *Vostochno-evropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy* [Eastern-European Journal of Enterprise Technologies], 2014, vol. 5, no. 8 (71), pp. 16–20. (In Russian)
10. Nadtocha I.I., Demura A.V., Gubskiy S.O., Vakolyuk A.J., Gorbachev V.V. Energy consumption prediction model for temperature and lighting of regional dispatch administrations. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: tekhnicheskie nauki* [Bulletin of Samara State Technical University. Technical Sciences Series], 2012, vol. 1 (33), pp. 156–161. (In Russian)
11. Manusov V.Z., Khokhlova S.V. Comparative analysis of two models of electrical load prediction of industrial enterprises based on regression analysis and artificial neural networks. *Nauchnyy vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Science bulletin of Novosibirsk State Technical University], 2008, vol. 1 (30), pp. 147–159. (In Russian)
12. Gritsay A.S., Tyunkov D.A. Classification of methods for short-term power consumption forecasting for WECM sub-

- jects. *Aktualnye voprosy energetiki. Materialy Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii studentov, magistrantov, aspirantov* [Actual energy issues: Proc. of the All-Russian scientific conference of students, undergraduates, PhD student]. Omsk, OmGTU Publ., 2016, pp. 41–45. (In Russian)
13. Magnus Ya.R., Katyshev P.K., Peresetskiy A.A. *Ekonometrika. Nachal'nyy kurs* [Econometrics. Initial course]. Moscow, Delo Publ., 2007. 504 p.
14. Bacher P., Madsen H., Nielsen Y.A. Online short-term solar power forecasting. *Solar Energy*, 2009, vol. 83, no. 10, pp. 1772–1783.
15. Ramakrishna R. Scaglione A. A Compressive Sensing framework for the analysis of Solar Photo-Voltaic Power. *Proceedings of 50th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*. Pacific Grove, IEEE Publ, 2016, pp. 308–3012.
16. Mora-López L., Martínez-Marchena I., Piliouge M., Sidrach-de-Cardona M. Binding Statistical and Machine Learning Models for Short-Term Forecasting of Global Solar Radiation. *Lecture Notes in Computer Science*, 2011, vol. 7014, pp. 294–305.
17. Snegirev D.A., Eroshenko S.A., Halyasmaa A.I., Dubaylova V.V. Short-term photovoltaic power plants generation forecasting model. *Elektroenergetika glazami molodezhi – 2018: Materialy IX Mezhdunarodnoy molodezhnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Electric power industry through the eyes of youth – 2018: Proc. of the IX International Youth Scientific and Technical Conference]. Kazan, KGEU Publ, 2018, vol. 3, pp. 179–182. (In Russian)
18. Kuznetsov N.P., Lysenko O.V. Statistical analysis of energy indices of solar radiation (Based on the data of Tokmak Solar Power Station). *Problemy regionalnoy energetiki* [Problems of the regional power industry], 2017, no. 2 (34), pp. 139–147. (In Russian)
19. Kivchun O.R. The method of vector rank analysis of power consumption of regional infrastructure objects. *Promyshlennaya energetika* [Industrial power engineering], 2018, no. 5, pp. 36–43. (In Russian)
20. Chowdhury B.H., Rahman S. Forecasting sub-hourly solar irradiance for prediction of photovoltaic output *Proceedings of IEEE Photovoltaic Specialists Conference*. New Orleans, IEEE Publ, 1987, pp. 171–176.
21. Manusov V.Z., Biruikov E.V. Short-term load prediction on the basis of fuzzy neural network and its comparison with other methods. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Tomsk Polytechnic University], 2006, vol. 309, no. 6, pp. 153–157. (In Russian)
22. Potapov V.I., Gritsay A.S., Tyunkov D.A., Sinitsin G.E. Using neural network for building short) term forecast of electricity load of LLC "Omsk energy retail company". *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Tomsk Polytechnic University], Geo Assets Engineering, 2016, vol. 327, no. 8, pp. 44–51. (In Russian)
23. Haykin S. *Neyronnye seti: per. s angl.* [Neural networks: translated from English]. Moscow, Williams Publ., 2006, 1104 p. (In Russian)
24. Potapov V.I. On the effectiveness of providing reliability of redundant neural systems with a random period of monitoring and recovery of operability after the neurons failure. *Omskiy nauchnyy vestnik* [Omsk Scientific Bulletin], 2010, no. 3 (93), pp. 202–203. (In Russian)
25. Vyugin V.V. *Matematicheskie osnovy teorii mashinnogo obucheniya i prognozirovaniya* [Mathematical foundations of the theory of machine learning and forecasting]. Moscow, MCMNO Publ., 2013, 387 p. (In Russian)
26. Nadtoka I.I., Al-Zihery B.M. Short term load forecasting by using least squares support vector machine theory. *Scientific journal Modern problems of science and education*, 2013, no. 6. Available at: <https://www.science-education.ru/ru/article/view?id=11213> (accessed 02 March 2019). (In Russian)
27. Eroshenko S., Khalyasmaa A., Snegirev D. Machine learning techniques for short-term solar power stations operational mode planning. *E3S Web of Conferences*, 2018, vol. 51, doi: 10.1051/e3sconf/20185102004.
28. Singh V.P., Vijay V., Bhatt M.S., Chaturvedi D.K. Generalized neural network methodology for short term solar power forecasting. *Proceedings of 13th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)*. Wroclaw, IEEE Publ., 2013, doi: 10.1109/eeeic-2.2013.6737883.
29. Chen C., Duan S., Cai T., Liu B. Online 24-h solar power forecasting based on weather type classification using artificial neural network. *Solar Energy*, 2011, vol. 85, no. 11, pp. 2856–2870.
30. Li L.L., Cheng P., Lin H.C., Dong H. Short-term output power forecasting of photovoltaic systems based on the deep belief net. *Advances in Mechanical Engineering*, 2017, vol. 9, no. 9, doi: 10.1177/1687814017715983.
31. Stepanov S.M., Iskra N.A. Neural network forecasting of energy generation by solar panels. *Doklady Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta informatiki i radioelektroniki* [Proceedings of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics], 2018, no. 3 (113), pp. 26–31. (In Russian)
32. Vorotyntsev D.V., Tyagunov M.G. Forecasting the Power Output Produced by Photovoltaic Power Plants (for the day ahead) Using Machine Learning Techniques. *Vestnik Moskovskogo energeticheskogo instituta* [Bulletin of Moscow Power Engineering Institute], 2018, no. 4(4), pp. 53–57. (In Russian)
33. Kryukov O.V., Serebryakov A.V. Forecast of Power Generation Invariant Wind Power Installation by Method of Fuzzy Logic. *Aktualnye problemy aviatsii i kosmonavтики* [Topical Issues of Air Transport and Space Technology], 2015, vol. 1, no. 11, pp. 316–318. (In Russian)
34. Gritsay A.S., Tyunkov D.A., Khamitov R.N., Dugin D.D., Sinitsin G.E. Forecast of electricity load via hybrid method on the wholesale power market. *Elektroenergetika glazami molodezhi: Materialy VIII Mezhdunarodnoy molodezhnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Electric power industry through the eyes of the youth: Proc. of the VIII International Scientific and Technical Conference]. Samara: SamGTU, 2017, vol. 3, pp. 163–166. (In Russian)
35. Khamitov R.N., Gritsay A.S., Tyunkov D.A., Dugin D.D., Sinitsin G.E. On the method of constructing a learning sample in the problems of short-term forecasting of power consumption with allowance for the criteria of information value and compactness. *Promyshlennaya energetika* [Industrial power engineering], 2017, no. 8, pp. 23–28. (In Russian)
36. Snegirev D.A., Valiev R.T., Eroshenko S.A., Khalyasmaa A.I. Specific features of photovoltaic power plants generation forecasting. *Elektroenergetika glazami molodezhi: Materialy VIII Mezhdunarodnoy molodezhnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Electric power industry through the eyes of the youth: Proc. of the VIII International Scientific and Technical Conference]. Samara: SamGTU, 2017, vol. 3, pp. 139–142. (In Russian)
37. Wu Y.K., Chen C.R., Rahman H.A. A Novel Hybrid Model for Short-Term Forecasting in PV Power Generation. *International Journal of Photoenergy*, 2014, vol. 2014, doi: 10.1155/2014/569249.

Методы краткосрочного прогнозирования выработки электрической энергии солнечными электростанциями и их классификация / Тюньков Д.А., Сапилова А.А., Грицай А.С., Алексеенко Д.А., Хамитов Р.Н. // *Электротехнические системы и комплексы*. 2020. № 3(48). С. 4–10. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-3\(48\)-4-10](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-3(48)-4-10)

Tyunkov D.A., Sapilova A.A., Gritsay A.S., Alekseenko D.A., Khamitov R.N. Short-Term Forecast Methods of Electricity Generation by Solar Power Plants and their Classification. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2020, no. 3(48), pp. 4–10. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-3\(48\)-4-10](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-3(48)-4-10)

Варганова А.В.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОМЫШЛЕННЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

В работе приводится подход по разработке теплоэнергетической модели промышленных электростанций. Данный алгоритм основан на методах динамического программирования и модифицированного последовательного эквивалентирования. Сочетание предложенных методов отличается возможностью построения моделей в табличной форме, учета ограничений в виде равенств и неравенств. Кроме того, модели могут иметь точки недифференцируемости и разрывы. Основным критерием оптимизации является минимум суммарных затрат на первичный энергоноситель с учетом собственных нужд и фонда оплаты труда. При построении эквивалентной модели в качестве исходных данных используются технико-экономические модели энергетических котлов электростанций, представляющие собой зависимость паропроизводительности котла от себестоимости свежего пара, учитывающие расход топлива на выработку 1 т свежего пара и возможные объемы энергоресурсов в составе топливной смеси котла (например, смесь доменного и природного газов). Эквивалентная модель позволяет для необходимой паропроизводительности (с учетом теплофикационных и производственных отборов) электростанции определять оптимальные загрузки котлов по тепловой мощности и соответствующие им расходы первичного топлива, а также затраты на него. При построении модели учитываются эксплуатационные характеристики котлов, а именно температура питающей воды и давление пара в барабане. Отличительной особенностью теплоэнергетической модели электростанции является учет всех возможных соотношений топлива при поиске оптимального значения паропроизводительности энергоустановки. Разработанный алгоритм реализован в оригинальном программном продукте КАТРАН-OptHeatPower, предназначенном для планирования и принятия оперативных решений при управлении нормальными, ремонтными и послеаварийными режимами промышленных тепловых электростанций.

Ключевые слова: технико-экономическая модель, энергетический котел, энергетический ресурс, турбогенератор, местная электростанция, система электроснабжения, промышленное предприятие.

ВВЕДЕНИЕ

Современные промышленные предприятия, выполняя программы по энергосбережению и энергоменеджменту, решают задачи оптимизации режимов систем электроснабжения с источниками распределенной генерации, наличие которых в энергоузлах обусловлено необходимостью в тепловой мощности и сокращением затрат на передачу мощности для энергоемких потребителей. Существует большое число подходов по реализации данных мероприятий.

Одним из способов решения данной задачи является оптимизация режимов промышленных систем электроснабжения по реактивной мощности [1, 2]. Важным также является решение задач оптимизации при проектировании систем с распределенной генерацией [3].

В научных работах рассматриваются вопросы оптимизации внутростанционных режимов промышленных электростанций. В работе [4] приведены вопросы оптимального распределения мощности между отдельными агрегатами электростанций с учетом выработки генераторами реактивной мощности [5], что обеспечивает сокращение потерь мощности в распределительных сетях. В [6] рассматривается вопрос автоматизированного проектирования собственных нужд электростанций, при этом решаются задачи оптимизации на этапе проектирования.

В [7, 8] описываются другие методы и подходы по оптимизации режимов теплоэнергетических систем и сетей, позволяющие повысить эффективность их работы за счет внедрения мероприятий по энергосбережению.

Большое число работ направлено на изучение и моделирование работы электростанций в условиях управляемых сетей [9, 10]. Внедряются новые методы по управлению и контролю при комбинированном

производстве тепловой и электрической энергии [11, 12]. Уделяется внимание вопросам эксплуатации электростанций в условиях промышленных систем электроснабжения [13, 14] с учетом оценки энергоэффективного потребления топливно-энергетических ресурсов [15] и прогноза поведения электроустановок в аварийных режимах [16, 17].

Немаловажным остается вопрос учета ограничений и требований, предъявляемым к моделям электростанций [18], которые должны позволять адекватно отражать весь жизненный цикл тепловых электростанций [19].

Как уже отмечалось, немаловажной задачей является распределение нагрузок между агрегатами электростанций, данная задача в работе [20] решается с использованием генетического алгоритма, однако авторы работы [21] предлагают подход с использованием метода динамического программирования. Выбор конкретного метода обусловлен особенностями режимов работы электростанций и определяется непосредственно для рассматриваемого объекта.

Таким образом, вопросы моделирования тепловых электростанций в условиях промышленных систем электроснабжения являются актуальными и требуют новых подходов с целью оптимизации и повышения эффективности режимов их работы.

В данной статье предлагается алгоритм, позволяющий создавать теплоэнергетическую модель промышленных электростанций, отличающийся возможностью учета эксплуатационных характеристик, экономических показателей работы как отдельных агрегатов электростанции, так и в целом рассматриваемой электроустановки. Разработанная модель позволяет оперативно определять оптимальные загрузки котлоагрегатов и планировать их режимы работы в нормальных, ремонтных и послеаварийных режимах.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОТЛОВ
ПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Для осуществления оптимизации режимов промышленных тепловых электростанций методом динамического программирования [21] разработаны адаптированные модели котлоагрегатов, которые в общем виде представляются в табличном виде (табл. 1).

В приведенной модели параметр X обозначает возможную величину загрузки котла (D_i) (табл. 2). Y – это расходуемый энергоноситель для производства заданного значения пара X_i . Для котлов данный параметр эквивалентен расходу таких энергоресурсов, как природный, доменный или коксовый газы, уголь, различные топливные смеси: газозольные смеси, смесь из природного и доменного газов, смесь из природного, доменного и коксового газов и пр. Для модели котла данный параметр соответствует расходам B_i, B_{i+1}, B_{i+m} для m видов топлива в топливной смеси. Важным параметром, который позволяет осуществлять дальнейший оптимизационный расчет, является себестоимость свежего пара S_i . Данный показатель рассчитывается с использованием алгоритма, приведенного в [21, 22].

Данные модели построены на основании режимных карт котлов, однако исходные данные необходимо адаптировать для расчетов.

Для этого между каждым соседним значением задается шаг оптимизации, равный 1 т/ч. Для того чтобы привести расходную характеристику к нужному виду, используется следующее выражение:

$$D_i = D_{i-1} + \Delta D, \quad (1)$$

где D_i – текущая паропроизводительность котла, т/ч; D_{i-1} – паропроизводительность котла на предыдущей ступени модели, т/ч; ΔD – заданный шаг, т/ч, для промышленных тепловых электростанций принимается равным 1 т/ч.

Таблица 1
Универсальная технико-экономическая модель
основного оборудования промышленных тепловых
электростанций

X_i	X_{i1}	X_{i2}	X_{i3}	...	X_{ij}
Y_i	Y_{i1}	Y_{i2}	Y_{i3}	...	Y_{ij}
Y_{i+1}	$Y_{(i+1)1}$	$Y_{(i+1)2}$	$Y_{(i+1)3}$	...	$Y_{(i+1)j}$
...
Y_{i+n}	$Y_{(i+n)1}$	$Y_{(i+n)2}$	$Y_{(i+n)3}$	...	$Y_{(i+n)j}$
S_i , руб./т	S_{i1}	S_{i2}	S_{i3}	...	S_{ij}

Таблица 2
Общий вид технико-экономической модели котлоагрегата

D_i , т/ч	D_{i1}	D_{i2}	D_{i3}	...	D_{ij}
B_i , м ³ /ч	B_{i1}	B_{i2}	B_{i3}	...	B_{ij}
B_{i+1} , м ³ /ч	$B_{(i+1)1}$	$B_{(i+1)2}$	$B_{(i+1)3}$	...	$B_{(i+1)j}$
...
B_{i+m} , м ³ /ч	$B_{(i+n)1}$	$B_{(i+n)2}$	$B_{(i+n)3}$	...	$B_{(i+n)j}$
S_i , руб./т	S_{i1}	S_{i2}	S_{i3}	...	S_{ij}

Для каждой из паропроизводительностей котлоагрегата необходимо определить величину расхода энергоресурсов и себестоимость одной тонны свежего пара:

$$B_i = \left(\frac{D_i - D_{i-1}}{D_{i+1} - D_{i-1}} \right) \cdot (B_{i+1} - B_{i-1}) + B_{i-1}, \quad (2)$$

где B_i – текущий расход энергоносителя, м³/ч или т; D_{i+1} – расход пара на следующей ступени модели, т/ч; B_{i-1}, B_{i+1} – расход энергоносителя на предыдущей и последующей ступени модели, м³/ч или т.

$$S_i = \left(\frac{D_i - D_{i-1}}{D_{i+1} - D_{i-1}} \right) \cdot (S_{i+1} - S_{i-1}) + S_{i-1}, \quad (3)$$

где S_i – себестоимость пара для текущей ступени модели, руб./т; S_{i-1}, S_{i+1} – себестоимость пара на предыдущей и последующей ступени модели, руб./т.

Данные модели составляются для каждого котлоагрегата, они позволяют учитывать технологические особенности работы котлов и генераторов, нагрузку производственных и теплофикационных отборов. Однако данные модели необходимо обязательно обновлять после очередного капитального ремонта оборудования, т.к. после этого изменяются режимные карты котлов, которые отражают зависимость паропроизводительности котла от расхода возможных энергоносителей при различных параметрах.

Разработанные модели позволяют построить эквивалентную модель котлоагрегата исследуемой электростанции с использованием метода динамического программирования.

РАЗРАБОТКА ЭКВИВАЛЕНТНОЙ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ
МОДЕЛИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

При построении моделей используется подход, основанный на методе динамического программирования. Применение данного метода затруднено тем, что для расчетов необходимо хранить большое число данных, однако авторы решили данную проблему применения совместно с методом модифицированного эквивалентирования [21]. Первоначально все модели котлов ранжируются для процесса эквивалентирования по величине средней себестоимости пара. Эквивалентирование начинается с котлов, у которых указанная величина имеет наименьшее значение. Если средние значения себестоимостей пара одинаковы, то в качестве приоритетного элемента для преобразований выбирается тот, у которого наибольшие значения паропроизводительностей.

Эквивалентная модель котлоагрегатов представляется в табличном виде и является решением задачи внутристанционной оптимизации режимов работы основного оборудования тепловых электростанций. Для получения эквивалентных значений возможных суммарных паропроизводительностей электростанции используется подход, описанный в [21]. Целевая функция для определения оптимального соотношения между паропроизводительностями котлоагрегатов имеет сле-

дующий вид:

$$Z_n = \sum_{j=1}^n \left(\sum_{k=1}^m (C_{k,j}(Y_j) + C_{от\,k,j}(Y_j)) \right) \rightarrow \min, \quad (4)$$

где Y_j – оптимальное управление на j -м шаге; $C_{k,j}(Y_j)$ – стоимость расхода первичного энергоносителя, идущего на выработку пара, необходимого для производства электроэнергии при суммарной загрузке источников P_{Γ} ; P_{Γ} – суммарная мощность турбогенераторов, получающих пар от одного паропровода; $C_{k,j}(Y_j)$ – стоимость расхода пара через отборы; n – число котлов на электростанции, подключенных к одному паропроводу; m – общее число различных видов первичных энергоносителей, используемых на рассматриваемой электростанции.

На функцию (4) накладываются независимые ограничения, обусловленные максимальной и минимальной выработкой котлоагрегатов, определяемых в соответствии с режимными картами, балансом производства пара каждым n -м котлом и его расходом на выработку электроэнергии, теплофикационную и производственную нагрузку, собственные нужды. Также учитываются зависимые ограничения на минимальное и максимальное значение давления в барабане котла и по минимальному и максимальному значению температуры питательной воды.

В общем виде эквивалентная модель котлоагрегата с числом m котлов на электростанции приведена в табл. 3. Разработанный алгоритм реализован в оригинальном программном продукте [23].

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

Таблица 3

Эквивалентная модель котла электростанции

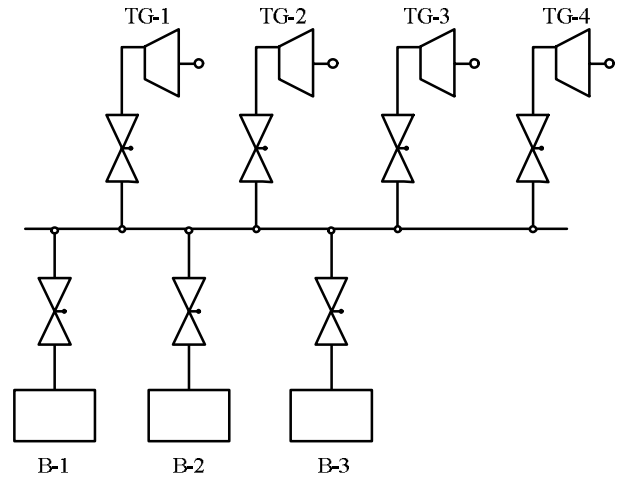
$D_{\text{экв}(i+(i+m))}$, Т/ч	$D_{\text{экв}(i+(i+m))1}$	$D_{\text{экв}(i+(i+m))2}$	...	$D_{\text{экв}(i+(i+m))j}$
$B_{\text{экв}(i+(i+m))}$, м ³ /ч	$B_{\text{экв}(i+(i+m))1}$	$B_{\text{экв}(i+(i+m))2}$	...	$B_{\text{экв}(i+(i+m))j}$
$S_{\text{экв}(i+(i+m))}$, руб./т	$S_{\text{экв}(i+(i+m))1}$	$S_{\text{экв}(i+(i+m))2}$	...	$S_{\text{экв}(i+(i+m))j}$
D_i , Т/ч	D_{i1}	D_{i2}	...	D_{ij}
B_i , м ³ /ч	B_{i1}	B_{i2}	...	B_{ij}
B_{i+n} , м ³ /ч	$B_{(i+n)1}$	$B_{(i+n)2}$	...	$B_{(i+n)j}$
S_i , руб./т	S_{i1}	S_{i2}	...	S_{ij}
D_{i+1} , Т/ч	$D_{(i+1)1}$	$D_{(i+1)2}$	...	$D_{(i+1)j}$
B_{i+1} , м ³ /ч	$B_{(i+1)1}$	$B_{(i+1)2}$	...	$B_{(i+1)j}$
$B_{(i+1)+n}$, м ³ /ч	$B_{((i+1)+n)1}$	$B_{((i+1)+n)2}$	...	$B_{((i+1)+n)j}$
S_{i+1} , руб./т	$S_{(i+1)1}$	$S_{(i+1)2}$	...	$S_{(i+1)j}$
...
D_{i+m} , Т/ч	$D_{(i+m)1}$	$D_{(i+m)2}$	...	$D_{(i+m)j}$
B_{i+m} , м ³ /ч	$B_{(i+m)1}$	$B_{(i+m)2}$	...	$B_{(i+m)j}$
$B_{(i+m)+n}$, м ³ /ч	$B_{((i+m)+n)1}$	$B_{((i+m)+n)2}$	...	$B_{((i+m)+n)j}$
S_{i+m} , руб./т	$S_{(i+m)1}$	$S_{(i+m)2}$	...	$S_{(i+m)j}$

ПРИМЕР РАСЧЕТА

Рассмотрим построение эквивалентной модели на примере котлоагрегатов тепловой электростанции, структурная схема которой приведена на рисунке. На электростанции работают три энергетических котла, использующих один вид топлива, режимные карты котлов приведены в табл. 4.

В результате расчетов, механизм которых приведен в табл. 5 для котлов № 1 и 2, получаем их обобщенную модель на первом этапе эквивалентирования (табл. 6). А эквивалентная теплоэнергетическая модель электростанции приведена в табл. 7.

Используя эквивалентную модель котлоагрегатов электростанции, можно найти оптимальные загрузки котлов при любой необходимой суммарной заданной тепловой нагрузке электростанции. Например, если электростанции необходимо вырабатывать 30 т/ч свежего пара, то котел №1 необходимо загрузить на 10 т/ч, котел №2 – 8 т/ч, котел №3 – 12 т/ч. При этом для каждого из котлов определяются соответствующие расходы энергетических ресурсов, что позволяет определить затраты на выработку единицы свежего пара.



Структурная схема тепловой электростанции

Таблица 4

Расходные характеристики котлоагрегатов

Котел №1							
D_1 , Т/ч	10	11	12	13	14	15	16
B_1 , м ³ /ч	3	4	5	4	6	5	4
S_1 , руб./т	1	2	3	4	5	6	7
Котел №2							
D_2 , Т/ч	5	6	7	8	9	10	
B_2 , м ³ /ч	4	3	5	7	6	7	
S_2 , руб./т	2	1	4	3	3	4	
Котел №3							
D_3 , Т/ч	8	9	10	11	12	13	14
B_3 , м ³ /ч	5	6	4	5	7	6	8
S_3 , руб./т	3	4	4	5	3	7	6

Таблица 5

Процесс расчета эквивалентной характеристики агрегатов №1 и 2

$D_{\text{ЭКВ1-2}}, \text{т/ч}$	$D_1+D_2, \text{т/ч}$	$3_{\text{ЭКВ1-2}}, \text{руб./ч}$	$D_{\text{ЭКВ1-2}}, \text{т/ч}$	$D_1+D_2, \text{т/ч}$	$3_{\text{ЭКВ1-2}}, \text{руб./ч}$
15	10+5	$10 \cdot 1 + 5 \cdot 2 = 20$	21	11+10	$11 \cdot 2 + 10 \cdot 4 = 62$
16	10+6	$10 \cdot 1 + 6 \cdot 1 = 16$		12+9	$12 \cdot 3 + 9 \cdot 3 = 63$
	11+5	$11 \cdot 2 + 5 \cdot 2 = 32$		13+8	$13 \cdot 4 + 8 \cdot 3 = 76$
17	10+7	$10 \cdot 1 + 7 \cdot 4 = 38$		14+7	$14 \cdot 5 + 7 \cdot 4 = 98$
	11+6	$11 \cdot 2 + 6 \cdot 1 = 28$		15+6	$15 \cdot 6 + 6 \cdot 1 = 96$
18	12+5	$12 \cdot 3 + 5 \cdot 2 = 46$	22	16+5	$16 \cdot 7 + 5 \cdot 2 = 122$
	10+8	$10 \cdot 1 + 8 \cdot 3 = 34$		12+10	$12 \cdot 3 + 10 \cdot 4 = 76$
	11+7	$11 \cdot 2 + 7 \cdot 4 = 50$		13+9	$13 \cdot 4 + 9 \cdot 3 = 79$
	12+6	$12 \cdot 3 + 6 \cdot 1 = 42$		14+8	$14 \cdot 5 + 8 \cdot 3 = 94$
19	13+5	$13 \cdot 4 + 5 \cdot 2 = 62$	23	15+7	$15 \cdot 6 + 7 \cdot 4 = 118$
	10+9	$10 \cdot 1 + 9 \cdot 3 = 37$		16+6	$16 \cdot 7 + 6 \cdot 1 = 118$
	11+8	$11 \cdot 2 + 8 \cdot 3 = 46$		13+10	$13 \cdot 4 + 10 \cdot 4 = 92$
	12+7	$12 \cdot 3 + 7 \cdot 4 = 64$		14+9	$14 \cdot 5 + 9 \cdot 3 = 97$
20	13+6	$13 \cdot 4 + 6 \cdot 1 = 58$	24	15+8	$15 \cdot 6 + 8 \cdot 3 = 114$
	14+5	$14 \cdot 5 + 5 \cdot 2 = 80$		16+7	$16 \cdot 7 + 7 \cdot 4 = 140$
	10+10	$10 \cdot 1 + 10 \cdot 4 = 50$		14+10	$14 \cdot 5 + 10 \cdot 4 = 110$
	11+9	$11 \cdot 2 + 9 \cdot 3 = 49$		15+9	$15 \cdot 6 + 9 \cdot 3 = 117$
20	12+8	$12 \cdot 3 + 8 \cdot 3 = 60$	25	16+8	$16 \cdot 7 + 8 \cdot 3 = 136$
	13+7	$13 \cdot 4 + 7 \cdot 4 = 80$		15+10	$15 \cdot 6 + 10 \cdot 4 = 130$
	14+6	$14 \cdot 5 + 6 \cdot 1 = 76$		16+9	$16 \cdot 7 + 9 \cdot 3 = 139$
	15+5	$15 \cdot 6 + 5 \cdot 2 = 100$	26	16+10	$16 \cdot 7 + 10 \cdot 4 = 152$

Таблица 6

Эквивалентная расходная характеристика агрегатов №1 и 2

$D_{\text{ЭКВ1-2}}, \text{т/ч}$	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
$B_{\text{ЭКВ1-2}}, \text{м}^3/\text{ч}$	7	6	7	10	9	10	11	12	11	13	12	11
$S_{\text{ЭКВ1-2}}, \text{руб./т}$	1,5	1	1,5	2	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5
$D_1, \text{т/ч}$	10	10	11	10	10	11	11	12	13	14	15	16
$B_1, \text{м}^3/\text{ч}$	3	3	4	3	3	4	4	5	4	6	5	4
$S_1, \text{руб./т}$	1	1	2	1	1	2	2	3	4	5	6	7
$D_2, \text{т/ч}$	5	6	6	8	9	9	10	10	10	10	10	10
$B_2, \text{м}^3/\text{ч}$	4	3	3	7	6	6	7	7	7	7	7	7
$S_2, \text{руб./т}$	2	1	1	3	3	3	4	4	4	4	4	4

Таблица 7

Эквивалентная расходная характеристика агрегатов №1-2 и 3

$D_{\text{ЭКВ123}}, \text{т/ч}$	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
$B_{\text{ЭКВ123}}, \text{м}^3/\text{ч}$	12	11	12	10	14	13	14	17	16	17	18	19	18	20	19	18	20	19
$S_{\text{ЭКВ123}}, \text{руб./т}$	2	1,7	2	2	2	1,7	2	2,3	2,3	2,7	3	3,3	3,7	4	4,3	4,7	5,3	5,7
$D_{\text{ЭКВ1-2}}, \text{т/ч}$	15	16	17	16	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	25	26
$B_{\text{ЭКВ1-2}}, \text{м}^3/\text{ч}$	7	6	7	6	7	6	7	10	9	10	11	12	11	13	12	11	12	11
$S_{\text{ЭКВ1-2}}, \text{руб./т}$	1,5	1	1,5	1	1,5	1	1,5	2	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	5	5,5
$D_1, \text{т/ч}$	10	10	11	10	10	10	11	10	10	11	11	12	13	14	15	16	15	16
$B_1, \text{м}^3/\text{ч}$	3	3	4	3	3	3	4	3	3	4	4	5	4	6	5	4	5	4
$S_1, \text{руб./т}$	1	1	2	1	1	1	2	1	1	2	2	3	4	5	6	7	6	7
$D_2, \text{т/ч}$	5	6	6	6	5	6	6	8	9	9	10	10	10	10	10	10	10	10
$B_2, \text{м}^3/\text{ч}$	4	3	3	3	4	3	3	7	6	6	7	7	7	7	7	7	7	7
$S_2, \text{руб./т}$	2	1	1	1	2	1	1	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4
$D_3, \text{т/ч}$	8	8	8	10	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	14	14
$B_3, \text{м}^3/\text{ч}$	5	5	5	4	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	8	8
$S_3, \text{руб./т}$	3	3	3	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	6	6

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе приведен подход по построению технико-экономической модели промышленных тепловых электростанций.

Модель позволяет учитывать эксплуатационные характеристики оборудования, а также их остаточный ресурс. Кроме того, модель электростанции разработана с целью определения оптимальных нагрузок котлоагрегатов, а также экономически целесообразный состав топливной смеси.

Разработанный подход предназначен для диспетчерских служб электростанций и в целом для систем электроснабжения промышленного предприятия с целью планирования и оперативного управления нормальными, ремонтными и послеаварийными режимами работы электростанций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. C. Wang, G. Yao, X. Wang, Y. Zheng, L. Zhou, Q. Xu and X. Liang, "Reactive power optimization based on particle swarm optimization algorithm in 10 kV distribution network," in *Advances in Swarm Intelligence*, 2011, pp. 157-164.
2. D. Yang, "Particle swarm optimization algorithm for the application of reactive power optimization problem," in *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 2012, pp. 625-631.
3. Sosnina E.N., Shalukho A.V., Lipuzhin I.A., Kechkin A.Y. and Voroshilov A.A. "Optimization of Virtual Power Plant Topology with Distributed Generation Sources," *2018 International Conference and Utility Exhibition on Green Energy for Sustainable Development (ICUE)*, Phuket, Thailand, 2018, pp. 1-7, doi: 10.23919/ICUE-GESD.2018.8635749.
4. Varganova A.V., Malafeev A.V. "Energy-efficient distribution of heat between the boiler units of industrial power plants with the use of computers," *Power Technology and Engineering*, 2018, no. 52, vol. 1, pp. 74-78.
5. Gazizova O.V., Varganova A.V. and Malafeev A.V. "Steady-State Stability of Industrial Distributed Generation Sources in Terms of Optimization of Their Active and Reactive Power Loading," *2018 International Ural Conference on Green Energy (UralCon)*, Chelyabinsk, 2018, pp. 187-192, doi: 10.1109/URALCON.2018.8544371.
6. Puttgen H.B. and Jansen J.F. "An expert system for the design of a power plant electrical auxiliary system," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 3, no. 1, pp. 254-261, Feb. 1988, doi: 10.1109/59.43208.
7. Варганова А.В. О методах оптимизации режимов работы электроэнергетических систем и сетей // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2017. Т. 17. № 3. С. 76-85.
8. Dzobo O. "Virtual power plant energy optimisation in smart grids," *2019 Southern African Universities Power Engineering Conference/Robotics and Mechatronics/Pattern Recognition Association of South Africa (SAUPEC/RobMech/PRASA)*, Bloemfontein, South Africa, 2019, pp. 714-718.
9. Siqing Lu, E. Swidenbank and B.W. Hogg, "Power Plant Analyser-an applied MATLAB Toolbox", *IEE Colloquium on Applied Control Techniques Using MATLAB*, London, UK, 1995, pp. 11/1-11/4, doi: 10.1049/ic:19950062.
10. M.S. Donne, A.W. Pike and R. Savry, "Application of modern methods in power plant simulation and control," in *Computing & Control Engineering Journal*, vol. 12, no. 2, pp. 75-84, April 2001, doi: 10.1049/cce:20010205.
11. Yuanhang Dai, Lei Chen, Yong Min, Qun Chen, Kang Hu, Junhong Hao, Yiwei Zhang, Fei Xu, "Dispatch Model of Combined Heat and Power Plant Considering Heat Transfer Process", *Sustainable Energy IEEE Transactions on*, vol. 8, no. 3, pp. 1225-1236, 2017.
12. Chaoqun Sheng, Nian Liu, Xiyuan Ma, Changcheng Zhou, Jiahao Han, "Probabilistic Production Simulation for Industrial Integrated Energy System with Power and Steam Loads", *Energy Internet and Energy System Integration (EI2) 2018 2nd IEEE Conference on*, pp. 1-5, 2018.
13. Погодин А.А. Распределенная генерация в схемах электроснабжения промышленного производства // Ростовский научный журнал. 2018. №12. С. 374-381.
14. Илюшин П.В. Анализ особенностей сетей внутреннего электроснабжения промышленных предприятий с объектами распределенной генерации // Энергетик. 2016. №12. С. 21-25.
15. Бондаренко Л.В. Методы и модели управления материальными запасами топлива на тепловых электростанциях // Известия ТРТУ. 2006. № 15 (70). С. 119-122.
16. Крохин Г.Д., Шалин А.И. Нечеткие модели отказов энергоустановок тепловых электростанций // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. 2006. № 2 (23). С. 135-149.
17. Чубаров К.М., Сенько Н.В. Исследование последствий крупных технологических аварий на тепловых станциях // Современные научные исследования и разработки. 2017. №2(10). С. 436-437.
18. Осика Л.К., Журавлёв В.С. Требования к виртуальным моделям тепловых электростанций и инструментам их создания // Электрические станции. 2014. №1(990). С. 2-8.
19. Осика Л.К., Журавлёв В.С. Виртуальное моделирование как единый инструмент управления жизненным циклом тепловых электростанций // Электрические станции. 2013. № 4 (981). С. 2-10.
20. Мерзликина Е.И., Щедеркина Т.Е. Генетический алгоритм оптимизации в задаче распределения нагрузки тепловой электростанции // Вестник Московского энергетического института. Вестник МЭИ. 2018. № 1. С. 22-28.
21. Варганова А.В. Алгоритм внутростанционной оптимизации режимов работы котлоагрегатов и турбогенераторов промышленных электростанций // Промышленная энергетика. 2018. № 1. С. 17-22.
22. Варганов Д.Е., Варганова А.В. Расчет себестоимости свежего пара на крупных тепловых промышленных электростанциях // Электротехнические системы и комплексы. 2016. № 1 (30). С. 24-28.
23. А.с. 2019618397 Российская Федерация, КАТРАН-OptActivePower / Варганова А.В., Малафеев А.В.; заявитель ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». № 2019616954; заявл. 07.06.2019; опубл. 01.07.2019.

Поступила в редакцию 30 июня 2020 г.

INFORMATION IN ENGLISH

THERMAL POWER MODEL OF INDUSTRIAL POWER PLANTS

Aleksandra V. Varganova

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

The paper presents an approach to the development of a heat and power model of industrial power plants. This algorithm is based on dynamic programming and modified sequential

equivalence methods. The combination of the proposed methods is distinguished by the possibility of constructing models in a tabular form taking into account constraints in the form of equalities and

inequalities. In addition, models can have points of discontinuities. The main criterion for optimization is the minimum of total costs for the primary energy carrier taking into account the costs of in-house needs and the wages fund. When constructing an equivalent model, technical and economic models of boiler units are used as initial data, which represent the dependence of the boiler steam output on the prime cost of live steam taking into account the fuel consumption for the production of 1 ton of live steam and possible volumes of energy resources in the fuel mixture of the boiler (for example, a mixture of blast furnace and natural gases). The equivalent model allows for the required steam capacity (taking into account the heating and production withdrawals) of the power plant to determine the optimal load of the boilers in terms of thermal power and, corresponding to them, the primary fuel consumption, as well as the costs of it. When constructing the model, the operational characteristics of the boilers are taken into account, namely, the temperature of the feed water and the steam pressure in the drum. A distinctive feature of the thermal power plant model is the consideration of all possible fuel ratios when searching for the optimal value of the power plant steam capacity. The developed algorithm is implemented in the original KATRAN-OptHeatPower software product intended for planning and making operational decisions in the management of normal, repair and post-emergency modes of industrial thermal power plants.

Keywords: technical and economic model, energy boiler, energy resource, turbine generator, local power plant, power supply system, industrial plant.

REFERENCES

1. C. Wang, G. Yao, X. Wang, Y. Zheng, L. Zhou, Q. Xu and X. Liang, "Reactive power optimization based on particle swarm optimization algorithm in 10 kV distribution network," in *Advances in Swarm Intelligence*, 2011, pp. 157-164.
2. Yang D. "Particle swarm optimization algorithm for the application of reactive power optimization problem," in *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 2012, pp. 625-631.
3. Sosnina E.N., Shalukho A.V., Lipuzhin I.A., Kechkinand A.Y., Voroshilov A.A. "Optimization of Virtual Power Plant Topology with Distributed Generation Sources," *2018 International Conference and Utility Exhibition on Green Energy for Sustainable Development (ICUE)*, Phuket, Thailand, 2018, pp. 1-7, doi: 10.23919/ICUE-GESD.2018.8635749.
4. Varganova A.V., Malafeev A.V. "Energy-efficient distribution of heat between the boiler units of industrial power plants with the use of computers," *Power Technology and Engineering*, 2018, no. 52, vol. 1, pp. 74-78.
5. Gazizova O.V., Varganova A.V. and Malafeev A.V. "Steady-State Stability of Industrial Distributed Generation Sources in Terms of Optimization of Their Active and Reactive Power Loading," *2018 International Ural Conference on Green Energy (UralCon)*, Chelyabinsk, 2018, pp. 187-192, doi: 10.1109/URALCON.2018.8544371.
6. H.B. Puttgen and J.F. Jansen, "An expert system for the design of a power plant electrical auxiliary system," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 3, no. 1, pp. 254-261, Feb. 1988, doi: 10.1109/59.43208.
7. Varganova A.V. About Optimization Methods of Power Supply System and Network Modes *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika* [Bulletin of South Ural State University. Series "Power Engineering"], 2017, vol. 17, no. 3, pp. 76-85. (In Russian)
8. Dzobo O. "Virtual power plant energy optimisation in smart grids" *2019 Southern African Universities Power Engineering Conference/Robotics and Mechatronics/Pattern Recognition Association of South Africa (SAUPEC/RobMech/PRASA)*, Bloemfontein, South Africa, 2019, pp. 714-718.
9. Siquing Lu, E. Swidenbank and B.W. Hogg, "Power Plant Analyser-an applied MATLAB Toolbox," *IEE Colloquium on Applied Control Techniques Using MATLAB*, London, UK, 1995, pp. 11/1-11/4, doi: 10.1049/ic:19950062.
10. Donne M.S., Pike A.W. and Savry R., "Application of modern methods in power plant simulation and control," in *Computing & Control Engineering Journal*, vol. 12, no. 2, pp. 75-84, April 2001, doi: 10.1049/cce:20010205.
11. Yuanhang Dai, Lei Chen, Yong Min, Qun Chen, Kang Hu, Junhong Hao, Yiwei Zhang, Fei Xu, "Dispatch Model of Combined Heat and Power Plant Considering Heat Transfer Process", *Sustainable Energy IEEE Transactions on*, vol. 8, no. 3, pp. 1225-1236, 2017.
12. Chaoqun Sheng, Nian Liu, Xiyuan Ma, Changcheng Zhou, Jiahao Han, "Probabilistic Production Simulation for Industrial Integrated Energy System with Power and Steam Loads", *Energy Internet and Energy System Integration (EI2) 2018 2nd IEEE Conference on*, pp. 1-5, 2018.
13. Pogodin A.A. Distributed Generation in Power Supply Schemes for Industrial Production. *Rostovskiy nauchnyy zhurnal* [Rostov Scientific Journal], 2018, no. 12, pp. 374-381. (In Russian)
14. Ilyushin P.V. Analysis of the peculiarities of internal power supply networks of industrial enterprises with distributed generation facilities. *Energetik* [Power engineer], 2016, no. 12, pp. 21-25. (In Russian)
15. Bondarenko L.V. Methods and models of fuel inventory management at thermal power plants. *Izvestia TRTU* [Proceedings of TRTU], 2006, no. 15 (70), pp. 119-122. (In Russian)
16. Krokhin G.D., Shalin A.I. Fuzzy models of failures of power plants of thermal power plants. *Nauchnyy vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Scientific Bulletin of Novosibirsk State Technical University], 2006, no. 2 (23), pp. 135-149. (In Russian)
17. Chubarov K.M., Senko N.V. Investigation of the consequences of major technological accidents at thermal power plants. *Sovremennye nauchnye issledovaniya i razrabotki* [Modern research and development], 2017, no. 2 (10), pp. 436-437. (In Russian)
18. Osika L.K., Zhuravlev V.S. Requirements for virtual models of thermal power plants and tools for their creation. *Elektricheskie stantsii* [Power Technology and Engineering], 2014, no. 1 (990), pp. 2-8. (In Russian)
19. Osika L.K., Zhuravlev V.S. Virtual modeling as a single tool for managing the life cycle of thermal power plants. *Elektricheskie stantsii* [Power Technology and Engineering], 2013, no. 4 (981), pp. 2-10. (In Russian)
20. Merzlikina E.I., Shchederkina T.E. Genetic algorithm of optimization in the problem of load distribution of a thermal power plant. *Vestnik Moskovskogo energeticheskogo instituta. Vestnik MEI* [Bulletin of Moscow Energy Institute. MEI Bulletin], 2018, no. 1, pp. 22-28. (In Russian)
21. Varganova A.V. Algorithm for in-plant optimization of operating modes of boiler units and turbine generators of industrial power plants. *Promyshlennaya energetika* [Industrial energy], 2018, no. 1, pp. 17-22. (In Russian)
22. Varganov D.E., Varganova A.V. Cost Calculation of Working Steam in Terms of Industrial Thermal Power Stations. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical systems and complexes], 2016, no. 1 (30), pp. 24-28. (In Russian)
23. Varganova A.V., Malafeev A.V. *KATRAN-OptActivePower* [KATRAN-OptActivePower]. Software RF, no. 2019618397, 2019.

Варганова А.В. Теплоэнергетическая модель промышленных электростанций // Электротехнические системы и комплексы. 2020. № 3(48). С. 11-16. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-3\(48\)-11-16](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-3(48)-11-16)

Varganova A.V. Thermal Power Model of Industrial Power Plants. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2020, no. 3(48), pp. 11-16. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-3\(48\)-11-16](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-3(48)-11-16)

Апросин К.И., Тавлинцев А.С., Семенов С.И.

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

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ СИНХРОНИЗИРОВАННЫХ ВЕКТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ФУНКЦИЙ ЗАЩИТЫ ЦИФРОВОЙ ПОДСТАНЦИИ

В настоящее время в опытную эксплуатацию вводятся первые проекты цифровой подстанции, выполненные по стандарту МЭК61850. В таких цифровых подстанциях измерения тока и напряжения передаются внутри подстанции при помощи коммуникационной сети, называемой шиной процесса по широкополосному протоколу Sampled values, с периодом 0,25 мс, эта же сеть используется для синхронизации устройств измерения по протоколу РТР. Шина процесса в этом случае характеризуется высокой загрузкой, для ее реализации далеко не всегда хватает пропускной способности коммутаторов 100 Мбит Ethernet, поэтому в части новых проектов переходят на технологию Gigabit Ethernet, что приводит к существенному удорожанию проекта. Высокая загрузка шины процесса не позволяет использовать ее для передачи команд управления, передаваемых с помощью протокола GOOSE, потому для передачи команд управления используется отдельная сеть, называемая шиной станций, что ведет к разрастанию объема коммуникационных сетей на подстанции, что не удобно с эксплуатационной точки зрения. В данной статье рассматривается альтернативный вариант передачи замеров тока и напряжения при помощи протокола С37.118. В отличие от протокола Sampled values, этот протокол регламентирует передачу векторных измерений, посчитанных на основе измерений за один период основной частоты. В настоящее время этот протокол используется в Системе Мониторинга Переходных Режимов (СМПР), с частотой обновления векторных данных один раз в 20 мс. Однако частота обновления является настраиваемым параметром, и если организовать передачу 4-х векторов за период основной частоты, то можно обеспечить требуемое время реакции защит цифровой подстанции в 25 мс. В статье приведены основные подходы к проверке и реализации измерительной цифровой подстанции на базе уже развернутой системы СМПР.

Ключевые слова: цифровая подстанция, функции РЗА, векторные измерения.

ВВЕДЕНИЕ

В результате стремительного развития современных вычислительных средств и коммуникационных сетей появилась возможность создания централизованной релейной защиты и автоматики (ЦРЗА) подстанции. Такое решение обладает целым рядом преимуществ, таких как повышение уровня управляемости подстанцией, снижение капитальных затрат за счёт уменьшения количества терминалов и вторичного оборудования, сохранение надёжности защиты, возможность централизованного удалённого управления подстанцией и т.д. Одним из препятствий на пути создания ЦРЗА подстанции является отсутствие практического опыта эксплуатации таких объектов [1].

В настоящее время в России на подстанциях 220-500 кВ развернута система мониторинга переходных процессов (СМПР). В рамках этой системы на каждое присоединение высокого и среднего напряжения подстанции устанавливается устройство синхронизированных векторных измерений (СВИ), которое измеряет ток и напряжение и выдает синхронизированные векторные замеры тока и напряжения, как представлено на **рис. 1**. Эти данные передаются на общий для подстанции концентратор синхронизированных векторных данных (КСВД). Таким образом, на подстанции уже существует устройство, на котором присутствуют векторные измерения токов и напряжений со всей подстанции.

С целью накопления практического опыта эксплуатации ЦРЗА в настоящей работе предлагается концепция реализации опытно-промышленной эксплуатации на базе КСВД. Ключевыми особенностями

предлагаемого решения ЦРЗА является отсутствие передачи мгновенных значений через коммуникационную сеть подстанции, так как замеры тока и напряжения передаются в виде векторов. Это должно существенно снизить трафик в коммуникационной сети подстанции по сравнению с ЦПС по стандарту МЭК61850, который предусматривает передачу массивов мгновенных значений [2].

Перенос функций регистрации аварийных ситуаций на конечные измерительные устройства с возможностью передачи на КСВД (по необходимости).

Перевод всех функций РЗА на работу исключительно с векторными замерами параметров режима.

На начальном этапе накопления опыта эксплуатации и доработки алгоритмических решений возможно либо подавать выходные сигналы ЦРЗА, либо подавать только в регистраторы аварийных событий, либо ограничиться только фиксацией срабатывания непосредственно внутри КСВД. Ввиду того, что существующий КСВД не включен в схемы управления подстанцией, возможна реализация первого варианта вообще без подсистемы выдачи управляющих воздействий. Это решение позволит без значимых капиталовложений в оборудование и при отсутствии экономического ущерба для потребителей и энергосистемы накопить необходимый практический опыт, а также отладить работу алгоритмов ЦРЗА.

В статье рассмотрены основные особенности реализации ЦРЗА на базе КСВД. Сформулированы основные задачи, которые необходимо решить при разработке ЦРЗА без передачи мгновенных значений измерений тока и напряжения. Предложены этапы развития ЦРЗА на базе существующих устройств СВИ.

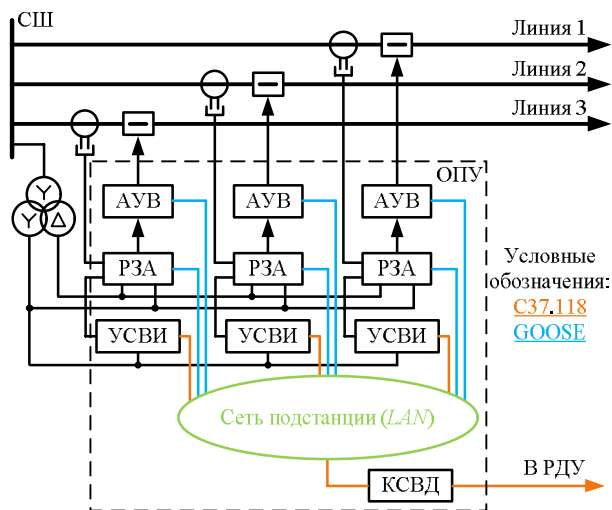


Рис. 1. Пример решения по подключению устройств СВН на существующих подстанциях

В рамках задачи по реализации ЦРЗА на базе КСВД и УСВИ необходимо поэтапно решить следующие основные задачи:

- обеспечить запись параметров электрического режима в аварийных ситуациях на уровне устройств, осуществляющих вычисление векторов (УСВИ);
- исключить функции защиты, использующие мгновенные значения токов и напряжений;
- обеспечить передачу массивов мгновенных значений для средств учёта электроэнергии, использующих мгновенные значения (не в реальном времени);
- разработать практическую методику синхронизации по времени всех устройств на подстанции по протоколу РТР с учетом резервирования.

ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ РЕАЛИЗАЦИИ ЦРЗА

Для снижения капиталовложений на начальных этапах накопления опыта промышленной эксплуатации развитие ЦРЗА можно разделить на несколько этапов:

1. ЦРЗА реализуется на существующем КСВД с минимальными изменениями оборудования на подстанции.
2. В ЦРЗА, реализованной на существующем КСВД, добавляется возможность выдачи дискретных сигналов по протоколу GOOSE [3] (или любому другому протоколу, позволяющему обмен дискретными сигналами по сети Ethernet на уровне L2). На этом этапе GOOSE сообщения о срабатывании ЦРЗА используются исключительно для осциллографирования внешним регистратором аварийных событий.
3. На каждом из УСВИ, установленном на подстанции, реализуется функция регистрации параметров аварийных режимов с возможностью передачи массивов мгновенных значений на КСВД по необходимости (не в режиме реального времени).
4. В ЦРЗА, реализованной на существующем КСВД, организуется выдача GOOSE сообщений о срабатывании, которые передаются как на УСВИ для запуска регистраторов аварийных событий, так и на терминал автоматики управления выключателем (АУВ). На этом этапе появляется возможность работы ЦРЗА на отключение.
5. УСВИ переходят на синхронизацию исключительно по коммуникационной сети и помещаются в шкафы на ОРУ в непосредственной близости от измерительных трансформаторов. Терминалы АУВ также

выносятся на ОРУ к управляемым ими выключателям.

На первом этапе в программное обеспечение КСВД добавляются собственно функции РЗА и функция регистрации момента срабатывания. Дискретный сигнал РЗА добавляется к архиву векторных измерений, который ведется на КСВД. В отличие от устройства РЗА, КСВД имеет непрерывный архив измерений как аварийных, так и нагрузочных режимов, поэтому функция регистрации аварийных событий в нем сводится просто к фиксации требуемого сигнала в архиве, сигнал пуска осциллографа не требуется. Несмотря на отсутствие в архивных данных КСВД мгновенных замеров, по имеющимся данным можно судить о правильности работы алгоритмов ЦРЗА. Появляется возможность отладки алгоритмов ЦРЗА. Однако по таким данным невозможно установить время реакции системы ЦРЗА и оценить время отключения короткого замыкания с помощью ЦРЗА.

На втором этапе сигналы срабатывания ЦРЗА выдаются на штатный регистратор аварийных событий (РАС), установленный на подстанции при помощи GOOSE-сообщений через коммуникационную сеть подстанции. При этом на регистраторе формируется осциллограмма, содержащая как синусоиды токов и напряжений, так дискретный сигнал срабатывания ЦРЗА. По такой осциллограмме можно оценить время реакции функции РЗА, реализованной на сервере КСВД. Синхронизация данных измерений выполняется с использованием сервера точного времени, размещенного на подстанции, по коммуникационной сети подстанции. Это приводит к возможности отказа от существующей системы синхронизации по коаксиальному кабелю (по протоколу IRIGb).

На третьем этапе реализуется система регистрации аварийных событий на базе УСВИ. Пуск процесса записи массива мгновенных значений токов и напряжений на УСВИ осуществляется при помощи GOOSE-сообщений о срабатывании (или о пуске) функции ЦРЗА на КСВД. Такая система уже не зависит от наличия РАС на подстанции и может самостоятельно формировать осциллограммы аварийных событий. Единственное отличие от существующей системы РАС – необходимость сводить осциллограммы разных УСВИ в единую осциллограмму. Такое сведение выполняется с использованием меток времени, которые УСВИ присваивают моменту пуска осциллограммы.

На четвертом этапе планируется реализовать возможность передачи команд на отключение выключателей на терминал автоматики управления выключателем. В этот момент ЦРЗА, реализованная на КСВД, может частично или полностью подменять существующие схемы РЗА подстанции.

На пятом этапе планируется вынести УСВИ на открытое распределительное устройство подстанции и разместить их рядом с измерительными трансформаторами. В результате этого отпадает необходимость передачи аналоговых сигналов по территории подстанции и вся информация передается в цифровом виде по коммуникационной сети.

Результатом такой поэтапной модернизации является цифровая подстанция с ЦРЗА (рис. 2). На такой подстанции отсутствуют кабели, по которым передаются аналоговые сигналы от измерительных трансформаторов до устройств измерения. Реализация всех функций РЗА на едином сервере позволяет отказаться от большого количества отдельных терминалов РЗА, что может удешевить переход на цифровую реализацию РЗА.

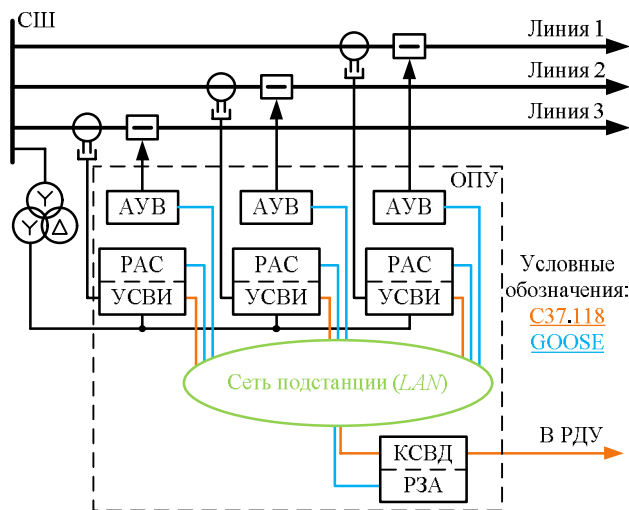


Рис. 2. Пример конечного решения по реализации ЦРЗА на базе КСВД и УСВИ

ОСНОВНЫЕ ТРУДНОСТИ

Время реакции

По действующему в настоящее время стандарту С37 118 УСВИ выдают замер каждый период основной частоты. Такая частота обновления данных не позволяет использовать КСВД в качестве устройства защиты, работающего без выдержки времени, так как существующая нормативно-техническая документация в области РЗА требует время реакции 25 мс. Однако существует техническая возможность настройки УСВИ на вычисление и выдачу замера каждые 5 мс. В этом случае возможно получить время реакции, соизмеримое с требуемым временем реакции традиционных терминалов РЗА.

Насыщение ТТ

Отдельной проблемой при использовании данных существующих УСВИ для РЗА может стать точность их работы в условиях близких коротких замыканий (КЗ). Значительная часть существующих УСВИ подключается к измерительным обмоткам ТТ, которые уходят в режим насыщения при близких КЗ. Решением может стать разделение УСВИ на классы: класс «М» (измерения) и класс «Р» (защита). Последние должны быть подключены к релейным обмоткам ТТ, точка перегиба вольт-амперной характеристики которых должна находиться выше максимальной возможной величины тока КЗ. В противном случае корректная работа функций РЗА не гарантируется.

Синхронизация по времени

От наличия синхронизации измерений зависит работа всех направленных и дифференциальных защит подстанции. Поэтому одного источника синхронизации для устройств РЗА недостаточно. Должен быть резервный механизм синхронизации, желательно на другом физическом принципе.

В настоящее время УСВИ обычно синхронизируются по протоколу IRIG-b с использованием шины синхронизации из коаксиального кабеля. В этих условиях резервирование синхронизации может выполняться при помощи двух шин с устройством переключения между ними. Основной проблемой является сама топология шины, в которой замыкание на экран в любой точке приводит к потере всех подключенных

устройств и, как следствие, отключению функции синхронизации времени.

В настоящее время существует возможность синхронизации по протоколу РТР [4], когда данные для синхронизации передаются по той же коммуникационной сети, по которой передаются данные измерений. Основной проблемой такой технологии является требование аппаратной поддержки протокола всеми устройствами коммуникационной сети, что приведет к увеличению затрат на сетевое оборудование с поддержкой РТР.

Ещё одной проблемой является наличие общего для всей подстанции источника синхронизации, отказ которого, через некоторое время, приведет к потере всех направленных и дифференциальных защит. Поэтому источник синхронизации должен быть многократно резервирован так, чтобы удовлетворять принципу резервирования N-1 в условиях любого ремонта. Решением этой проблемы может стать поддержка программным обеспечением сервера КСВД (на котором реализованы функции ЦРЗА) режима MasterClock протокола РТР. Тогда при потере всех штатных источников синхронизации УСВИ смогут синхронизироваться непосредственно от сервера ЦРЗА.

Альтернативным вариантом может быть использование синхронизации по напряжению питания собственных нужд путем его модуляции переменным напряжением, взятым с шин трансформатора собственных нужд [5, 6].

Функции РЗА

Наиболее важным вопросом является практическая реализуемость функций защиты с использованием исключительно векторных измерений.

Существуют защиты, современные реализации которых используют векторные измерения, вычисленные непосредственно внутри защиты. К ним относятся дистанционные и токовые защиты. Дифференциальные защиты имеют реализации как по векторным, так и по мгновенным замерам.

Отличие между терминалом РЗА, вычисляющим векторы внутри себя, и сервером, получающим данные от нескольких УСВИ, является механизм синхронизации по времени данных измерений. Внутри терминала РЗА все измерения исходно синхронные, так как выполнены одним и тем же АЦП. На сервере векторных измерений необходимо отсортировать данные так, чтобы в функции РЗА попадали данные разных УСВИ, относящиеся к одному и тому же моменту времени. Сортировка может быть произведена по меткам времени, которыми снабжается каждое измерение в соответствии со стандартом С37 118.

Если используется альтернативный механизм синхронизации по питанию, то фазы замеров являются относительными, точная синхронизация не требуется. Необходимо просто обеспечить использование данных из одного электромагнитного состояния сети (с точностью порядка 20 мс). Поэтому при синхронизации по питанию можно использовать все данные, пришедшие во время интервала квази-одновременности, который можно принять равным периоду основной частоты. Исключение составляет случай начала КЗ, при котором необходимо дождаться резкого изменения всех ну-

левых замеров тока и напряжения системы шин, на которой произошло КЗ. То же можно сказать про синхронизацию по данным доаварийного режима первичной сети. При КЗ также необходимо исключить перебивание данных аварийного и доаварийного режима.

МТЗ

Функции МТЗ использует модули измеренных векторов тока присоединения. В случае реализации направленной функции МТЗ для определения условно-положительного направления потока мощности используется угол между измеренными векторами тока и напряжения. Поэтому МТЗ требует именно векторный замер тока и напряжения.

Дистанционная защита

Существующая реализация используемых в настоящее время в энергосистемах России функций дистанционных защит требует наличия фазных и линейных замеров сопротивления, а также замера тока нулевой последовательности (для компенсации фазного замера сопротивления). УСВИ выдают векторы фазных токов и напряжений контролируемого присоединения. Вычисление линейного замера сопротивления основывается на линейном токе и линейном напряжении. Оценки линейных значений векторов могут быть получены на основе данных измерений фазных векторов. Ток нулевой последовательности может быть вычислен путем сложения векторов тока всех фаз.

Токовая защита нулевой последовательности

Функция токовой защиты нулевой последовательности использует замер тока, который вычисляется из фазных векторов тока. Направление определяется через расчет разности фаз вычисленного тока и напряжения нулевой последовательности.

Дифференциальная защита

Дифференциальная защита может быть выполнена на основе нахождения вектора разностного (дифференциального) тока, который рассчитывается на основе измеренных векторов тока присоединений защищаемого элемента. Такой способ вычисления дифференциального тока снижает время реакции защиты в сравнении с дифференциальной защитой по мгновенным значениям. Это обусловлено тем, что для правильного вычисления дифференциального тока необходимо, чтобы с момента начала КЗ прошел один период основной частоты. Таким образом, защита по векторам не может сработать раньше, чем через один период основной частоты.

Время реакции защиты по мгновенным значениям может быть значительно меньше. Однако наличие времени реакции защиты менее одного периода не является необходимым с точки зрения современных требований к времени срабатывания РЗА, которое составляет 25 мс.

Дифференциальные защиты, использующие данные измерений векторов тока, будут иметь ряд ограничений в использовании. Например, при использовании генераторного выключателя при КЗ в блочном трансформаторе. В этом случае происходит снижение периодической составляющей тока КЗ и появляется медленно затухающая свободная составляющая, наличие которой приводит к отсутствию переходов через ноль тока КЗ в течение некоторого времени после начала КЗ.

Дифференциальные защиты, использующие данные измерений векторов тока, невозможно заблокировать, в том случае когда насыщение трансформатора тока происходит за время, меньшее одного периода основной частоты. Как было отмечено выше, проблема насыщения трансформатора является в первую очередь проблемой правильного выбора измерительного трансформатора и его вторичных цепей при проектировании подстанции. Работа измерительного трансформатора в режиме глубокого насыщения является недопустимым режимом, который можно выявить и исключить заранее на этапе проектирования.

Блокировки по высшим гармоникам

Существующие требования к УСВИ не предполагают передачу замеров по высшим гармоническим составляющим. Это приводит к невозможности реализации блокировки по высшим гармоническим составляющим. В этом случае с УСВИ на КСВД потребуются организовать выдачу отдельных пакетов с данными измерений высших гармонических составляющих в том же формате С37.118.

На начальных этапах реализации ЦРЗА блокировку от броска тока намагничивания можно осуществить с использованием дополнительного пускового органа по снижению фазного напряжения на шинах подстанции. Таким образом, блокировка дифференциального пускового органа при насыщении сердечника силового трансформатора по высшим гармоническим составляющим может быть заменена алгоритмом заглубления уставки, фиксирующим одновременное снижение напряжения и отсутствие нагрузочного тока, приводящее к насыщению.

Теоретически в УСВИ можно добавить отдельный алгоритм вычисления векторов основной гармонической составляющей в условиях насыщения измерительного трансформатора и выдавать векторные измерения уже с учетом компенсации высших гармоник. Но такие алгоритмы имеют низкую точность в реальных условиях эксплуатации. По этой причине требуется не допускать насыщения измерительных трансформаторов на этапе проектирования при выборе оборудования.

В результате использования пускового органа, фиксирующего снижение напряжения, можно исключить выдачу высших гармонических составляющих на сервер РЗА при выполнении существующих в настоящее время требований по блокировке дифференциальных защит.

Осциллографирование электромагнитных переходных процессов

С целью анализа правильности работы РЗА в условиях КЗ должна осуществляться запись измеренных мгновенных значений в течение всего времени КЗ и непосредственно перед ним. Функция записи переходных процессов по событию внутри устройства или по внешней команде присутствует во всех терминалах РЗА и в специализированных устройствах – регистраторах аварийных ситуаций. В требованиях к УСВИ такого пункта нет, однако большинство УСВИ являются продолжением линейки РАС, поэтому восстановить в них эту функцию технически возможно. При этом пуск записи может производиться по внешней команде, полученной из коммуникационной сети от сервера,

выполняющего функцию защиты, так как логика пуска записи осциллограммы выполняется только на сервере.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследования показали, что потенциально возможно использовать существующие системы СВИ для реализации централизованной подстанции с минимальными доработками программного обеспечения.

Наличие существующих подстанций с уже установленными СВИ позволяет тестировать работу ЦРЗА в условиях работы реальной энергосистемы.

Предложенная концепция ЦРЗА не требует дорогого оборудования для организации вычислительной сети, так как в ней не используется передача мгновенных значений тока и напряжения.

На первом этапе алгоритмы ЦРЗА могут мало отличаться от существующих решений в области РЗА. Данная возможность апробирована при разработке терминалов РЗА компанией ООО «Прософт-Системы».

Потребуется дополнительно разработать алгоритм пуска осциллограмм в УСВИ с использованием GOOSE-сообщений.

Размещение ЦРЗА на КСВД позволит в краткосрочной перспективе отработать программно-аппаратные решения по ЦРЗА.

За счёт размещения всех функций РЗА на одном устройстве упрощаются аппаратные и алгоритмические решения по работе АВР, после УРОВ и АПВ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Репортаж с круглого стола: Технологию ЦПС нужно развивать сообща! 2015. URL: <http://digitalsubstation.com/blog/2015/11/18/kruglyj-stol-tsentralizovannye-i-detsentralizovannye-sistemy-releijnoj-zashhity-i-avtomatiki/>.
2. International standard IEC61850-9-2 Communication network sand systems in substations Specific Communication Service Mapping (SCSM) – Sampled values. Geneva: IEC, 2004.
3. International standard IEC61850-8-1 Communication network sand systems in substations Specific Communication Service Mapping (SCSM) – Mappings to MMS. Geneva: IEC, 2004.
4. 1588-2008-IEEE Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems. Piscataway NJ 08854-4141. USA: IEEE, 2008.
5. Естественная локальная синхронизация измерений для защит и автоматики цифровой подстанции / К.И. Апросин, Ю.В. Иванов, А.С. Черепов, М.А. Порозков // Релейщик. 2019. No. 3. P. 52–57.
6. Issues of implementation and application of the time synchronization subsystem in complexes of relay protection and emergency control, digital substation, WAMS / K. Aprosina, Y. Ivanov, A. Cherepov, M. Porozkov // Study Committee B5 Colloquium 2019 Tromso Norway. Tromso Norway: 2019.

Поступила в редакцию 20 июля 2020 г.

INFORMATION IN ENGLISH

MAKING USE OF VISUAL INFORMATION BOARD DATA TO IMPLEMENT THE PROTECTION FUNCTION OF A DIGITAL SUBSTATION

Konstantin I. Aprosina

Assistant Professor, Department of Automated Electrical Power Systems, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia.

Alexander S. Tavlintsev

Associate Professor, Department of Automated Electrical Power Systems, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0592-845X>.

Sergey I. Semenenko

Assistant Professor, Department of Automated Electrical Power Systems, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9813-9067>.

Pilot projects of digital substations under current development are based on the application of the IEC61850 standard. Typically, such projects use a separate station and process buses. Therefore, instantaneous current and voltage measurements are transmitted in the SV protocol with the response time of 25 ms, and the same network is used for synchronization of measuring devices with PTP protocol. In this case the process bus is characterized by high load and, to implement it, the capacity of 100 megabit Ethernet commutator switch is not high enough, so in some cases, Gigabit Ethernet technology must be used, which increases the cost of the project significantly. Due to its high load, the process bus can't be used to transfer the control commands, which are transferred by means of GOOSE protocol, that is why a separate network referred to as the station is used for it. This makes the substation communication network very complicated, which is inconvenient from the point of view of operation and maintenance. The paper is concerned with an alternative variant of transmission of current and voltage measurements by means of C37.118 protocol. Unlike

Sampled values protocol, this one makes it possible to transmit vector measurements calculated on the basis of measurements for one basic frequency period. At present, this protocol is used in the wide-area measurement system (WAMS) with the update rate of vector data every 20 ms. However, the update rate is an adjustable parameter and if one can provide transmission of 4 vectors for one basic frequency period, it is possible to provide the required protection response time of the digital substation of 25 ms. The paper describes the main approaches to testing and implementation of a measuring digital substation on the basis of an operating WAMS system.

Keywords: digital substation, protection functions, vector measurements.

REFERENCES

1. Panel discussion report: DSP technology should be developed collectively! 2015. URL: <http://digitalsubstation.com/blog/2015/11/18/kruglyj-stol-tsentralizovannye-i-detsentralizovannye-sistemy-releijnoj-zashhity-i-avtomatiki/>.

- zashhity-i-avtomatiki/. (In Russian)
2. International standard IEC61850-9-2 Communication network sand systems in substations Specific Communication Service Mapping (SCSM) – Sampled values. Geneva: IEC, 2004.
3. International standard IEC61850-8-1 Communication network sand systems in substations Specific Communication Service Mapping (SCSM) – Mappings to MMS. Geneva: IEC, 2004.
4. 1588-2008-IEEE Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems. Piscataway NJ 08854-4141. USA: IEEE, 2008.
5. Aprosin K.I., Ivanov Yu.V., Cherepov A.S., Porozkov M.A. Natural local synchronization of measurements to provide protection and automation of a digital substation. *Releyshchik* [Protection engineer], 2019, no. 3, pp. 52–57. (In Russian)
6. Issues of implementation and application of the time synchronization subsystem in complexes of relay protection and emergency control, digital substation, WAMS / K. Aprosin, Y. Ivanov, A. Cherepov, M. Porozkov // Study Committee B5 Colloquium 2019 Tromsø Norway. Tromsø Norway: 2019.

Апросин К.И., Тавлинцев А.С., Семенов С.И. Использование данных синхронизированных векторных измерений для реализации функций защиты цифровой подстанции // *Электротехнические системы и комплексы*. 2020. № 3(48). С. 17-22. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-3\(48\)-17-22](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-3(48)-17-22)

Aprosin K.I., Tavlintsev A.S., Semenenko S.I. Making Use of Visual Information Board Data to Implement the Protection Function of a Digital Substation. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2020, no. 3(48), pp. 17-22. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-3\(48\)-17-22](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-3(48)-17-22)

Худжасидов Дж.Х.¹, Русина А.Г.², Матренин П.В.², Дмитриев С.А.³, Сафаралиев М.Х.³

¹Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими, г. Душанбе, Республика Таджикистан

²Новосибирский государственный технический университет

³Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург

РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ В ИЗОЛИРОВАННЫХ ЭНЕРГОСИСТЕМАХ

Составление планов ведения режимов нельзя представить без прогнозов, ведь от них напрямую зависит качество всего процесса управления режимами. Электропотребление и графики нагрузки являются основой для составления энергетических балансов, поэтому именно им уделяется особое внимание. К достоверности прогнозных балансов предъявляются очень высокие требования. На протяжении многих лет самым распространенным способом описания электропотребления является временной ряд. Для его создания необходимо знать параметры (амплитуды, частоты и фазы) составляющих гармоник. Рассмотрена задача моделирования электропотребления и графиков нагрузки ЭЭС со специфическими свойствами, основанной на применении методов искусственного интеллекта. В работе рассматриваются различные методы моделирования графиков нагрузки и электропотребления (применение рядов Фурье, градиентная оптимизация, методы, основанные на роевых интеллектах), которые подразумевают под собой подбор необходимых коэффициентов. Все это поможет привести к улучшению достоверности прогнозов и даст возможность расширить использование информационных технологий при планировании режимов ЭЭС. В качестве инструмента применялось экспериментальное программное обеспечение, разработанное авторами, которое имеет свидетельство о государственной регистрации. Для верификации универсальности рассматриваемых методов подбора коэффициентов дополнительно были рассмотрены объединенная энергосистема Сибири и изолированная электроэнергетическая система Горно-Бадахшанская автономная область (ГБАО).

Ключевые слова: прогнозирование электропотребления, временной ряд, ряд Фурье, градиентный метод, метод роя частиц, метод роя пчел.

ВВЕДЕНИЕ

Целью прогнозирования является предвидение значений электропотребления в численной форме и конфигурации графика нагрузки на период упреждения. Очевидно, что чем выше точность прогноза, тем выше надежность и экономичность, а также появляется возможность поддерживать качество электроэнергии более эффективно [1].

Объектом исследования является электроэнергетическая система ГБАО – регион Республики Таджикистан. Здесь основными потребителями электроэнергии являются население, государственные организации и малый бизнес. Исходными данными для анализа являются технико-экономические характеристики основного электрооборудования, которое находится на балансе ОАО «Памир Энерджи», электрические схемы распределительных сетей, структура мощностей нагрузок и генерирующих мощностей, балансы по производству и потреблению электрической энергии и гидрологические данные.

Чаще всего в задачах энергетики анализ, моделирование и прогнозирование электропотребления проводятся на основе временных рядов [2].

В общем виде уравнение временного ряда будет выглядеть следующим образом:

$$P(t) = a_0 + a_1 t + a_2 \sin(\omega_2 t + \varphi_2) + a_3 \sin(\omega_3 t + \varphi_3), \quad (1)$$

где a_0 – постоянная составляющая; a_n – амплитуда; ω – частота; φ – фаза сдвига.

Целью настоящей работы является проведение исследования по применению четырех методов отыскания оптимальных коэффициентов для приведенной конфи-

гурации временного ряда: ряды Фурье (подбор коэффициентов «вручную»), градиентный спуск, метод роя частиц, метод роя пчел на примере ЭЭС ГБАО. В результате ожидается получить сводный анализ рассматриваемых методов по критерию минимума ошибки.

Исходной информацией являются данные по электропотреблению (среднемесячные значения мощности) за 8 лет, в периоды с 2007 – 2011 года и с 2014–2016 гг. То есть имеется «разрыв» в исходных данных. Это является дополнительным предметом рассмотрения: насколько «устойчивы» рассматриваемые методы моделирования к такому прерывистому характеру анализируемого временного ряда.

Средняя ошибка модели будет определяться как среднее значение отклонения модели от фактических данных по всей выборке, определяемых по формуле:

$$\delta = \frac{|P_{\text{факт}} - P_{\text{модель}}|}{|P_{\text{факт}}|} 100\%, \quad (2)$$

где $P_{\text{факт}}$ – фактическое значение мощности, МВт; $P_{\text{модель}}$ – значение мощности электропотребления, полученное с помощью модели, МВт.

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ФУРЬЕ

Временной ряд, отражающий изменение электропотребления, всегда содержит тренд, показывающий устойчивые систематические изменения и периодическую составляющую – колебания относительно тренда. Для получения его приближенной модели можно применить дискретное преобразование Фурье (ДПФ).

После применения ДПФ получаем массив комплексных чисел, каждое из которых содержит сведения о соответствующей гармонике исходного временного ряда. Амплитудно-частотный спектр для одного из рассматриваемых рядов (суточный график нагрузки) показан на **рис. 1**.

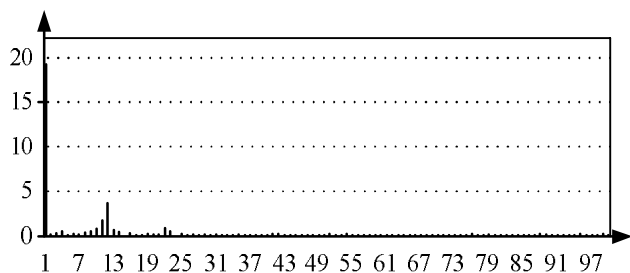


Рис. 1. Амплитудно-частотный спектр временного ряда

Из спектра хорошо видно постоянную составляющую и гармоники, образующие локальные максимумы на спектре (11-я и 21-я гармоники). Частоты в герцах можно определить по формуле

$$\omega = \frac{2\pi N}{L}, \quad (3)$$

где N – номер гармоники; L – размер временного ряда, т.е. количество рассматриваемых точек, составляющих ряд.

ГРАДИЕНТНЫЙ СПУСК

Можно использовать градиентный спуск для моделирования поведения электрической нагрузки, с течением времени самостоятельно задаваясь начальными приближениями. Но целесообразнее будет использовать метод градиентного спуска в качестве оптимизационного для метода дискретного преобразования Фурье. То есть градиентный спуск будет начинать процесс с решения, найденного ДПФ и затем улучшать модель, снижая ее среднюю ошибку.

Градиент – частная производная функции. Одно из его свойств заключается в том, что он указывает направления наибольшего возрастания функции. В целях оптимизации стоит обратить внимание на антиградиент – вектор, направленный в сторону убывания функции.

Так, целевой функцией будет функция ошибок (отклонение модели от фактических данных) и критерий оптимизации – минимум этой ошибки.

В градиентном спуске движение, как правило, осуществляется в направлении наибольшего убывания целевой функции [3]. При этом используется рекуррентное соотношение:

$$X^{i+1} = X^i - t^i \nabla F(X^i), \quad (4)$$

где i – номер итерации; t^i – величина шага алгоритма; $\nabla F(X^i)$ – антиградиент функции.

АЛГОРИТМ РОЯ ЧАСТИЦ

Алгоритм роя частиц (Particle Swarm Optimization – PSO) был изначально разработан для моделирования социального поведения и основан на поведении стай птиц [3]. В 1995 году Дж. Кеннеди и Р. Эберхарт предложили этот метод для решения задач непрерывной глобальной оптимизации [4].

Основная идея алгоритма заключается в представлении допустимых решений оптимизационной задачи в

виде так называемых частиц. Перемещая частицы по определенным правилам, алгоритм при этом перебирает решения задачи, стремясь найти ее экстремум. При этом алгоритм работает, используя следующие принципы [5]:

- стремление частиц двигаться на направлении улучшения целевой функции;
- стремление частиц к наилучшему решению среди всех частиц;
- инерционные свойства движения;
- стохастические отклонения.

Подробное описание алгоритма роя частиц уже приводилось в журнале [6].

АЛГОРИТМ РОЯ ПЧЕЛ

Алгоритм роя пчел (Artificial Bee Colony Algorithm или Bees Algorithm) разработан группой авторов и опубликован в 2005 году [7, 8]. Метод основан на симуляции поведения пчел при поиске нектара. Рой пчел отправляет несколько разведчиков в случайных направлениях для поиска нектара. Вернувшись, разведчики сообщают о найденных на поле участках с цветами, содержащими нектар, и на них вылетают остальные пчелы. При этом чем больше на участке нектара, тем больше пчел к нему устремляется, но пчелы могут случайным образом отклоняться от выбранного направления. После возвращения всех пчел в улей вновь происходит обмен информацией и отправка пчел-разведчиков и пчел-рабочих. Фактически разведчики действуют по алгоритму случайного поиска [9].

Для перехода к формальному описанию алгоритма необходимо представить поле с цветами как пространство поиска решения, а количество нектара как критерии задачи оптимизации, то есть целевую функцию. На каждом шаге работы алгоритма среди всех агентов выбирается n^b лучших по значению целевой функции, среди прочих выбирается еще n^g лучших, так называемых «выбранных» или «перспективных». В некоторых вариантах алгоритма требуется, чтобы расстояния между каждой парой позиций в объединенном множестве лучших и выбранных позиций не превышали определенной величины [10]. Иными словами, если есть две близкие позиции, то худшая из них по значению целевой функции отбрасывается, вместо нее берется позиция другого агента, подходящая под условия.

Согласно схеме описания роевых алгоритмов [11], алгоритм роя пчел ABCO можно представить следующим образом:

1. Множество агентов (пчел) $S = \{s_1, s_2, \dots, s_{|S|}\}$, при этом $s_{ij} = X_{ij} = \{x_{ij}^1, x_{ij}^2, \dots, x_{ij}^d\}$.
2. Средством косвенного обмена M является список лучших и перспективных позиций, найденных на j -й итерации, $M = \{N_{ij}^b, N_{kj}^g\}$, $i = 1, \dots, n^b, k = 1, \dots, n^g$.
3. Алгоритм A описывает механизмы функционирования роя пчел.
- 3.1. Инициализация начальных положений выполняется только для подмножества агентов, называемых

разведчиками:

$$X_{il} = \text{rand}(0,1), i = 1, \dots, n^s,$$

где n^s – количество пчел-разведчиков.

3.2. Вычисление фитнес-функций выполняется на первой итерации только для разведчиков, а на следующих – для всех агентов.

3.3. Миграция пчел. Среди всех агентов выбирают nb агентов с наилучшими значениями целевой функции, а из оставшегося множества еще ng агентов по тому же принципу. Используя эти два набора, формируются списки лучших и перспективных позиций:

$$M = (N_{ij}^b, N_{kj}^g).$$

При этом между любыми двумя позициями в M должно быть расстояние не меньше rx . В окрестность каждой лучшей позиции отправляется c^b пчел, в окрестность каждой перспективной – c^g пчел:

$$X_{(i-1)cb+kj} = N_{ij}^b + \text{rand}(-1,1)\text{rad};$$

$$i = 1, \dots, n^b, k = 1, \dots, c^b;$$

$$X_{nbc+(i-1)cg+kj} = N_{ij}^g + \text{rand}(-1,1)\text{rad};$$

$$i = 1, \dots, n^g, k = 1, \dots, c^g.$$

В конце итерации пчелы-разведчики отправляются в случайные позиции:

$$X_{nbc+ngcg+ij} = \text{rand}(-1,1)\text{rad},$$

$$i = 1, \dots, n^s.$$

Если не выполнено условие остановки, переход к пункту 3.2.

Для применения алгоритмов роевого интеллекта к такой постановке задачи необходимо добавить только ограничения на параметры модели (нижнюю и верхнюю границы). Значения границ можно определить из анализа временного ряда. При этом нет необходимости точно определять область допустимых значений, можно задать их с большим запасом.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В рамках работы было создано экспериментальное программное обеспечение, позволяющее производить подбор коэффициентов временного ряда заданной конфигурации (уравнение (1)). Основная функция программы заключается в том, что при задании входной информации в виде массива данных и выборе способа решения (ДПФ, градиентный спуск, роевые алгоритмы) производится расчет коэффициентов и среднее значение отклонения модели от фактических данных по всей выборке.

Для сравнения все коэффициенты временных рядов, полученные разными методами, сведены в **табл. 1**.

Видно, что наиболее точной оказалась модель, полученная с помощью метода роя частиц, в то время как рой пчел показал самую большую ошибку. Возможно

это связано с необходимостью настройки эвристических параметров алгоритма.

Для верификации универсальности рассматриваемых методов подбора коэффициентов дополнительно была рассмотрена объединенная энергосистема Сибири. Для нее были проведены аналогичные расчеты, но были рассмотрены данные с другой степенью дискретизации. Для ЭЭС ГБАО рассматривались среднемесячные значения мощности, в то время как для ОЭС Сибири – среднесуточные. Результаты приведены в **табл. 2**.

На **рис. 2** показаны графики фактического электропотребления и модель, полученная методом роя пчел (как наиболее точная).

Если сравнивать между собой результаты, полученные при использовании разных методов для обоих объектов, то можно заметить, что для них метод роя частиц дает наименьшую ошибку, метод роя пчел – наибольшую. Модель, созданная с помощью ДПФ, показывает удовлетворительное значение ошибки, которую значительно сокращает градиентная оптимизация, выполненная последовательно с ДПФ.

Таблица 1

Коэффициенты временных рядов и средние ошибки моделей

	ДПФ	ДПФ + Градиент	Рой частиц	Рой пчел
a_0 , МВт	18,95	18,95	18,9	19,25
a_1 , МВт	0,0043	0,0048	0,0047	-0,0022
a_2 , МВт	8,8	8,8	2,49	7,48
w_2 , Гц	0,5237	0,5239	5,2382	6,8
φ_2	1,009	1,009	2,135	0,61
a_3 , МВт	2,59	2,59	8,59	-0,11
w_3 , Гц	1,047	1,047	5,76	4,57
φ_3	0,785	0,785	2,172	0,25
δ , %	6,95	6,94	6,8	11,38

Таблица 2

Средние ошибки моделей для разных ЭЭС, %

	ДПФ	ДПФ + Градиент	Рой частиц	Рой пчел
Памир	6,95	6,94	6,8	11,4
ОЭС Сибири	4,5	4	2,38	10,8

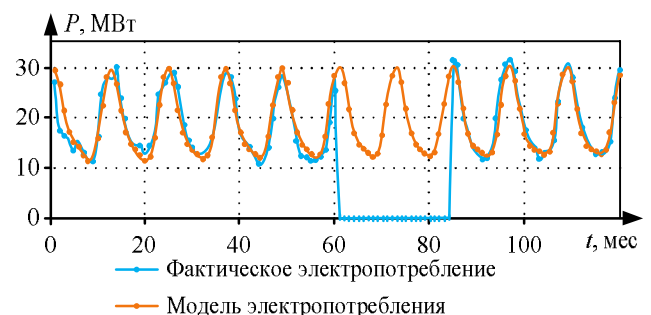


Рис. 2. Модель электропотребления, полученная методом роя частиц

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Была рассмотрена электроэнергетическая система ГБАО – регион Республики Таджикистан, для которой актуальна задача повышения эффективности управления ее режимами, в связи с вводом дополнительных генерирующих мощностей. В новых условиях требуется уделить особое внимание разработке методов, моделей и принципов управления ЭЭС, а именно электропотреблению и графикам нагрузки – как основе в составлении энергетических балансов.

Основной задачей являлось рассмотрение возможных способов получения временных рядов, на основе которых выполняется моделирование и прогнозирование электропотребления, а именно применение преобразования Фурье, градиентного спуска и использование роевых интеллектов (рой частиц и рой пчел). Все эти методы имеют как преимущества, так и недостатки.

Так, преимущество преобразования Фурье заключается в том, что оно дает возможность получить некоторые сведения об анализируемом ряде. В рассматриваемом случае ДПФ подтвердил наличие постоянной составляющей и двух гармоник. Полученную модель можно затем скорректировать, изменяя значения амплитуд, частот и фаз вручную. Однако из-за ограниченного размера временного ряда, погрешностей дискретизации частот полученная таким образом модель требует уточнения.

Недостатком градиентного спуска является сильная зависимость от начального приближения и высокая вероятность преждевременной сходимости в локальном экстремуме. Поэтому целесообразно применять данный метод совместно с другим, например с преобразованием Фурье. Тогда процесс поиска оптимальных коэффициентов начинался бы с решения, найденного ДПФ, тем самым уменьшая среднюю ошибку модели.

Если известна общая форма искомой модели временного ряда, то можно значительно упростить поиск точной модели с помощью алгоритмов роевого интеллекта. Для этих алгоритмов не нужно находить начальное приближение или модифицировать алгоритмы под конкретную форму временного ряда. Необходимо только добавить ограничения на параметры модели (нижнюю и верхнюю границы, тем самым уменьшить пространство решений). Эти границы можно определить из анализа временного ряда. При этом нет необходимости точно определять область допустимых значений, можно задать их с большим запасом. К недостаткам использования роевых интеллектов можно отнести большее время на поиск решения, чем в случае применения ДПФ с последующей оптимизацией. Но при этом можно ожидать более высокую точность решения и высокую гибкость. Например, для случая, когда гармоники временного ряда меняют свои параметры во времени, ДПФ окажется малоэффектив-

ным. При этом для алгоритмов роевого интеллекта, зная примерную форму закона изменения указанных параметров, можно внести соответствующие изменения в модель и получить более точные результаты.

В рассматриваемом случае наиболее эффективным методом оказался метод роя частиц, показав ошибку модели 6,8%, в то время как рой пчел, наоборот, оказался наименее точным – 11,38%. Также можно считать эффективным применение ДПФ с последующей оптимизацией его решения – 6,94%. Можно судить об универсальности использования рассматриваемых методов, так как они показали свою эффективность и при анализе ОЭС Сибири.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Филиппова Т.А. Энергетические режимы электрических станций и электроэнергетических систем: учебник. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2005. 300 с. (Серия «Учебники НГТУ»).
2. Shen W., Babushkin V., Aung Z., Woon W. An ensemble model for day-ahead electricity demand time series forecasting. In: Proceedings of the Fourth International Conference on Future Energy Systems, pp. 51-62. ACM, New York (2013).
3. Филиппова Т.А., Сидоркин Ю.М., Русина А.Г. Оптимизация режимов электростанций и энергосистем: учебник. 2-е изд. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. 356 с.
4. Карпенко А.П. Популяционные алгоритмы глобальной оптимизации. Обзор новых и малоизвестных алгоритмов // Приложение к журналу «Информационные технологии». 2012. №7. С 1-32.
5. Kennedy J., Eberhart R. Particle Swarm Optimization. Proc. of IEEE International Conference on Neural Network, 1995, pp. 1942-1948. doi: 10.1109/ICNN.1995.488968.
6. Манусов В.З., Матренин П.В., Орлов Д.В. Оптимизация коэффициентов трансформации с применением алгоритмов направленного перебора и роевого интеллекта // Проблемы региональной энергетики. 2017. № 1 (33). С. 15-23.
7. Eberhart R.C., Shi Y. "Particle swarm optimization: developments, applications and resources," in Proc. Congress on Evolutionary Computation, vol. 1, pp. 81-86, 2001. doi: 10.1109/CEC.2001.934374.
8. Pham D.T., Ghanbarzadeh A., Koc E., Otri S., Rahim S., Zaidi M. The Bees Algorithm - A Novel Tool for Complex Optimisation Problems [Электронный ресурс] // Technical Note. Manufacturing Engineering Centre. Cardiff University. UK. 2005. URL: <https://svn-d1.mpi-inf.mpg.de/AG1/MultiCoreLab/papers/Pham06%20The%20Bee%20Algorithm.pdf>.
9. Karaboga D. An idea based on honey bee swarm for numerical optimization [Электронный ресурс] // Technical report TR06. Erciyes University, Engineering Faculty, Computer Engineering Department. 2005. URL: http://mf.erciyes.edu.tr/abc/pub/tr06_2005.pdf.
10. Metaxiotis, K., Kagiannas, A., Askounis, D., Psarras, J. Artificial intelligence in short-term electric load forecasting: a state-of-the-art survey for the researcher. Energy Convers. Manag. 44, 1525-1534 (2003).
11. Матренин П.В. Описание и реализация алгоритмов роевого интеллекта с использованием системного подхода // Программная инженерия. 2015. №3. С. 27-34.

Поступила в редакцию 03 июля 2020 г.

INFORMATION IN ENGLISH

DEVELOPMENT OF MODELS FOR THE FORECASTING OF ELECTRICITY CONSUMPTION BASED ON TIME SERIES IN ISOLATED ELECTRICAL POWER SYSTEMS

Jahongir Kh. Khujasaidov

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Department of Electric Stations, Tajik Technical University, Dushanbe, Tajikistan. E-mail: jahon_nstu@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3433-9742>.

Anastasia G. Rusina

D.Sc. (Engineering), Professor, Head of the Department of Electric Stations, Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia. E-mail: rusina@corp.nstu.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2591-4162>.

Pavel V. Matrenin

Ph.D. (Engineering), Assistant Professor, Department of Industrial Power Supply Systems, Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia. E-mail: pavel.matrenin@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5704-0976>.

Stepan A. Dmitriev

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Department of Automated Electrical Systems, Ural Federal University, Ural Power Engineering Institute, Yekaterinburg, Russia. E-mail: dmstepan@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8781-2383>.

Murodbek Kh. Safaraliev

Postgraduate Student, Research Engineer, Department of Automated Electrical Systems, Ural Federal University, Ural Power Engineering Institute, Yekaterinburg, Russia. E-mail: murodbek_03@mail.ru

The development of regime management plans cannot be expected without forecasts, since they directly influence upon the quality of the entire regime management process. Electricity consumption and load graphs are the basis for energy balances and are therefore the focus of attention. The robustness of the forecast balances is very high. For many years, the most common way of describing electricity consumption has been the time series. To create it, you need to know the parameters (amplitudes, frequencies and phases) of the harmonics. The problem of simulation of electric consumption and load graphs of EPS with specific properties based on the application of artificial intelligence methods is considered. The paper considers various methods of simulation of load graphs and electric consumption (application of Fourier series, gradient optimization, methods based on swarm intelligence), which imply the selection of necessary coefficients. All this will help to improve the reliability of forecasts and will make it possible to increase the use of information technologies in the planning of EPS regimes. The tool used was the experimental software developed by the authors, which has a state registration certificate. In order to verify the universality of the methods of coefficient selection under consideration, further consideration was given to the Siberian interconnection system and the isolated electric power system of Gorno-Badakhshan Autonomous Oblast (GBAO).

Keywords: power consumption forecasting, time series, Fourier series, gradient method, particle swarm method, bee swarm method.

REFERENCES

1. Filippova T.A. *Energeticheskiye rezhimy elektricheskikh stantsiy i elektroenergeticheskikh sistem* [Power modes of power plants and power systems]. Novosibirsk, Publishing house of NSTU, 2005, 300 p. (In Russian)
2. Shen W., Babushkin, V. Aung, Z. Woon, W.: An ensemble model for day-ahead electricity demand time series forecasting. In: Proceedings of the Fourth International Conference on Future Energy Systems, pp. 51-62. ACM, New York (2013).
3. Filippova T.A., Sidorkin Yu.M., Rusina A.G. *Optimizatsiya*

rezhimov elektrostantsiy i energosistem [Optimization of modes of power plants and power systems]. Novosibirsk, Publishing house of NSTU, 2016, 356 p. (In Russian)

4. Karpenko A.P. Population algorithms for global optimization. Review of new and little-known algorithms. *Prilozheniye k zhurnalu "Informatsionnyye tekhnologii"* [Appendix to the journal "Information Technologies"]. 2012, no. 7, pp. 1-32. (In Russian)
5. Kennedy J., Eberhart R. Particle Swarm Optimization. Proc. of IEEE International Conference on Neural Network, 1995, pp. 1942-1948. doi: 10.1109/ICNN.1995.488968.
6. Manusov V.Z., Matrenin P.V., Orlov D.V. Optimization of transformation coefficients using directed search algorithms and swarm intelligence. *Problemy regionalnoy energetiki* [Problems of regional energy]. 2017, no. 1 (33), pp. 15-23. (In Russian)
7. Eberhart R.C., Shi Y. "Particle swarm optimization: developments, applications and resources," in Proc. Congress on Evolutionary Computation, vol. 1, pp. 81-86, 2001. doi: 10.1109/CEC.2001.934374.
8. Pham D.T., Ghanbarzadeh A., Koc E., Otri S., Rahim S., Zaidi M. The Bees Algorithm - A Novel Tool for Complex Optimisation Problems [Электронный ресурс] // Technical Note. Manufacturing Engineering Centre. Cardiff University, UK. 2005. URL: <https://svn-d1.mpi-inf.mpg.de/AG1/MultiCoreLab/papers/Pham06%20The%20Bee%20Algorithm.pdf>.
9. Karaboga D. An idea based on honey bee swarm for numerical optimization // Technical report TR06. Erciyes University, Engineering Faculty, Computer Engineering Department. 2005. URL: http://mf.erciyes.edu.tr/abc/pub/tr06_2005.pdf.
10. Metaxiotis K., Kagiannas A., Askounis D., Psarras J. Artificial intelligence in short-term electric load forecasting: a state-of-the-art survey for the researcher. *Energy Convers. Manag.* 44, 1525-1534 (2003).
11. Matrenin P.V. Description and implementation of algorithms for swarm intelligence using a systematic approach. *Programnaya inzheneriya* [Software Engineering]. 2015, no. 3, pp. 27-34. (In Russian)

Разработка моделей прогнозирования электропотребления на основе временных рядов в изолированных энергосистемах / Дж.Х. Худжасидов, А.Г. Русина, П.В. Матренин, С.А. Дмитриев, М.Х. Сафаралиев // Электротехнические системы и комплексы. 2020. № 3(48). С. 23-27. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-3\(48\)-23-27](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-3(48)-23-27)

Khujasaidov J.Kh., Rusina A.G., Matrenin P.V., Dmitriev S.A., Safaraliev M.Kh. Development of Models for the Forecasting of Electricity Consumption Based on Time Series in Isolated Electrical Power Systems. *Elektrotekhnicheskiye sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2020, no. 3(48), pp. 23-27. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-3\(48\)-23-27](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-3(48)-23-27)

ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРИВОДОМ МОТАЛКИ С РАЗНЫМИ ТИПАМИ НАБЛЮДАТЕЛЕЙ СКОРОСТИ

Усовершенствование действующих объектов является актуальной темой для исследования. Механизмы металлургических предприятий, задействованные в сложном технологическом цикле, часто работают в условиях повышенных вибраций и присутствия загрязняющих компонентов в окружающей среде, данные факторы в совокупности негативно влияют на измеряющие приборы, снижая точность их измерения. Переход к бездатчиковым системам управления позволяет уменьшить габариты устройства, избавиться от погрешности измерения, возникающей из-за присутствия соединительных компонентов между датчиками и устройствами обработки информации. Повышается быстродействие системы. Все эти показатели напрямую влияют на качество выпускаемой продукции. Реализация бездатчиковых систем управления возможна за счет внедрения в систему наблюдателей скорости, которые для получения необходимых на выходе параметров используют данные, полученные в частотном преобразователе для других целей. Наблюдатели представляют математическую структуру, функционирующую по определенным правилам или алгоритмам. В работе рассмотрены несколько типов наблюдателей, выбранных на основании ряда критериев, главным из которых является простота реализации. На рассматриваемом объекте используется асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором, управление которым осуществляется частотным преобразователем. В среде математического моделирования Matlab были разработаны: система управления приводом моталки, неадаптивный наблюдатель, наблюдатель (фильтр) Калмана, адаптивный наблюдатель со сравнением потоковосцепления, адаптивный наблюдатель со сравнением ЭДС. За эталонную модель была взята система с неадаптивным наблюдателем, так как данные переходного процесса по скорости с минимальной погрешностью совпали с данными, полученными с датчика скорости. Сравнение результатов моделирования производилось на основании анализа погрешности полученных характеристик скорости при использовании разных типов наблюдателей скорости.

Ключевые слова: электропривод, система управления, наблюдатели скорости, моталка, моделирование, Matlab, Simulink, асинхронный двигатель.

ВВЕДЕНИЕ

Моталки получили широкое распространение на объектах металлургических предприятий, являясь составной частью прокатного стана. После заправки полосы металла в разматыватель, затем в клеть, а после нее в наматывающее устройство, осуществляется установка необходимой величины натяжения полосы и разгон рабочих валков разматывателя и наматывающего устройства в течение 10-15 с до установившейся скорости. Цикл работы двигателя моталки включает разгон, намотку полосы и торможение. Для обеспечения высокого качества полосы при разгоне, установившемся режиме и торможении необходимо поддерживать значение натяжения полосы постоянным [1-4]. В задачи механизма моталки входит сматывание полосы металла в рулоны. К системам управления данными механизмами предъявляются высокие требования как со стороны точности, надежности, так и по показателям быстродействия системы, так как от данных критериев зависит качество выпускаемой продукции.

В настоящее время наблюдается стремление к уменьшению габаритов и стоимости устройств за счет отказа от датчиков скорости. Альтернативой данного устройства становится наблюдатель состояния, для работы которого нет необходимости в установке дополнительного оборудования, данные системы действуют, используя известные параметры двигателя (ток и напряжение) [5-12]. Для исследования были вы-

браны следующие наблюдатели:

- наблюдатель Калмана – алгоритм, производящий идентификацию переменных состояния и параметров нелинейных динамических систем, осуществляет учет возникающих ошибок в системе, обеспечивает оптимальную оценку переменных состояния за счет учета значительного количества параметров двигателя. Одновременно из-за большого количества используемых данных наблюдатель сложен в настройке и неустойчив при отклонении параметров двигателя от номинальных значений;

- наблюдатели на базе адаптивной модели базируются на электромагнитных процессах, происходящих в двигателе. Адаптером осуществляется выработка сигнала адаптации контролируемой системы для приближения ее к параметрам эталонной модели [8]. В работе рассматриваются два вида наблюдателей – со сравнением потока и со сравнением ЭДС. Они обеспечивают высокую точность, содержат простой математический аппарат.

На объекте установлен асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором, управляемый частотным преобразователем. Используемая система управления – векторная. Данные системы управления получили широкое распространение за счет простоты реализации. Векторные системы работают с мгновенными значениями переменных [13, 14].

На основании расчета параметров схемы замещения асинхронного двигателя [15, 16] была построена математическая модель асинхронного двигателя в среде Matlab Simulink, удобная для анализа работы элек-

тропривода с различными наблюдателями скорости. При моделировании расчет параметров системы управления и двигателя осуществлялся с учетом параметров наиболее тяжелого режима работы.

РЕАЛИЗАЦИЯ В MATLAB SIMULINK НАБЛЮДАТЕЛЕЙ СКОРОСТИ

Среда математического моделирования Matlab Simulink дает возможность отследить происходящие в двигателе процессы без дополнительных финансовых затрат на исследование, позволяя производить корректировку необходимых параметров, добавление дополнительных блоков и систем, получать результаты.

За базовую модель при исследовании выбран неадаптивный наблюдатель скорости асинхронного двигателя, рассчитанный согласно [8] в неподвижной системе координат [15], математическая модель данного наблюдателя в среде Matlab приведена на **рис. 1**. Входными сигналами неадаптивного наблюдателя являются значения тока статора и напряжения статора в неподвижной системе координат x - y . На выходе наблюдателя формируется рассчитанная косвенным путем скорость. Принцип работы неадаптивного наблюдателя заключается в расчете неизвестных параметров по известным данным, базируясь на формулах, описывающих электромагнитные процессы в электродвигателе.

Неадаптивный наблюдатель наиболее точно осуществляет формирование скорости при моделировании полного цикла технологического процесса моталки, полученные данные сравнивались с результатами, снятыми при использовании датчика скорости (**рис. 2**). Присутствующие в графиках незначительные расхождения связаны с погрешностями, допущенными при расчете параметров схемы замещения.

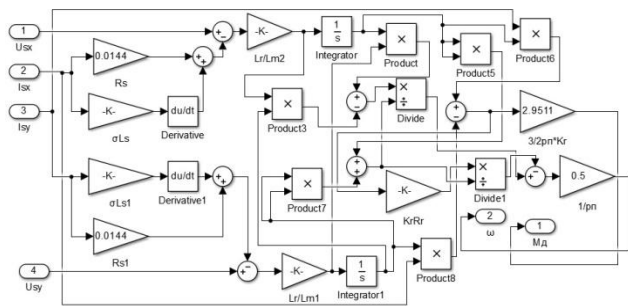


Рис. 1. Неадаптивный наблюдатель

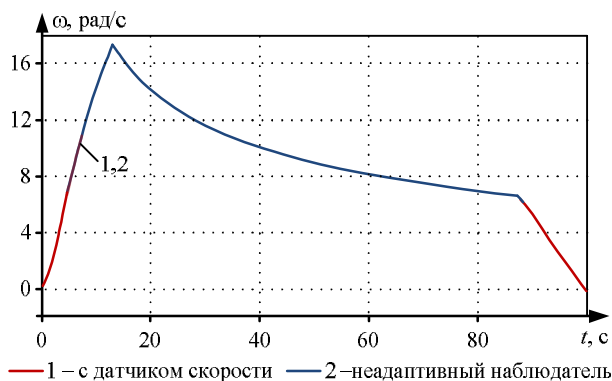


Рис. 2. Графики изменения скорости (полный цикл прокатки металла) при использовании неадаптивного наблюдателя и в системе с наличием датчика скорости

Модель фильтра Калмана в среде Matlab Simulink, структурная схема которого рассмотрена в [8], представлена на **рис. 3**. Фильтр Калмана имеет достаточно сложный математический аппарат, в основе лежат законы математической статистики.

Модель адаптивного наблюдателя на основании потокоцепления ротора в среде Matlab Simulink, структурная схема которого рассмотрена в [8], представлена на **рис. 4**. Потокоцепление ротора можно определить несколькими способами:

- по модели статора (**рис. 5**) – необходимыми данными для системы являются значения напряжения и тока статора;

- по модели ротора (**рис. 6**) – входными параметрами наблюдателя служат ток статора и скорость ротора.

В первом и во втором случае выходным параметром является значение потокоцепления.

Модель адаптивного наблюдателя со сравнением ЭДС отличается от модели адаптивного наблюдателя со сравнением потокоцепления тем, что интегрирующее звено в модели статора заменено на апериодическое звено. Коэффициент усиления наблюдателя со сравнением ЭДС имеет нелинейный характер, и по этой причине может принимать значение, близкое к нулю или ноль.

Адаптивный наблюдатель со сравнением ЭДС в среде Matlab Simulink, структурная схема которого рассмотрена в [8], представлена на **рис. 7**.

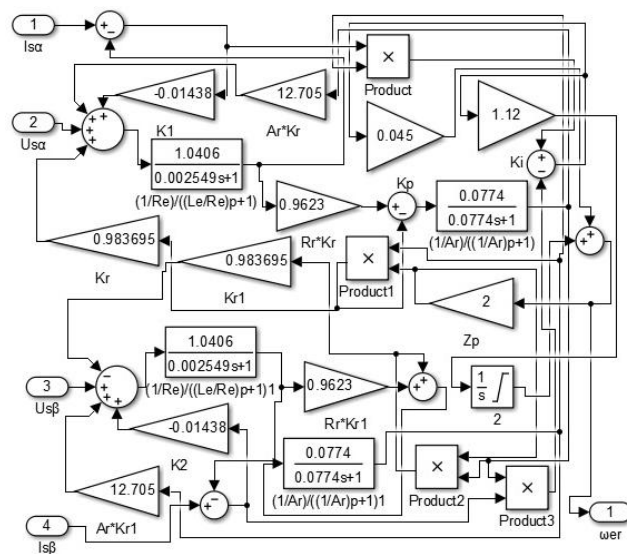


Рис. 3. Фильтр Калмана

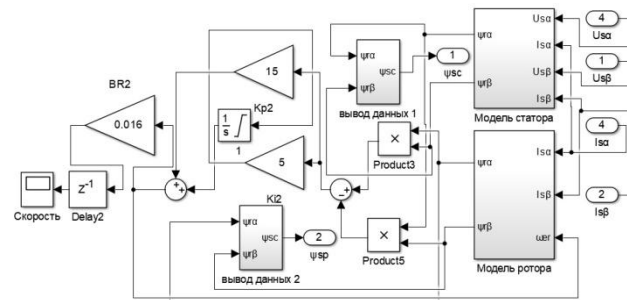


Рис. 4. Адаптивный наблюдатель на основании потокоцепления ротора

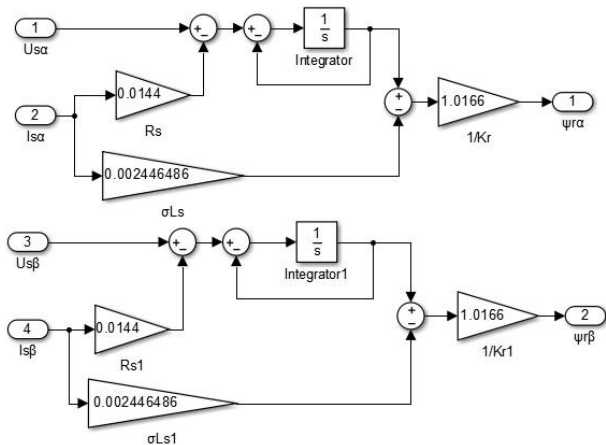


Рис. 5. Модель статора

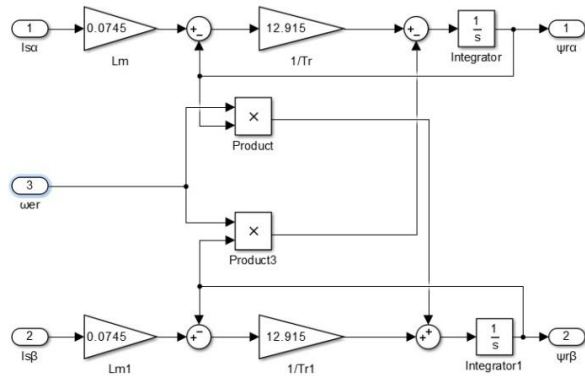


Рис. 6. Модель ротора

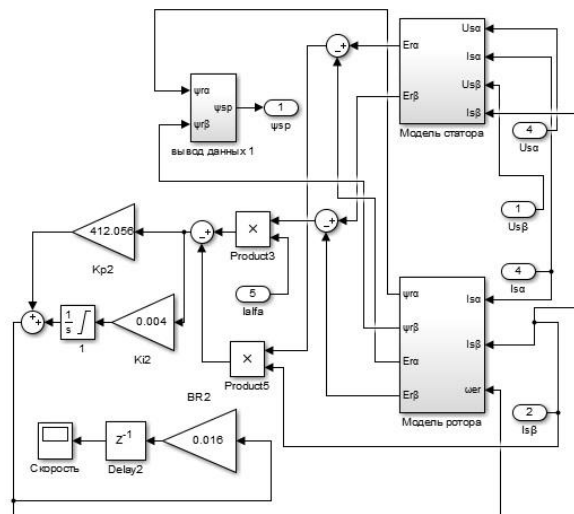


Рис. 7. Адаптивный наблюдатель скорости со сравнением ЭДС

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Совмещенные графики скорости при использовании наблюдателя Калмана и неадаптивного наблюдателя приведены на рис. 8.

Анализируя структуру графиков, можно сделать вывод, что отработка скорости происходит без присутствия погрешностей благодаря заложенному в данный тип алгоритму, позволяющему сводить рассогласование по параметрам к минимуму.

Данный тип наблюдателя подходит для использования на рассматриваемом объекте.

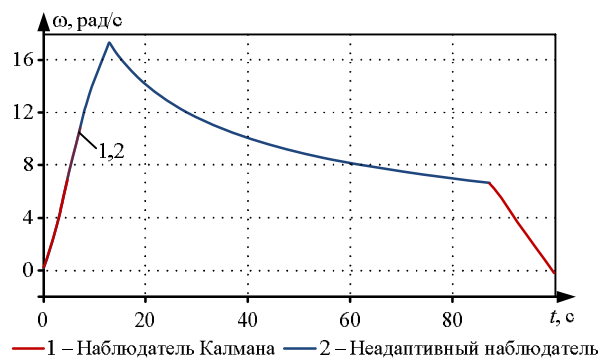


Рис. 8. Графики изменения скорости (полный цикл прокатки металла) при использовании неадаптивного наблюдателя и наблюдателя Калмана

Совмещенные характеристики скорости при использовании в системе управления асинхронным двигателем адаптивного наблюдателя на основании потокоцепления ротора и неадаптивного наблюдателя приведены на рис. 9.

Снижение скорости влечет за собой снижение напряжения, в связи с этим возникает значительная ошибка в определении скорости. В момент пуска наблюдается погрешность в районе шести процентов, а при замедлении механизма она достигает восемнадцати процентов. Присутствие двойного интегрирования в модели статора ведет к появлению значительных колебаний.

Использование данного типа наблюдателя не позволяет достичь необходимых показателей скорости во всем диапазоне технологического процесса привода моталки.

Анализ графика скорости системы с адаптивным наблюдателем со сравнением по ЭДС представлен на рис. 10.

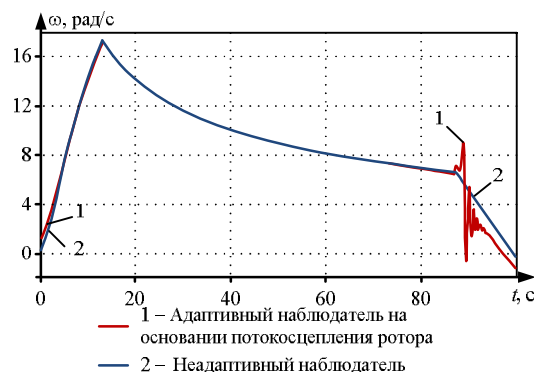


Рис. 9. Графики изменения скорости (полный цикл прокатки металла) при использовании неадаптивного наблюдателя и адаптивного наблюдателя на основании потокоцепления ротора

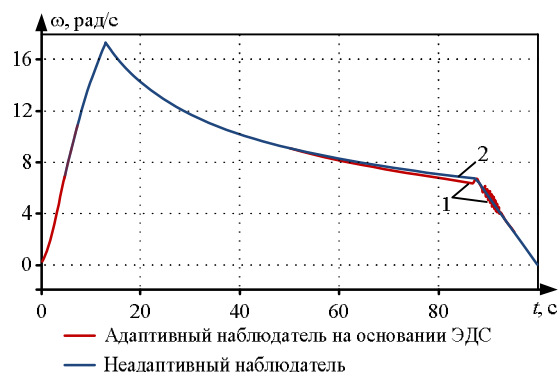


Рис. 10. Графики изменения скорости (полный цикл прокатки металла) при использовании неадаптивного наблюдателя и адаптивного наблюдателя со сравнением ЭДС

Анализ представленных результатов показывает хорошую робастность блока при пуске, снижение скорости сопровождается присутствием колебаний различного диапазона. Установившийся процесс демонстрирует постепенное нарастание ошибки до четырех процентов, что не является критичным для привода моталки.

Применение данного типа адаптивного наблюдателя нецелесообразно на рассматриваемом объекте.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследования позволяют сделать следующие выводы при номинальных параметрах системы:

1. Неадаптивный наблюдатель позволяет с высокой точностью отслеживать скорость.
2. Наблюдатель Калмана отображает данные по скорости с минимальным рассогласованием.
3. Адаптивный наблюдатель скорости со сравнением по потокоцеплению не отрабатывает технологический цикл при снижении скорости двигателя. Уменьшение скорости приводит к появлению колебаний.
4. Адаптивный наблюдатель скорости со сравнением по ЭДС при снижении скорости двигателя демонстрирует наличие погрешности и присутствие колебаний.

Дальнейшие исследования будут направлены на учет влияния изменения температуры двигателя в процессе его работы на сопротивления статора и, соответственно, анализ влияния изменения сопротивления статора на работу наблюдателей скорости.

Статья написана при поддержке гранта РФФИ 19-48-480001 «Разработка, исследование и оптимизация энергосберегающих электротехнических и электроприводных автоматизированных комплексов для плазменных, электрометаллошлаковых и индукционных технологий и агрегатов».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Капунцов Ю.Д., Елисеев В.А., Ильяшенко Л.А. Электрооборудование и электропривод промышленных установок. М.: Высш. шк., 1979. 359 с.
2. Фотиев М.М. Электрооборудование предприятий черной металлургии. М.: Металлургия, 1980. 312 с.
3. Бычков В.П. Электропривод и автоматизация металлургического производства. М.: Высш. шк., 1977. 391 с.
4. Синюков А.В., Синюкова Т.В. Оптимизация системы регулирования натяжения в межклетевых промежутках стана холодной прокатки // XVI Всероссийская научно-практическая конференция студентов и аспирантов, Старый Оскол, 2019. С. 445-447.
5. Синюкова Т.В., Синюков А.В. Неадаптивные наблюдатели в системах управления электроприводами // Управление большими системами: сб. тр. XV Всероссийской школы-конференции молодых ученых: в 2-х т. Т. 2; ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 10-13 сентября 2018 г. Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2018. С. 103-109.
6. Синюкова Т.В., Синюков А.В., Синюкова А.А. Применение адаптивных наблюдателей в системе управления электроприводом механизма передвижения // Управление большими системами: сб. тр. XV Всероссийской школы-конференции молодых ученых: в 2-х т. Т. 2, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 10-13 сентября 2018 г. Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2018. С. 110-115.
7. Sinyukova T.V., Sentsov E.V., Sinyukov A.V. Neural Network Speed Observers // 2019 1st International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA), Lipetsk State Technical University, 2019.
8. Калачев Ю.Н. Наблюдатели состояния в векторном электроприводе. Москва, 2015. 60 с.
9. Доманов В.И., Доманов А.В., Биалова А.И. Синтез бездатчиковой системы управления асинхронным двигателем // Промышленные АСУ и контроллеры. 2018. №7. С. 3-9.
10. Даденков Д.А., Белоногов А.В., Варзаносов П.В. Бездатчиковое векторное управление с адаптивным наблюдателем скорости и непосредственной коррекцией электрического угла // Фундаментальные исследования. 2016. № 11-3. С. 505-509.
11. Мещеряков В.Н., Пикалов В.В., Бойков А.И. Исследование наблюдателя полного порядка для бездатчиковой системы электропривода // Вести высших учебных заведений Черноземья. 2018. № 4 (54). С. 39-49.
12. Островляничик В.Ю., Поползин И.Ю. Модель асинхронного двигателя для бездатчиковых информационно-управляющих систем автоматизированного электропривода // Вестник Кузбасского государственного технического университета, 2016. № 1(113). С. 111-120.
13. Даденков Д.А., Солодкий Е.М., Шачков А.М. Моделирование системы векторного управления асинхронным двигателем в пакете Matlab/Simulink // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2018. № 11. С. 117-128.
14. Нгуен К.Т. Система бездатчикового векторного управления моментом и частотой вращения асинхронного двигателя // Электротехника. 2012. № 2. С. 11-15.
15. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. М.: Академия, 2006. С.265.
16. Браславский И.Я., Ишматов З.Ш., Поляков В.Н. Энергосберегающий асинхронный электропривод. М.: Академия, 2004. 256 с.

Поступила в редакцию 16 июня 2020 г.

INFORMATION IN ENGLISH

INVESTIGATION OF THE COILER DRIVE CONTROL SYSTEM WITH DIFFERENT TYPES OF SPEED OBSERVERS

Viktor N. Meshcheryakov

D.Sc. (Engineering), Professor, Head of the Department of Electric Drive, Department of Electric Drive, Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia. E-mail: meshcherek@yandex.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0984-5133>.

Tatyana V. Sinyukova

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Department of Electric Drive, Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia. E-mail: Stw0411@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9478-2477>.

Aleksey V. Sinyukov

Postgraduate Student, Department of Electric Drive, Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia.
E-mail: zeitsn@yandex.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6772-5370>.

Improvement of the existing facilities is an important topic for research. Mechanisms of metallurgical enterprises involved in a complex technological cycle often operate under conditions of increased vibrations and the presence of polluting components in the environment, these factors together negatively affect the measuring devices reducing the accuracy of their measurement. Switching to sensor-free control systems allows you to reduce the size of the device, get rid of measurement errors arising from the presence of connecting components between sensors and information processing devices. It also increases the system performance. All these indicators directly affect the quality of products. Parallelization of sensorless control systems is possible by introducing speed observers into the system, which use data obtained in the frequency converter for other purposes to obtain the necessary output parameters. Observers represent a mathematical structure that functions according to certain rules or algorithms. The paper considers several types of observers selected on the basis of a number of criteria, the main one being ease of implementation. The object in question uses an asynchronous motor with a short-circuited rotor, which is controlled by a frequency converter. In the Matlab mathematical modeling environment, the following were developed: a coiler drive control system, a non-adaptive observer, a Kalman observer (filter), an adaptive observer with flow coupling comparison, and an adaptive observer with EMF comparison. The system with a non-adaptive observer was taken as the reference model since the data of the transient process in speed coincided with the data obtained from the speed sensor with a minimum error. Comparison of the simulation results was carried out on the basis of the analysis of the error of the obtained speed characteristics when using different types of speed observers.

Keywords: electric drive, control system, speed monitors, coiler, Simulink simulation, Matlab, asynchronous motor.

REFERENCES

1. Kapuntsov Yu. D., Eliseev V.A., Ilyashenko L.A. *Elektrooborudovanie i elektropriwod promyshlennykh ustanovok* [Electrical equipment and electric drive of industrial installations]. Moscow: High school, 1979, 359 p. (In Russian)
2. Fotiev M.M. *Elektrooborudovanie predpriyatiy chernoy metallurgii* [Electrical equipment of ferrous metallurgy enterprises]. Moscow: Metallurgy, 1980. 312 p. (In Russian)
3. Bychkov V.P. *Elektropriwod i avtomatizatsiya metallurgicheskogo proizvodstva* [Electric drive and automation of metallurgical production]. Moscow: High school, 1977, 391 p. (In Russian)
4. Sinyukov A.V., Sinyukova T.V. Optimization of the tension control system in the intercellular spaces of the cold rolling mill. *XVI Vserossiyskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya studentov i aspirantov* [XVI all-Russian scientific and practical conference of students and postgraduate students], Sary Oskol, 2019, pp. 445-447. (In Russian)
5. Sinyukova T.V., Sinyukov A.V. Non-adaptive observers in electric drive control systems. *Upravlenie bolshimi sistemami: sbornik trudov XV Vserossiyskoy shkoly-konferentsii molodykh uchenykh* [Management of large systems: proceedings of the XV all-Russian school-conference of young scientists]; in 2 volumes, vol. 2. Voronezh state technical University, September 10-13, 2018. Voronezh: VSTU Publishing house, 2018, pp. 103-109. (In Russian)
6. Sinyukova T.V., Sinyukov A.V., Sinyukova A.A. Application of adaptive observers in the control system of the electric drive of the movement mechanism. *Upravlenie bolshimi sistemami: sbornik trudov XV Vserossiyskoy shkoly-konferentsii molodykh uchenykh* [Management of large systems: proceedings of the XV all-Russian school-conference of young scientists]; in 2 volumes, vol. 2. Voronezh state technical University, September 10-13, 2018. Voronezh: VSTU Publishing house, 2018, pp. 110-115. (In Russian)
7. Sinyukova T.V., Sentsov E.V., Sinyukov A.V. Neural network speed observers // 2019 1st International Conference on Control Systems, Mathematical modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA), Lipetsk State Technical University, 2019.
8. Kalachev Yu.N. *Nablyudateli sostoyaniya v vektornom elektroprihode* [State observers in a vector electric drive]. Moscow, 2015. 60 p. (In Russian)
9. Domanov V.I., Domanov A.V., Bilalova A.I. Synthesis of sensorless induction motor control system. *Promyshlennye ASU i kontrolyery* [Industrial ACS and controllers]. 2018, no. 7, pp. 3-9. (In Russian)
10. Dadenkov D. A., Belonogov A.V., Varzanosov P.V. Non-static vector control with adaptive speed observation and direct correction of the electric angle. *Fundamentalnye issledovaniya* [Fundamental research], 2016, no. 11-3, pp. 505-509. (In Russian)
11. Meshcheryakov V.N., Pikalov V.V., Boikov A.I. Investigation of a full-order observer for a sensorless electric drive system. *Vesti vysshikh uchebnykh zavedeniy Chernizemya* [Proceedings of higher educational institutions of the Chernozem region], 2018, no. 4 (54), pp. 39-49. (In Russian)
12. Ostrovlyanchik V.Yu., Popolzin I.Yu. Model of asynchronous motor for sensorless information and control systems of automated electric drive. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Kuzbass State Technical University], 2016, no. 1 (113), pp. 111-120. (In Russian)
13. Dadenkov D.A., Solodkiy E.M., Shachkov A.M. Modeling of a vector control system for an asynchronous motor in the Matlab/Simulink package. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniya* [Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Electrical engineering, information technologies, management systems], 2018, no. 11, Pp. 117-128. (In Russian)
14. Nguyen K.T. Sensorless vector control system for torque and speed of induction motor. *Elektrotehnika* [Electrical engineering], 2012, no. 2, pp. 11-15. (In Russian)
15. Sokolovsky G.G. *Elektropriwody peremennogo toka s chastotnym regulirovaniem* [AC-Drives with frequency regulation]. Moscow: Academy, 2006. 265 p. (In Russian)
16. Braslavsky I.Ya., Ishmatov Z.Sh., Polyakov V.N. *Energosberegayushchiy asinkhronnyi elektropriwod* [Energy-saving asynchronous electric drive]. Moscow: Academy, 2004. 256 p. (In Russian)

Мещеряков В.Н., Синюкова Т.В., Синюков А.В. Исследование системы управления приводом моталки с разными типами наблюдателей скорости // *Электротехнические системы и комплексы*. 2020. № 3(48). С. 28-32. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-3\(48\)-28-32](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-3(48)-28-32)

Meshcheryakov V.N., Sinyukova T.V., Sinyukov A.V. Investigation of the Coiler Drive Control System with Different Types of Speed Observers. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2020, no. 3(48), pp. 28-32. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-3\(48\)-28-32](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-3(48)-28-32)

Николаев А.А., Денисевич А.С., Ложкин И.А., Лаптова В.А.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

ПОВЫШЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ С АКТИВНЫМИ ВЫПРЯМИТЕЛЯМИ ПРИ ПРОВАЛАХ НАПРЯЖЕНИЯ И ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТЕ С ДУГОВОЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧЬЮ

В работе произведена оценка эффективности устойчивости главных электроприводов прокатных станов на базе трехуровневых преобразователей частоты (ПЧ) с активными выпрямителями (АВ) при компенсации провалов напряжения за счет генерации реактивного тока. Представлены результаты моделирования параллельной работы ПЧ с АВ и электросталеплавильного комплекса при перенапряжениях, вызванных коммутацией фильтрокомпенсирующих цепей СТК. Предложен способ повышения устойчивости работы ПЧ с АВ при параллельной работе с дуговой сталеплавильной печью (ДСП) при дополнительных искажениях, вызванных переходными процессами при коммутации СТК и фильтрокомпенсирующих цепей. Современные электроприводы прокатных станов выполняются на основе синхронных двигателей и преобразователей частоты, состоящих из активного выпрямителя и автономного инвертора напряжения. Несимметричные провалы напряжения питающей сети вызывают отключение главных электроприводов, что приводит к экономическим убыткам и браку продукции. Обеспечение устойчивой работы прокатных станов в таких режимах является актуальной задачей. Объект исследования – стан горячей прокатки 1750 ЗАО «ММК Metalurji». В программном пакете Matlab Simulink была разработана математическая модель преобразователя частоты для алгоритмов ШИМ с удалением выделенных гармоник и система диагностики провалов напряжения. На математической модели производились исследования работы активного выпрямителя в номинальном режиме работы и при возникновении провалов напряжения. На математической модели проводился анализ сетевых токов на входе активного выпрямителя и напряжения в звене постоянного тока. Согласно исследованиям, ПЧ с АВ отключается от срабатывания максимальной токовой защиты и при срабатывании защиты минимального напряжения в звене постоянного тока. По результатам моделирования произведен сравнительный анализ работы ПЧ при провалах напряжения при использовании автоматической системы диагностики провалов напряжения. Также сделаны выводы о влиянии параметров регуляторов тока и напряжения системы активного выпрямителя на устойчивость работы ПЧ с АВ при несимметричных провалах напряжения.

Ключевые слова: активный выпрямитель, преобразователь частоты, алгоритмы ШИМ, провалы напряжения, электроприводы прокатного стана, статический тиристорный компенсатор, фильтрокомпенсирующая цепь, дуговая электросталеплавильная печь.

ВВЕДЕНИЕ

Работа главных электроприводов современных прокатных станов характеризуется частыми динамическими режимами, обусловленными технологическим процессом прокатки. В настоящее время в основе данных электроприводов используются преобразователи частоты (ПЧ) с асинхронными или синхронными двигателями. С целью улучшения технико-экономических показателей и снижения влияния на качество электроэнергии питающей сети применяют преобразователи частоты с активными выпрямителями (АВ), которые позволяют осуществлять не только рекуперацию энергии в сеть, но и работать с регулируемым коэффициентом мощности. Активный выпрямитель по своей структуре аналогичен автономному инвертору напряжения и строится на базе полностью управляемых силовых ключей – IGBT-транзисторов или IGCT-тиристоров [1]. Силовые ключи АВ работают в режиме широтно-импульсной модуляции (ШИМ).

Провалы напряжения, возникающие в системах электроснабжения, оказывают значительное влияние на работу ПЧ [2-4]. Под провалом напряжения понимают временное снижение уровня напряжения в конкретной точке электрической системы ниже 10% отно-

сительно исходного или согласованного уровня [2]. Возникновение провалов напряжения обусловлено короткими замыканиями (КЗ) в линиях электропередач, возникающих, как правило, вследствие погодных явлений. Глубина и длительность провала напряжения зависят от множества факторов: мощность энергосистемы, вид КЗ, удаленность потребителя от точки КЗ. В источниках [5, 6] представлен анализ распределения провалов напряжения в питающих сетях исследуемых объектов. Даже небольшие по длительности провалы напряжения могут вызвать отключение ПЧ. Разработка методов по улучшению устойчивости ПЧ является актуальной задачей, потому что аварийный останов прокатного стана в составе непрерывного металлургического комплекса несет серьезный экономический ущерб с необходимостью останова остальных агрегатов и линий производства.

Существует несколько способов повышения устойчивости электроприводов на базе ПЧ-АВ при провалах напряжения: 1) использование статического тиристорного компенсатора сверхмощной дуговой сталеплавильной печи [7]; 2) применение специализированных алгоритмов ШИМ [8, 9]; 3) демпфирование провалов напряжения с помощью снижения мощности, потребляемой главными электроприводами стана [2].

Использование резервов реактивной мощности статического тиристорного компенсатора (СТК) для

компенсации провалов напряжения в питающей сети предусматривает параллельную работу главных электроприводов прокатного стана, выполненных на базе ПЧ с АВ и электросталеплавильного комплекса. При работе электросталеплавильного комплекса возникают дополнительные искажения напряжения на общих шинах, вызванных переходными процессами при включении статического тиристорного компенсатора и фильтрокомпенсирующих цепей, которые оказывают негативное влияние на работу системы управления АВ и могут привести к их отключениям [5, 10].

Перечисленные способы имеют недостаток: в них используются внешние устройства компенсации либо сложные алгоритмы. Это требует модификации системы управления, что трудно осуществить в условиях производства. В работе описан простой способ повышения устойчивости ПЧ-АВ при провалах напряжения за счет кратковременного генерирования реактивного тока с помощью АВ. Реализация данного способа возможна путем задания отрицательной уставки на реактивную составляющую тока, формируемую блоком диагностики провалов напряжения, и не требует изменений структуры системы управления АВ. Также были проведены исследования влияния данного эффекта на стабилизацию работы ПЧ-АВ при вынужденной параллельной работе с дуговой сталеплавильной печью.

ОПИСАНИЕ ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ

В данной работе было произведено моделирование главных приводов стана горячей прокатки 1750 ЗАО «ММК Metalurji». На **рис. 1** представлена упрощенная схема электроснабжения стана. Стан состоит из двух черновых и четырех чистовых клеток. Главная понизительная подстанция завода получает питание по воздушной линии электропередач от районной узловой подстанции. В открытом распределительном устройстве заводской подстанции установлены понизительные трансформаторы 380/34,5 кВ. От двух трансформаторов запитано закрытое распределительное устройство 34,5 кВ, от которого получают питание ПЧ стана. Провалы напряжения возникают в линии 380 кВ, которая проходит в гористой местности, и оказывают влияние на внутризаводской уровень напряжения 34,5 кВ.

На стане применяются синхронные двигатели высокой мощности (до 9,5 МВт для чистовой клетки). Для реализации двенадцатипульсной схемы выпрямления два АВ подключены к двум трансформаторам с углами сдвига напряжения вторичной обмотки относительно первичной 0 и +30° соответственно. Первичная обмотка первого трансформатора соединена последовательно с первичной обмоткой второго трансформатора. Это решение позволяет исключить из гармонического состава сетевого напряжения значимые 5-й и 7-й гармоники и улучшить энергетические показатели электропривода. Звено постоянного тока двух АВ объединено. АВ и автономный инвертор напряжения имеют идентичную структуру и реализованы на полностью управляемых IGBT-тиристорах [11].

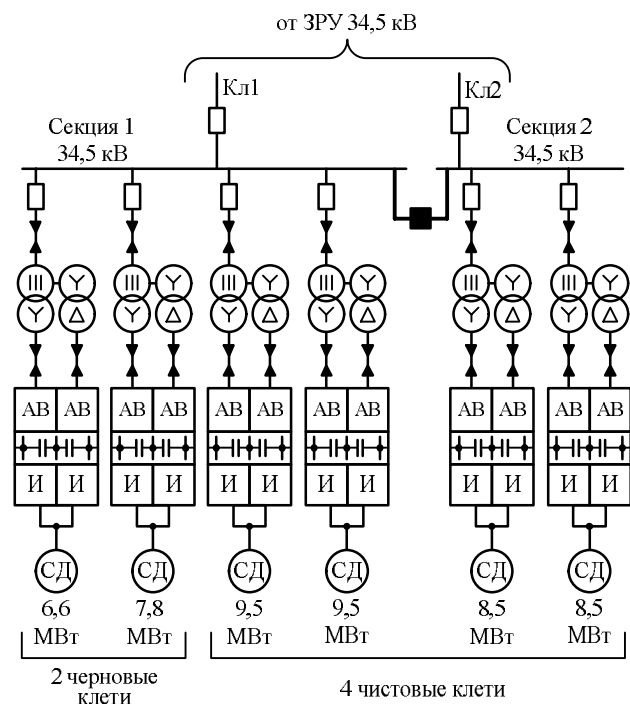


Рис. 1. Упрощенная схема электроснабжения стана 1750 завода ЗАО «ММК Metalurji»

РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ПЧ С АВ

Для проведения исследований были разработаны имитационные модели трехуровневых АВ в программе Matlab-Simulink. Питающая сеть 34,5 кВ представлена идеальным источником напряжения с последовательно подключенным активно-индуктивным сопротивлением. 12-пульсная схема реализована с помощью двух трансформаторов, обеспечивающих сдвиг напряжения на вторичной обмотке 30° относительно друг друга. Реакторы на входах АВ реализованы с помощью активно-индуктивных сопротивлений. Для обеспечения реализации трехуровневой структуры АВ в звене постоянного тока используются два конденсатора с напряжениями 4840/2 В. Эквивалентная нагрузка моделировалась с помощью источника тока в звене постоянного тока [12]. Имитационная модель представлена на **рис. 2**.

Система управления реализована двухконтурной – внутренний контур регулирования токов во вращающейся системе координат dq, внешний – контур регулирования напряжения. Синхронизация с питающим напряжением обеспечивается с помощью блока фазовой автоподстройки частоты [7].

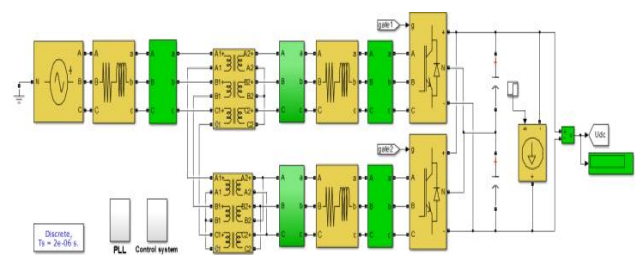


Рис. 2. Имитационная модель, реализованная в Matlab

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ РАБОТЫ ПЧ-АВ
ПРИ ПРОВАЛЕ НАПРЯЖЕНИЯ ГЛУБИНОЙ 30%
И ДЛИТЕЛЬНОСТЬЮ 200 МС ПРИ РАЗЛИЧНОЙ ВЕЛИЧИНЕ
ГЕНЕРИРУЕМОГО РЕАКТИВНОГО ТОКА

На **рис. 3, а** на графике фазных напряжений наблюдается провал напряжения длительностью 200 мс; возникновение однофазного провала напряжения на уровне 30% приводит к снижению напряжения U_{DC} в звене постоянного тока до критического значения **рис. 3, б**.

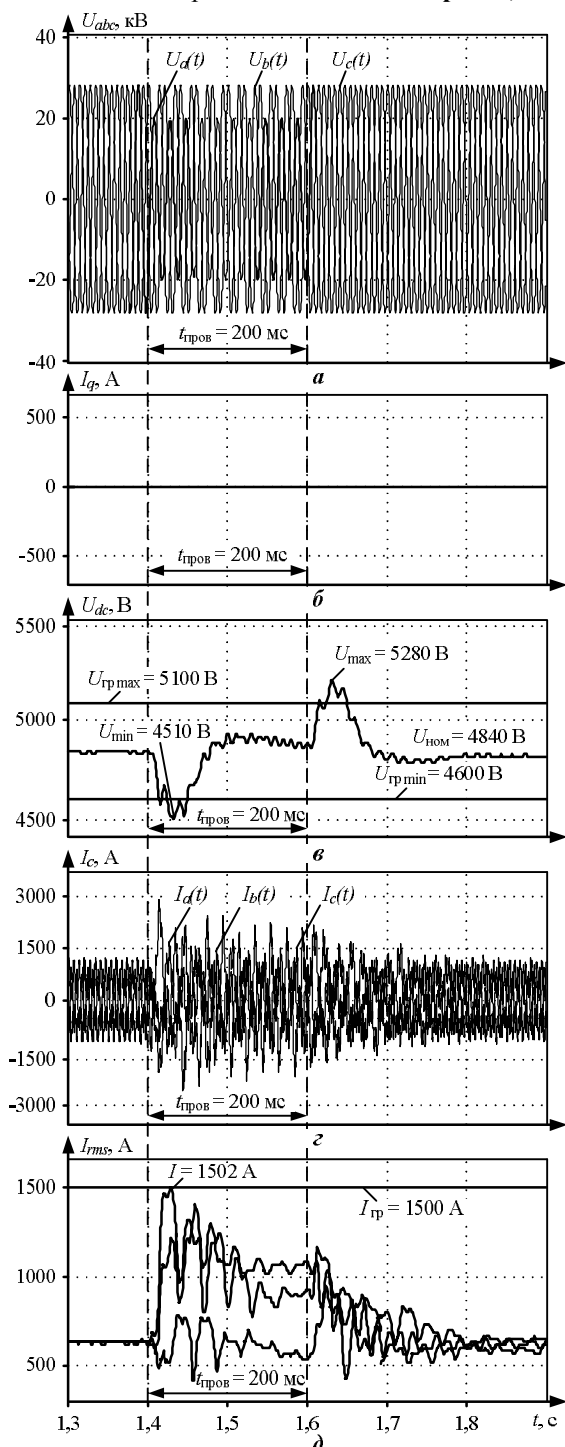


Рис. 3. Графики без компенсации провала напряжения глубиной 30% и длительностью 200 мс: **а** – фазных напряжения на стороне 34,5 кВ; **б** – уставки на реактивную составляющую тока; **в** – напряжение в звене постоянного тока; **г** – фазных токов на входе преобразователя частоты; **д** – действующих значений токов на входе преобразователя частоты

При работе в аварийном режиме наблюдается несимметрия токов на входе АВ, во время провала напряжения питающей сети возникает бросок тока, действующее значение которого превышает уставку срабатывания токовой защиты АВ **рис. 3, г и 3, д**. Уставка на генерацию реактивного тока равна нулю (**рис. 3, в**).

Графики получены на имитационной модели стана горячей прокатки 1750. Напряжение в звене постоянного тока снизилось до 4510 В.

После восстановления напряжения сети наблюдается резкое перерегулирование напряжения в звене постоянного тока до уровня 5280 В. В сетевом токе на протяжении всей длительности провала видна значительная несимметрия токов. Во время провала напряжения происходит значительный бросок тока, действующее значение которого превышает уставку токовой защиты АВ. Таким образом, следует сделать вывод, что при возникновении однофазных провалов напряжений в питающей сети АВ будет отключен либо максимальной токовой защитой при восстановлении нормального режима работы, либо защитой минимального напряжения в звене постоянного тока, либо защитой максимального напряжения в звене постоянного тока [13].

Для компенсации провалов напряжения была разработана система компенсации провалов напряжения в программном продукте MATLAB с приложением Simulink [14]. Во избежание аварийных режимов работы ПЧ с АВ при однофазных провалах напряжения питающей сети генерируется реактивный ток для создания отрицательного падения напряжения на индуктивности понизительного трансформатора. За счет этого повышается напряжение на входе АВ и достигается эффект по стабилизации. На **рис. 4** представлена система автоматической диагностики провалов напряжения. Система в автоматическом режиме формирует сигнал задания на реактивный ток при возникновении провала любой глубины и длительности. Работа блока диагностики основана на анализе ортогональных составляющих напряжения питающей сети. При возникновении несимметрии напряжения составляющая по оси U_{sq} резко возрастает, что фиксируется пороговым элементом, который формирует логическую единицу. Данный сигнал умножается на фиксированную величину уставки $I_q = -600$ А, которая затем поступает в систему управления АВ. Таким образом происходит компенсация провала напряжения питающей сети.

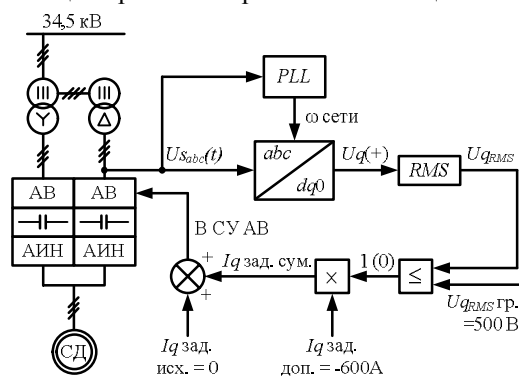


Рис. 4. Система автоматической диагностики провалов напряжения ($abc/dq0$ – блок преобразования координат; RMS – блок вычисления среднеквадратичного значения; $U_{q_{RMSгр}}$ – граничное значение напряжения срабатывания; $I_{q_{зад. доп.}}$ – дополнительная составляющая сигнала задания на реактивный ток АВ; $I_{a_{зад. исх}}$ – исходная уставка реактивного тока АВ; PLL – блок фазовой автоподстройки частоты)

На рис. 5 приведены следующие графики: а) фазные напряжения на стороне 34, 5 кВ, б) уставку на реактивную составляющую тока, равная -600 А, в) график напряжений в звене постоянного тока, г) и д) графики сетевых токов. Следует отметить, что при компенсации провала напряжения с помощью генерации реактивного тока улучшаются графики переходных процессов потребляемых токов и напряжения в звене постоянного тока.

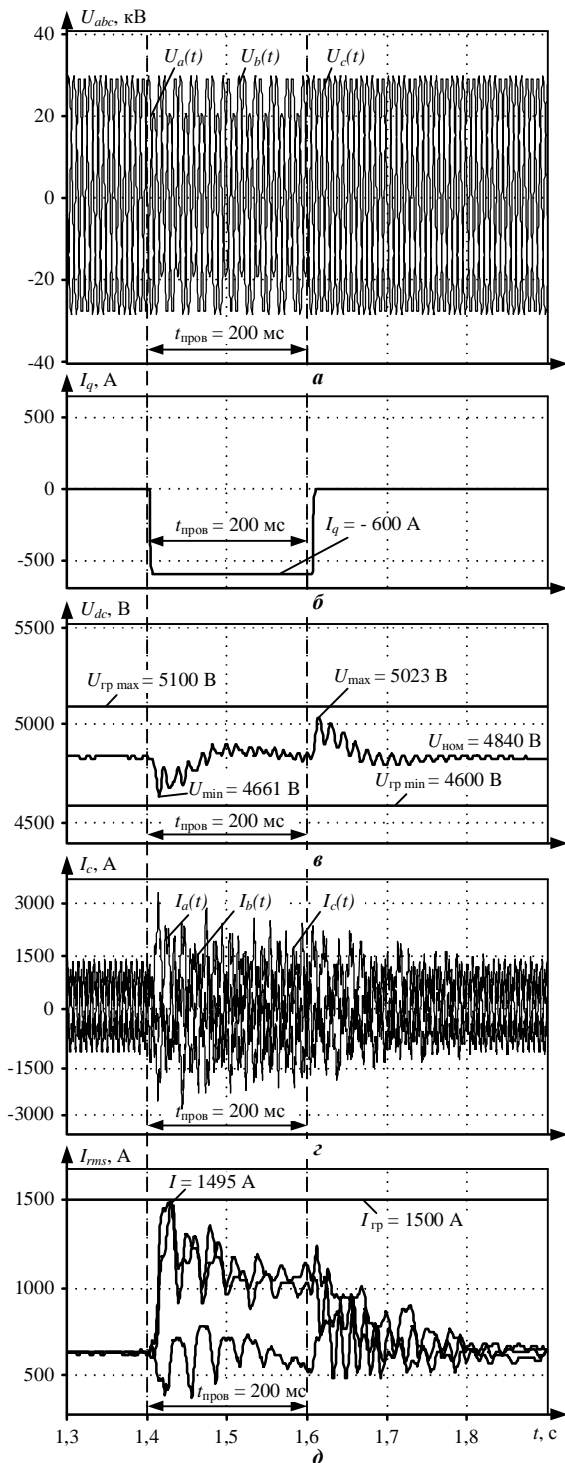


Рис. 5. Графики с компенсацией провала напряжения глубиной 30% и длительностью 200 мс: а – фазных напряжений на стороне 34,5 кВ; б – уставку на реактивную составляющую тока; в – напряжения в звене постоянного тока; г – фазных токов на входе преобразователя частоты; д – действующих значений токов на входе преобразователя частоты

Напряжение в звене постоянного тока практически поддерживается на заданном уровне с небольшими колебаниями. Сетевые токи, потребляемые активным выпрямителем, на протяжении всей длительности провала напряжения остаются на прежнем уровне, сохраняя симметрию по фазам. При восстановлении сети к нормальному режиму наблюдается незначительное увеличение тока, действующее значение которого не превышает уставку срабатывания защиты АВ.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ РАБОТЫ ПЧ С АВ ПРИ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТЕ С ЭЛЕКТРОСТАЛЕПЛАВИЛЬНЫМ КОМПЛЕКСОМ

Использование резервов реактивной мощности статического тиристорного компенсатора для компенсации провалов напряжения в питающей сети предусматривает параллельную работу главных электроприводов прокатного стана, выполненных на базе ПЧ с АВ и электросталеплавильного комплекса. [5, 15]. Статический тиристорный компенсатор состоит из тиристорно-реакторной группы и фильтрокомпенсирующих цепей (ФКЦ). При коммутации ФКЦ возникают перенапряжения, величина которых достигает 30% от номинального уровня. Вызванные перенапряжения приводят к аварийному отключению ПЧ с активным выпрямителем (рис. 6) [17]. Из рис. 6 видно, что наиболее устойчивая работа АВ сохраняется при использовании алгоритма ШИМ с фиксированными значениями углов переключения [16]. Это вызвано спецификой данного алгоритма ШИМ, так как регулирование напряжения в звене постоянного тока происходит за счет потребления реактивной составляющей тока из питающей сети. В связи с этим для повышения устойчивости работы ПЧ с АВ при использовании алгоритмов ШИМ, имеющих двухконтурную систему управления, было предложено в момент коммутации ФКЦ обеспечить потребление реактивного тока из питающей сети. В существующую систему управления АВ необходимо добавить блок сравнения средних значений напряжения питающей сети и на входе АВ. Сигнал их рассогласования обрабатывается ПИ-регулятором, на выходе которого формируется сигнал задания тока по реактивной составляющей (рис. 7).

На рис. 8 представлены результаты моделирования параллельной работы ПЧ с АВ и электросталеплавильного комплекса при использовании модернизированной системы управления АВ. Наблюдается заметное улучшение переходных процессов токов, потребляемых АВ и напряжения в звене постоянного тока. Параллельная работа электроприводов прокатного стана на базе ПЧ-АВ с электротехническим комплексом «ДСП-СТК» позволяет решить проблему негативного влияния внешних провалов напряжения на устойчивость работы активных выпрямителей за счет резервов реактивной мощности СТК дуговой печи. Потребление реактивной мощности положительно влияет на работу ПЧ-АВ при алгоритме ШИМ с удалением выделенных гармоник. Это способствует снижению размаха колебаний напряжения в звене постоянного тока. Кроме того, улучшение качества регулирования напряжения в звене постоянного тока приводит к снижению бросков тока, потребляемого АВ.

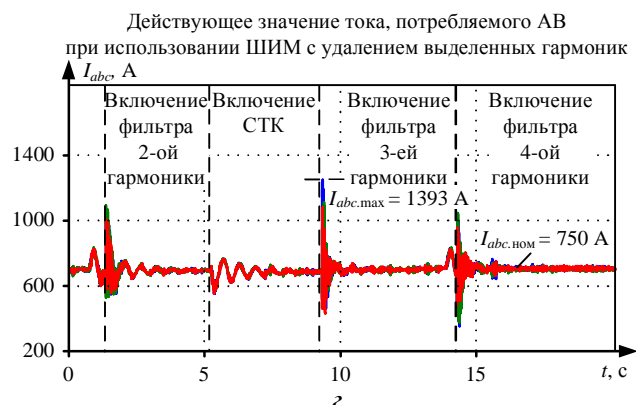
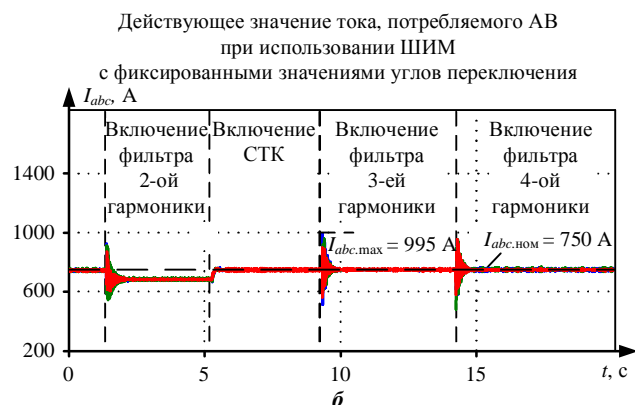
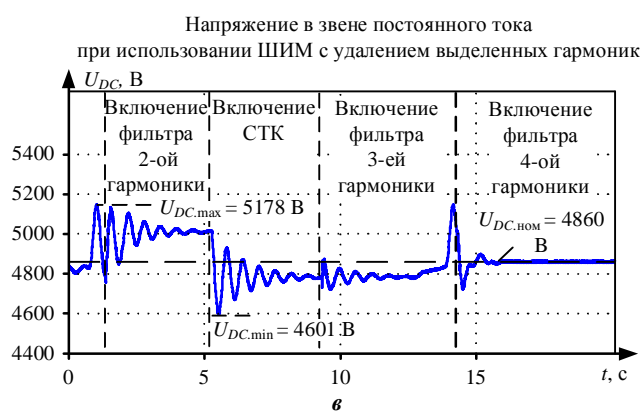
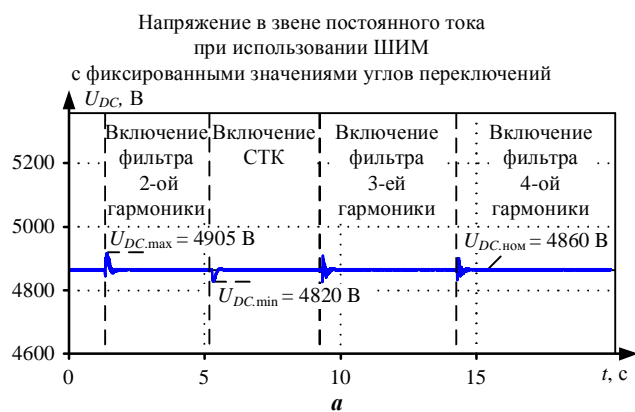


Рис. 6. Кривые напряжения в звене постоянного тока и действующих значений фазных токов, потребляемых АВ:
a, б – ШИМ с фиксированными значениями углов переключений; *в, г* – ШИМ с удалением выделенных гармоник

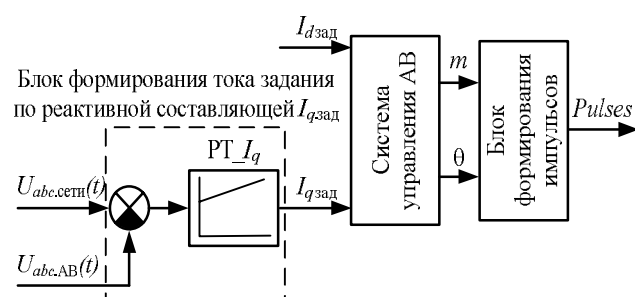


Рис. 7. Упрощенная схема усовершенствованной системы управления активным выпрямителем ($U_{abc,сет}$ – фазные напряжения сети; $U_{abc,AB}$ – фазные напряжения на входе АВ; RT_{I_q} – ПИ-регулятор тока по реактивной составляющей; $I_{d,зад}$, $I_{q,зад}$ – токи задания по активной и реактивной составляющей; m – коэффициент модуляции; θ – угол сдвига; $Pulses$ – импульсы управления тиристорами АВ)

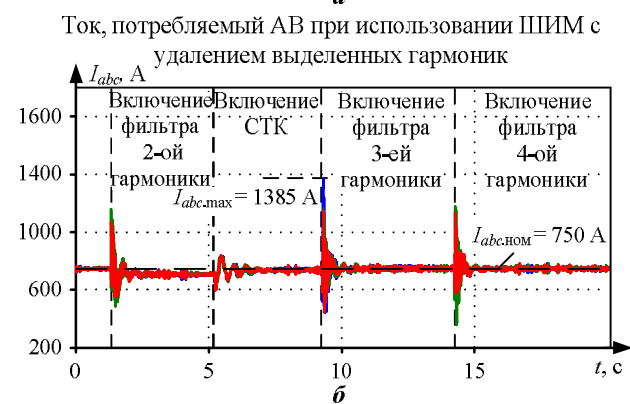
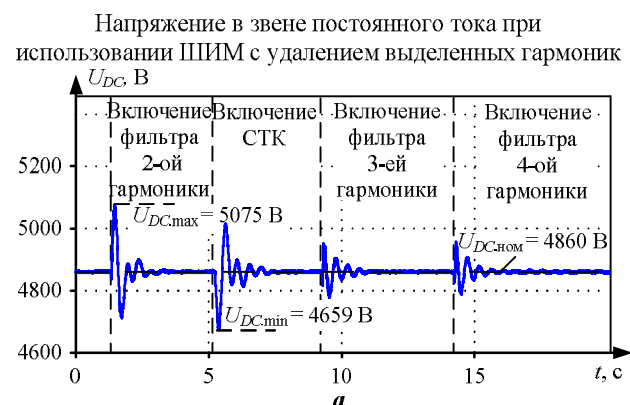


Рис. 8. Графики изменения напряжения в звене постоянного тока и действующих значений фазных токов, потребляемых АВ, при использовании ШИМ с удалением выделенных гармоник и усовершенствованной системы управления АВ

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В данной работе проанализированы режимы работы активного выпрямителя при возникновении провалов напряжения. Реализована в программном продукте MATLAB с приложением Simulink математическая модель главного привода стана горячей прокатки 1750 ЗАО «ММК Metalurji» для исследования способа компенсации провала напряжения с помощью кратковременного генерирования переменного тока при провалах напряжения.

2. На математической модели проведены исследования работы активного выпрямителя в нормальном режиме и при возникновении провала напряжения глубиной 30% и длительностью 200 мс. Исследования показали, что отключения АВ могут произойти как от срабатывания максимальной токовой защиты, так и при срабатывании защиты минимального напряжения.

3. По результатам работы видно, что система автоматической диагностики способна компенсировать падение напряжения в звене постоянного тока при провале питающего напряжения.

4. Помимо генерации реактивного тока для компенсации провала также могут применяться дополнительные мероприятия по повышению устойчивости ПЧ с АВ при провалах напряжения, такие как: 1) использование резервов реактивной мощности статического тиристорного компенсатора, функционирующего в системе внутриводского электроснабжения; 2) применение усовершенствованных систем управления АВ, в которых осуществляется формирование дополнительных корректирующих сигналов, обеспечивающих повышение устойчивости работы силового преобразователя при несимметричном питающем напряжении, например применение корректирующего сигнала по напряжениям обратной последовательности в САР АВ; 3) кратковременное снижение мощности электропривода при провале питающего напряжения; 4) использование различных алгоритмов ШИМ. Комбинирование перечисленных методов позволяет достичь наибольшей надежности работы ПЧ с АВ в условиях частых возмущений со стороны питающей сети [18, 19].

5. По результатам моделирования видно, что данный метод повышения устойчивости работы ПЧ с АВ может применяться не только при провалах напряжения, но и при вынужденной параллельной работы с электростале-плавленным комплексом при коммутации ФКЦ.

6. Повышение устойчивости работы ПЧ с АВ достигается за счет потребления реактивного тока из питающей сети. Для этого в существующую систему управления АВ добавлен блок сравнения уровня напряжения питающей сети и напряжения на входе АВ, в котором происходит формирование тока задания по реактивной составляющей.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект № FZRU-2020-0011).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Исследование воздействия активных выпрямителей большой мощности на питающую сеть / Т.Р. Храмшин, Г.П. Корнилов, А.А. Николаев, Р.Р. Храмшин, Д.С. Крубцов // Вестник Ивановского государственного технического университета. 2013. №1. С. 80-83.

- Пупин В.М., Куфтин Д.С., Сафонов Д.О. Анализ провалов напряжений в питающих сетях предприятий и способы защиты электрооборудования // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2011. № 4. С. 35-41.
- Иванов В. И., Арцишевский Я. Л. Методика прогнозирования статистики провалов питающего напряжения в секционированных распределительных сетях электро-снабжения // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2004. № 6. С. 18-22.
- Шпиганович А.Н., Муров И.С. Провалы напряжения в электрических системах предприятий // Национальная ассоциация ученых. 2015. № 2-4 (7). С. 6-7.
- Использование статического тиристорного компенсатора сверхмощной дуговой сталеплавильной печи для обеспечения устойчивости электроэнергетической системы и повышения надежности внутриводского электроснабжения / А.А. Николаев, Г.П. Корнилов, В.С. Ивекеев, И.А. Ложкин, В.Е. Котышев // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2014. №1. С. 1-11.
- Исследование влияния провалов напряжения в системе электроснабжения завода ММК "Metalurji" на работу главных электроприводов стана горячей прокатки / А.А. Николаев, А.С. Денисевич, И.А. Ложкин, М.М. Тухватуллин // Электротехнические системы и комплексы. 2015. №3(28). С.8-14.
- Николаев А.А., Денисевич А.С., Буланов М.В. Исследование параллельной работы автоматизированных электроприводов прокатного стана и дуговой сталеплавильной печи // Вестник ИГЭУ. 2017. Вып. 3. С. 59-69
- Гасияров В.Р., Радионов А.А., Маклаков А.С. Моделирование трехуровневого преобразователя частоты с фиксированной нейтралью при алгоритме ШИМ с удалением выделенных гармоник // Электротехнические системы и комплексы. 2017. № 1 (34). С. 4-9.
- Маклаков А.С., Радионов А.А. Исследование векторной ШИМ с различными таблицами переключения силовых ключей трехуровневого преобразователя // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. 2015. Т. 2. № 1. С. 30-37.
- Николаев А.А., Денисевич А.С., Ивекеев В.С. Повышение устойчивости преобразователей частоты с активными выпрямителями при коммутациях электрооборудования электростале-плавленного комплекса// Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2019. №5. С. 48-58.
- O'Brien K., Teichmann R., Bernet S. Active rectifier for medium voltage drive systems // Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2001. DOI: 10.1109/APEC.2001.911701.
- Маклаков А.С. Имитационное моделирование главного электропривода прокатной клетки толстолистового стана 5000 // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2014. №3. С. 16-25.
- Храмшин Т.Р., Крубцов Д.С., Корнилов Г.П. Математическая модель активного выпрямителя в несимметричных режимах работы // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. 2014. №2. С. 3-9.
- Алгоритм пространственно-векторной модуляции трехуровневого преобразователя / А.С. Маклаков, Е.А. Маклакова, Е.В. Антонова, М.А. Демов // Актуальные вопросы энергетики: материалы Всероссийской научной конференции студентов, магистрантов, аспирантов. 2016. С. 100-106.
- Николаев А.А., Анохин В.В., Урманова Ф.Ф. Разработка способа снижения коммутационных перенапряжений при наличии фильтров высших гармоник статического тиристорного компенсатора// Электротехника: сетевой электронный научный журнал. 2015. Т.2. №4. С.72-76.
- Николаев А.А., Корнилов Г.П., Денисевич А.С. Разработка усовершенствованной методики расчета параметров

- фильтрокомпенсирующих цепей статического тиристорного компенсатора электродуговой печи // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2018. Т. 18. №4. С. 89-100.
17. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Стандартинформ, 2014. 20 с.
 18. Azeddine Draon, Senior MIEEE A space vector modulation based three-level PWM Rectifier under Simple Sliding Mode Control Strategy // Energy and power Engineering, 2013. No 5. P. 28-35.
 19. Farhan Beg Space Vector Pulse Width Modulation Technique Based Design and Simulation of a Three-Phase Voltage Source Converter System // World Academy of Science, Engineering and Technology. 2014. No 9. P. 1304-1307.

Поступила в редакцию 17 июля 2020 г.

INFORMATION IN ENGLISH

IMPROVING THE STABILITY OF OPERATION OF ELECTRIC DRIVES ON THE BASIS OF FREQUENCY CONVERTERS WITH ACTIVE RECTIFIERS DURING THE EXTERNAL VOLTAGE DROPS AND PARALLEL OPERATION WITH ELECTRIC ARC FURNACE

Alexander A. Nikolaev

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

Alexander S. Denisevich

Graduate student, Department of Automated Electric Drive and Mechatronics, Nosov Magnitogorsk State University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: denisevich993@mail.ru.

Igor A. Lozhkin

Graduate student, Department of Automated Electric Drive and Mechatronics, Nosov Magnitogorsk State University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: i.lozhkin@magtu.ru.

Veronika A. Laptova

Bachelor degree student, Department of Automated Electric Drive and Mechatronics, Nosov Magnitogorsk State University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: nikalaptova@gmail.com.

The article is devoted to the comparative analysis of the effectiveness of the method of generating reactive current during the external voltage drops from the point of view of ensuring the stability of the main electric drives of rolling mills on the basis of three-level frequency converters with active rectifiers. Moreover, the article contains the result of the simulation of parallel operation of the frequency converter with active rectifiers and electric steelmaking complex at overvoltages caused by switching of filter-compensating circuits of the stationary thyristor compensator. These methods are proposed for increasing the stability of the operation of the inverter with active rectifiers when operating in parallel with an electric arc steel-making furnace (EAF) with additional voltage distortions caused by transient processes during switching of the stationary thyristor compensator and filter-compensating circuits. Modern electric drives of rolling mills are usually performed based on powerful synchronous motors and frequency converters consisting of active rectifiers and inverters. Unbalanced voltage drops that occur in the external power supply often lead to break-downs of the main electric drives, which lead to economic losses and defective products. Ensuring stable operation of rolling mills in such modes is an important task. The objects of study are hot rolling mill 1750 of the CJSC "MMK Metalurji". Mathematical models of frequency converters have been developed using by the Matlab-Simulink software for the PWM algorithm with the removal of the selected harmonics and an advanced system for diagnosing of voltage dips. The mathematical models have been used to study the operation of the active rectifier for normal operation mode and during voltage drops. Also on the basis of the mathematical model, the analysis of active rectifier input currents and DC-link voltage has been made. Studies have shown that active rectifier faults can occur by operation of input overcurrent protection or DC-link minimum voltage protection. The

comparative analysis results of working of FC-AR with the method of generating reactive current during the external voltage drops has been presented. In addition, the conclusions about influence of regulators parameters in AR control system on stability of working of FC-ARs for voltage drops situations have been made.

Keywords: active rectifier, frequency converter, pulse-width modulation, algorithms of the PWM, mathematical model, Matlab Simulink, voltage drops, electric drive stability, control system, rolling mill, static var compensator, filter compensating circuit, electric arc furnace.

REFERENCES

1. Khrumshin T.R., Kornilov G.P., Nikolaev A.A., Khrumshin R.R., Krutsov D.S. Research of Influence of High Power Active Rectifiers on Mains Supply. *Vestnik IGJeU* [Bulletin of ISPU], 2013, no.1, pp. 80-83. (In Russian)
2. Pupin V.M., Kuftin D.S., Safonov D.O. Analysis of voltage failures in the supply networks of enterprises and methods of protecting electrical equipment. *Elektrooborudovanie: ekspluatatsiya i remont*. [Electrical equipment: operation and repair], 2011, no. 4, pp. 35-41. (In Russian)
3. Ivanov V.I., ArtsishevskyYa. L. The method of forecasting the statistics of supply voltage failures in the sectional distribution networks of power supply. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Elektromekhanika* [Proceedings of Universities. Electromechanics], 2004, no. 6, pp. 18-22. (In Russian)
4. Shpiganovich A.N., Murov I.S. Voltage dips in the electrical systems of enterprises. *Natsionalnaya Assotsiatsiya Uchenykh* [National Association of Scientists], 2015, no. 2-4 (7), pp. 6-7. (In Russian)
5. Nikolaev A.A., Kornilov G.P., Ivekeev V.S., Lozhkin I.A., Kotyishev V.E. Using of the Static Var Compensator of the

- Ultra-High Power Electric Arc Furnace for Supporting of Electrical Power System Stability and Increasing Reliability of Factory Power Supply. *Mashinostroenie: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal* [Russian Internet Journal of Industrial Engineering], 2014, no.1, pp. 1-11. (In Russian)
6. Nikolaev A.A., Denisevich A.S., Lozhkin I.A., M.M. Investigation of voltage drops influence in the power supply system of the "MMK Metalurji" inworks on the main electric drives of the hot strip mill. *Elektrotekhnicheskiye sistemy i komplekсы* [Electrotechnical systems and complexes]. Magnitogorsk, Magnitogorsk State Technical University, 2015, no. 3 (28), pp. 8-14. (In Russian)
7. Nikolaev A.A., Denisevich A.S., Bulanov M.V. Investigation of parallel work of rolling mill automated electric drives and an electric arc furnace. *Vestnik IGEU* [Bulletin of Ivanovo State Power Engineering University], 2017, vol. 3, pp. 59-69. (In Russian)
8. Gasiyarov V.R., Radionov A.A., Maklakov A.S. Simulation of 3L NPC Converter with selective harmonic elimination PWM. *Elektrotekhnicheskiye sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2017, no. 1 (34), pp. 4-9. (In Russian)
9. Maklakov A.S., Radionov A.A., Study of SVPWM with various vector selection tables of three level converter. *Elektrotekhnika: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal* [Russian Internet Journal of Electrical Engineering], 2015, vol. 2, no. 1, pp. 30-37. (In Russian)
10. Nikolaev A.A., Denisevich A.S., Ivekeev V.S. Increase in stability of operation of frequency converters with active rectifiers at the commutations of electric equipment of an electric steel-smelting complex. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta* [Bulletin of Ivanovo State Power Engineering University], 2019, no. 5, pp. 48-58. (In Russian)
11. O'Brien K., Teichmann R., Bernet S. Active rectifier for medium voltage drive systems // Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2001. APEC. DOI: 10.1109/APEC.2001.911701.
12. Maklakov A.S. Simulation of the Main Electric Drive of the Mill Rolling Stand. *Mashinostroenie: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal* [Russian Internet Journal of Industrial Engineering], 2014, vol. 2, no. 3, pp. 16-25. (In Russian)
13. Khrumshin T.R., Krubtsov D.S., Kornilov G.P. Mathematical model of the active rectifier under unbalanced voltage operation conditions. *Elektrotekhnika: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal* [Russian Internet Journal of Electrical Engineering], 2014, vol. 1, no. 2, pp. 3-9. (In Russian)
14. Maklakov A.S., Maklakova E.A., Antonova E.V., Demov M.A. Space Vector Modulation algorithm of three-level Converter. *Aktualnye voprosy energetiki: materialy Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii studentov, magistrantov, aspirantov* [Topical issues of energy: materials of the all-Russian scientific conference of students, masters, postgraduate students], 2016, pp. 100-106. (In Russian)
15. Nikolaev A.A., Anokhin V.V., Urmanova F.F. Developing of new method of switching over voltage reduction in harmonic filters of static var compensator. *Elektrotekhnika: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal* [Russian Internet Journal of Electrical Engineering], 2015, vol.2, no. 4, pp. 72-76. (In Russian)
16. Nikolaev A.A., Kornilov G.P., Denisevich A.S. Developing of a new calculation method for harmonic filters parameters of arc furnace static var compensator. *Vestnik YuUrGU. Seriya «Energetika»* [Bullen of the South Ural State University. Power Engineering series], 2018, vol. 18, no. 4, pp. 89-100. (In Russian)
17. GOST 32144-2013. Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality limits in the public power supply systems. Moscow, Standartinform Publ., 2014. 20 p. (In Russian)
18. Azeddine Draon, Senior MIEEE A space vector modulation based three-level PWM Rectifier under Simple Sliding Mode Control Strateg. *Energy and power Engineering*, 2013, no. 5, pp. 28-35.
19. Farhan Beg Space Vector Pulse Width Modulation Technique Based Design and Simulation of a Three-Phase Voltage Source Converter System. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 2014, no. 9, pp. 1304-1307.

Повышение устойчивости преобразователей частоты с активными выпрямителями при провалах напряжения и параллельной работе с дуговой сталеплавильной печью / А.А. Николаев, А.С. Денисевич, И.А. Ложкин, В.А. Лаптова // *Электротехнические системы и комплексы*. 2020. № 3(48). С. 33-40. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-3\(48\)-33-40](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-3(48)-33-40)

Nikolaev A.A., Denisevich A.S., Lozhkin I.A., Laptova V.A. Improving the Stability of Operation of Electric Drives on the Basis of Frequency Converters with Active Rectifiers During the External Voltage Drops and Parallel Operation with Electric Arc Furnace. *Elektrotekhnicheskiye sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2020, no. 3(48), pp. 33-40. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-3\(48\)-33-40](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-3(48)-33-40)

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

УДК 621. 313.33.043.2.536

[https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-3\(48\)-41-51](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-3(48)-41-51)Бочкарев И.В.¹, Брякин И.В.², Храмшин В.Р.³, Сандыбаева А.Р.¹¹ Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова, г. Бишкек, Кыргызстан² Институт машиностроения и автоматики Национальной академии наук Кыргызской Республики, г. Бишкек, Кыргызстан³ Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

РАЗРАБОТКА СИСТЕМ ЗАЩИТЫ ОТ ПЕРЕГРЕВА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Проведен анализ известных методов и систем тепловой защиты электродвигателей. Показано, что наиболее перспективными из них являются методы, основанные на контроле активного сопротивления обмотки статора электродвигателя, величина которого однозначно определяется ее температурой. Однако такие методы требуют или ввод постоянного измерительного тока, или выделения указанных параметров алгоритмическим путем из рабочих переменных величин. Предложен новый способ тепловой защиты электродвигателей переменного тока. Способ основан на том, что изменение активной и/или реактивной составляющих импеданса обмотки вследствие изменения ее температуры вызывает соответствующее изменение угла между векторами фазных напряжений и токов. Это позволяет осуществлять тепловую защиту путем контроля изменения указанного угла. Разработан соответствующий вариант структурной блок-схемы устройства, реализующего предложенный способ тепловой защиты. Проведены экспериментальные исследования, результаты которых подтвердили работоспособность и эффективность предложенного технического решения.

Ключевые слова: электродвигатель переменного тока, тепловая модель, устройство плавного пуска, активное сопротивление обмотки статора, синхронный детектор, синфазная и квадратурная составляющие напряжения питания, разность фаз между векторами напряжения и тока.

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что основу подавляющего большинства современных электроприводов составляют электродвигатели переменного тока (ЭД), чаще всего асинхронные двигатели (АД) [1]. По статистике отказы ЭД чаще всего возникают вследствие теплового разрушения изоляции статора за счет перегрузок, повышения температуры окружающей среды, нарушения условий охлаждения и т.п. Это обусловлено тем, что нагрев изоляции приводит к изменению ее физического состояния: диэлектрик при повышении температуры становится менее твердым и тем самым более подвержен механическим повреждениям. Кроме того, при тепловом воздействии происходит высыхание изоляции, что приводит к трещинам и скалыванию изолирующего слоя и, соответственно, к электрическому пробое [2].

Очевидно, что выход из строя практически любого электродвигателя приводит к сбоям работы электропривода в целом. Следовательно, все приводные ЭД должны быть снабжены устройствами тепловой защиты, способной эффективно и достоверно отслеживать текущую температуру их обмоток и обеспечивать возможность интегрироваться в систему автоматического управления электроприводом.

ОБЗОР НАИБОЛЕЕ РАСПРОСТРАНЕННЫХ СИСТЕМ ТЕПЛОВОЙ ЗАЩИТЫ

В общем случае любая система тепловой защиты функционально содержит два основных узла:

- контрольно-измерительный узел, выходной сигнал которого характеризует текущую температуру обмотки;

- исполнительный узел, который обрабатывает сигнал, полученный из контрольно-измерительного узла, и с учетом введенной в него дополнительной информации, характеризующей предельно допустимый нагрев, осуществляет в случае недопустимого перегрева отключение электродвигателя от питания и/или осуществляет соответствующую сигнализацию.

При этом конструктивно при аппаратной реализации системы тепловой защиты эти два указанных функциональных узла могут быть объединены в один блок.

Практическая реализация исполнительного узла никаких затруднений не вызывает: он может, в общем случае, содержать электромеханический и логический блоки, причем электромеханический блок может быть выполнен, например, в виде узла релейной защиты на базе электромеханических или электронных реле и пускателей [3].

Очевидно, что основные проблемы при создании системы тепловой защиты заключаются в выполнении контрольно-измерительного узла, от достоверности и точности работы которого зависит корректность и надежность функционирования всей системы тепловой защиты ЭД в целом. Поэтому в данной статье основной упор сделан именно на этот основной узел системы тепловой защиты.

Контрольно-измерительный узел системы тепловой защиты может быть построен или на непосредственном измерении температуры, или на ее косвенном определении путем контроля определенных физических величин, определяющих нагрев обмотки. Соответственно, подходы к выполнению этого узла, используемые в настоящее время на практике при построении систем тепловой защиты, можно разделить на несколько групп:

- косвенные методы по величине тока статора;
- методы, основанные на использовании встроенных термодатчиков;
- методы, основанные на использовании тепловой модели машины;
- методы, основанные на оценке электрических параметров машины;
- гибридные методы, основанные на комбинированном использовании перечисленных методов.

Косвенные методы тепловой защиты, основанные на контроле величины тока статора, широко используются на практике в виде максимально-токовой защиты [4-6]. Очевидно, что при реализации таких методов непосредственное измерение температуры нагрева обмоток статора не осуществляется, следовательно, защита не сработает при существенных перегревах, например при затяжном пуске двигателя под нагрузкой. Кроме того, такой метод защиты не может учесть изменение температуры окружающей среды, а также условий охлаждения и теплообмена. Все это также не позволяет обеспечить надежную тепловую защиту АД.

Наиболее простыми способами тепловой защиты являются способы, базирующиеся на прямом измерении температуры с помощью термодатчиков, встроенных в обмотки машин [7]. Однако этот подход редко используется в электроприводах из-за целого ряда значительных недостатков, основным из которых является необходимость установки термодатчиков еще на этапе изготовления машины. При этом установка термодатчиков в небольшие машины чрезвычайно сложна и требует больших затрат. Значительным недостатком является также то, что термодатчики реагируют только на локальную температуру того места, где они расположены. Кроме того, наличие между датчиком и обмоткой изоляции, обладающей значительной тепловой инерционностью, не позволяет оперативно отключить машину при резком повышении нагрева обмотки. Таким образом, методы, основанные на использовании встроенных термодатчиков, надежную и достоверную тепловую защиту электрической машины, особенно в нестационарных и аварийных режимах работы, не обеспечивают.

Одним из методов определения температуры обмотки при создании ее тепловой защиты является использование тепловой модели электродвигателя (ТМЭД), которая позволяет производить алгоритмический расчет температур различных частей электродвигателя на базе контроля текущего значения тока с использованием конструктивных параметров машины [8, 9]. От структуры и сложности ТМЭД зависит точность расчета температуры, которая повышается при более точном учете тепловых связей всех элементов машины. Однако это вызывает необходимость детального знания всех собственных тепловых параметров, а также очень точного описания процессов нагрева-охлаждения, протекающих в машине, что весьма затрудняет реализацию расчета температуры в реальном времени. Поэтому на практике применяют ТМЭД уменьшенного порядка. Так, в [10] предлагается упрощенная тепловая модель АД, в которой для уменьшения порядка ТМЭД вместо использования сосредоточенной тепловой модели предложен подход на основе передаточной функции. Предложенная тепловая модель требует значительно меньшего количества тепло-

вых параметров для точного моделирования теплового поведения электрической машины переменного тока (ЭМПТ), сохраняя при этом приемлемую точность и достоверность контроля нагрева обмотки ЭМПТ, в целом достаточную для задач тепловой защиты машины, эксплуатируемой в заданных условиях работы. Однако упрощенные ТМЭД не позволяют произвести точную оценку температуры обмотки статора конкретного двигателя с учетом текущих условий его охлаждения, что особенно важно для АД, используемых, например, в неотапливаемых помещениях или на открытом воздухе. В [11] представлена гибридная тепловая модель для учета различий в тепловых рабочих условиях для разных двигателей одинакового номинала и одинаковой системой охлаждения. Посредством теоретического анализа и математического моделирования показана возможность теплового контроля двигателя при изменении условий охлаждения. В этой статье предлагается алгоритм настройки параметров в режиме онлайн, который адаптирует гибридную тепловую модель к изменениям тепловых режимов работы двигателя. Это позволяет обеспечить полную защиту от перегрузки.

Внедрение ТМЭД для тепловой защиты ЭМПТ в режиме реального времени весьма затруднено из-за отсутствия точной информации о фактических условиях работы и охлаждения машины, а определить параметры тепловой модели экспериментальным или расчетным путем очень сложно, причем для ЭМПТ, уже находящихся в эксплуатации, эта информация практически недоступна. Таким образом, массовое использование систем тепловой защиты с использованием ТМЭД больших производственных перспектив не имеет.

Как показал проведенный анализ литературы, в последнее время одними из наиболее перспективных являются методы теплового контроля и защиты, основанные на оценке электрических параметров машины, и в первую очередь, на контроле активного сопротивления обмотки статора R_C , величина которого однозначно определяется ее температурой. Это позволяет использовать непосредственно саму обмотку в качестве термодатчика и по величине изменения R_C вследствие нагрева обмотки определять ее среднюю температуру T по выражению

$$T = \frac{R_{CP} - R_{CH}}{\alpha R_{CH}} + T_X, \quad (1)$$

где R_{CP} – сопротивление в рабочем состоянии; R_{CH} – начальное сопротивление обмотки при известной температуре T_X ; α – температурный коэффициент электрического сопротивления, зависящий от материала обмотки.

Поэтому рассмотрим методы тепловой защиты, основанные на контроле сопротивления обмотки статора R_C , более детально. Наиболее просто величину R_C определять методом «вольтметра – амперметра» путем подачи на обмотку постоянного напряжения:

$$R_C = U_{OC} / I_{OC}, \quad (2)$$

где U_{OC} и I_{OC} – падение напряжения и ток обмотки статора.

При этом совершенно очевидно, что для обеспечения тепловой защиты контроль величины R_1 необходимо

осуществлять непосредственно во время работы АД. Для этого необходимо в цепь рабочего переменного тока ввести небольшой постоянный измерительный ток. В принципе это можно осуществить путем использования дополнительного постороннего источника постоянного тока. Такие способы показаны, например, в [12, 13]. Однако такой подход эффективен для устройств измерения температуры в лабораторных условиях при тепловых испытаниях электрооборудования переменного тока [14], а для задач тепловой защиты эти способы экономически не выгодны.

Возможность формирования постоянного тока из рабочего переменного тока впервые была предложена в [15], а применение такого способа в системе теплового контроля описано в [16] и показано на **рис. 1**.

Устройство имеет: 1 – термодатчик в виде обмотки ЭМ; 2 – блок ввода постоянного тока; 3 – измерительный шунт; 4 – блок измерения величины измерительного постоянного тока $I_{изм}$; 5 – блок измерения величины падения напряжения на термодатчике 2 от тока $I_{изм}$; 6 – вычислительный блок; 7 – пороговый элемент и 8 – исполнительный орган. Видно, что за счет неравенства сопротивлений для разных полуовн питающего напряжения в цепи будет присутствовать постоянный ток $I_{изм}$, величину которого можно регулировать путем изменения сопротивления резистора $R_{рег}$.

Блок 6 осуществляет расчет текущей температуры T обмотки на базе выражений (1) и (2) и если она превышает допустимую по условиям эксплуатации температуру $T_{доп}$, то пороговый элемент формирует выходной сигнал, который поступает на исполнительный орган 8, отключающий обмотку от цепи питания U_C . Основная трудность при практической реализации данного решения заключается в необходимости устранения влияния рабочего тока на измерительные цепи.

Вопросам формирования постоянного измерительного тока непосредственно из рабочего переменного тока в настоящее время посвящено большое количество работ. Так, в [17, 18] представлен обзор соответствующих современных методов тепловой защиты для двигателей переменного тока с линейным запуском, с плавным пуском и инверторным питанием. Эти активные методы тепловой защиты контролируют среднюю температуру статора посредством оценки сопротивления статора, используя только измерения напряжения и тока статора двигателя, и используют различные способы формирования измерительного постоянного напряжения. Рассмотрим основные из них.

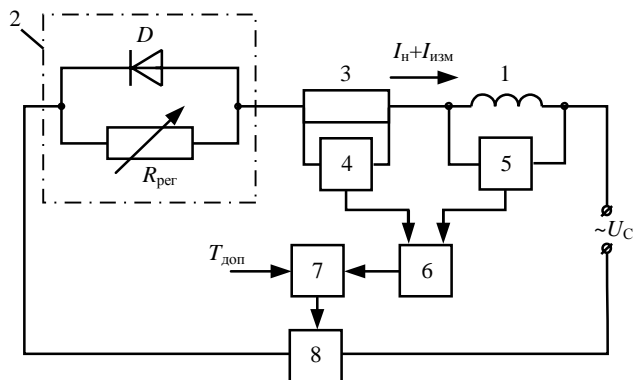


Рис. 1. Принципиальная блок-схема устройства тепловой защиты при формировании измерительного тока из рабочего переменного тока

В [19-21] показано, что ввод сигналов постоянного тока можно обеспечить путем использования полевого МОП-транзистора с изолированным затвором MOSFET и сопротивления R (**рис. 2**).

Эквивалентное сопротивление цепи ввода постоянного тока изменяют путем управления переключением MOSFET, когда ток течет в разных направлениях. Фактически подаваемое напряжение постоянного тока можно контролировать, регулируя сопротивление R в цепи ввода сигнала.

Контроль величины сопротивления обмотки статора АД, которые подключены к сети посредством устройства плавного пуска (Soft-Starter), описан в [22-25]. Постоянный измерительный ток вводится путем изменения угла задержки тириستоров Soft-Starter (**рис. 3**).

Уровень вводимого сигнала постоянного тока регулируется величиной угла задержки. Сигнал управления затвором устройства плавного пуска вызывает короткую задержку в полупериодическом цикле для одной фазы машины. Затем компоненты постоянного тока получают из анализа Фурье по току и напряжению. Используя величину сигналов постоянного тока, рассчитывают сопротивление и температуру обмотки статора. Для получения точной температуры обмотки статора полученные значения предлагается обрабатывать по специальной программе совместно с другими параметрами.

Тепловая защита электродвигателей с питанием от инвертора описана в [26-28]. В приводе двигателя с разомкнутым контуром напряжение постоянного тока периодически вводится в двигатель путем изменения пространственной векторной широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Для ввода измерительного сигнала предлагается модифицированная схема ШИМ пространственного вектора, которая позволяет автоматически вводить компоненты постоянного тока в дополнение к исходным силовым сигналам напряжения, изменяя переключение переключателей силовой электроники.

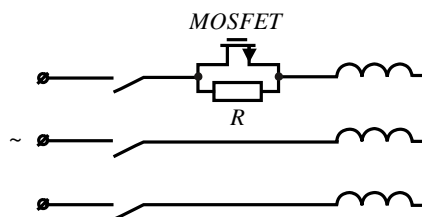


Рис. 2. Схема ввода измерительного постоянного тока путем использования полевого МОП-транзистора

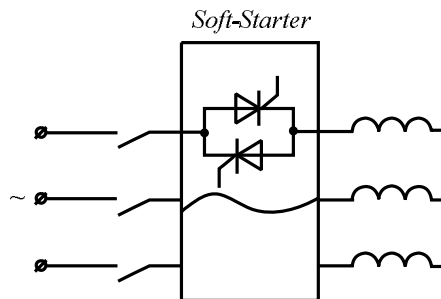


Рис. 3. Схема ввода измерительного постоянного тока при использовании в схеме управления АД устройства плавного пуска

Однако необходимо отметить, что ввод любым способом дополнительного измерительного постоянного тока в обмотку статора приводит к определенному изменению показателей ЭД. В частности, возникают пульсации крутящего момента и отрицательный крутящий момент, вызванный составляющей постоянного тока [19]. Поэтому требуется выполнить отделение компонентов постоянного тока от фазных токов и напряжений. Соответствующие методики представлены в [29, 30]. Кроме того, наличие постоянного тока изменяет условия нагрева машины. Для уменьшения дополнительного тепловыделения в электродвигателе за счет протекания постоянного измерительного тока можно, например, в схемах с использованием устройств плавного пуска, сигналы этого тока вводить с перерывами. Такие перерывы могут составлять около 3-5 минут, в зависимости от типа двигателя и условий его эксплуатации. Для этого после каждой подачи сигнала постоянного тока и, соответственно, процедуры контроля нагрева обмотки обмотка питается «чистым» переменным рабочим напряжением. Тепловая защита АД при этом практически не пострадает вследствие тепловой инерционности машины. Однако все указанные процедуры приводят к повышению сложности устройств тепловой защиты АД.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Как показал проведенный анализ, известные методы, основанные на измерении изменения величины активного сопротивления обмотки статора вследствие ее нагрева, не обеспечивают точного контроля температуры обмотки без нарушений нормальной работы машины. Очевидно, что оптимальным методом тепловой защиты является метод, не требующий ввода дополнительного измерительного постоянного тока. Один из возможных путей решения этой задачи описан в [31], где предложен способ оперативного контроля температуры, который базируется на измерении сопротивления обмоток ЭД переменного тока в рабочем режиме ЭД путем выделения соответствующих компонентов из фазных напряжений и токов при помощи синхронных детекторов [32, 33]. Для контроля величины активного сопротивления обмотки используются два независимых «асимметричных» измерительных канала, осуществляющих измерение активных составляющих тока и напряжения обмотки и последующее вычисление ее сопротивления. Для контроля тока в цепь обмотки 2 (рис. 4) вводится датчик тока в виде измерительного шунта 1 с эталонным активным сопротивлением.

Регистрирующие блоки 3 и 4 выполнены в виде амплитудных детекторов, а третий регистрирующий блок – в виде фазового детектора. Первый вычислительный блок 6 представляет собой аналоговый перемножитель сигналов, а второй вычислительный блок 7 – аналоговый делитель двух сигналов. Регистрирующий блок 3 на выходе формирует электрический сигнал, пропорциональный амплитудному значению тока в цепи. Блок 5 формирует электрический сигнал, пропорциональный $\cos\varphi$. В блоке 6 электрические сигналы с блоков 5 и 4 перемножаются, за счет чего на выходе формируется электрический сигнал, пропорциональный амплитудному значению активной составляющей падения напряжения на сопротивлении обмотки 2.

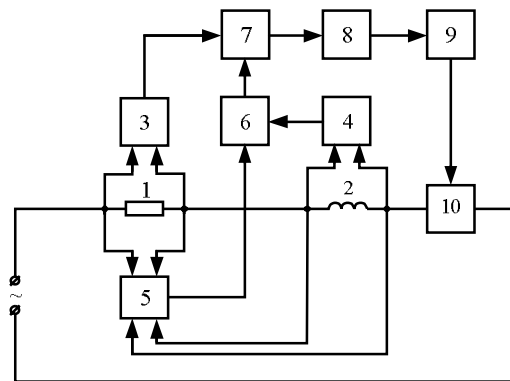


Рис. 4. Принципиальная блок-схема устройства тепловой защиты, реализующая процедуру извлечения компонентов постоянного тока из переменных фазных напряжений и токов: 1 – измерительный шунт; 2 – обмотка – термодатчик статора; 3, 4 и 5 – первый, второй и третий регистрирующие блоки; 6 и 7 – первый и второй вычислительные блоки; 8 – блок регистрации температуры обмотки; 9 – блок сравнения; 10 – исполнительный орган

Блок 7 осуществляет аналоговое вычисление текущей величины сопротивления обмотки 2 и, таким образом, с учетом (1) алгоритмическое определение ее температуры. Эта температура проходит в блоке 9 процедуру сравнения с допустимым значением нагрева и при необходимости подает сигнал на исполнительный орган 10.

Однако наличие шунта 1, включенного последовательно в силовую цепь обмотки 2, имеет ряд недостатков, основными из которых являются потери мощности в шунте, приводящие к его нагреву, а также наличие гальванической связи с рабочей цепью.

Таким образом, видно, что задача тепловой защиты ЭД в полном объеме не решена и требуется разработка новых принципов построения систем защиты без нарушения нормального режима работы.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В рассмотренных выше системах теплового контроля в качестве физической величины, характеризующей величину нагрева обмотки, использовалось ее активное сопротивление, численное значение которого однозначно определяет температуру обмотки в соответствии с выражением (1). Однако необходимость контроля величины активного сопротивления обмотки требует, в соответствии с выражением (2), измерения величины падения напряжения U_{OC} и тока I_{OC} обмотки статора, для чего необходим или ввод постоянного измерительного тока, или использование измерительного шунта с последующим выделением соответствующих параметров алгоритмическим путем из U_{OC} и тока I_{OC} . Это в значительной степени усложняет практическую реализацию такого подхода к контролю температуры, приводит к нарушению режима работы ЭД и тем самым снижает надежность работы всей системы в целом. С целью устранения указанных недостатков предлагается новый подход к построению систем оперативного контроля температуры, предназначенный для обеспечения тепловой защиты ЭД. В основу данного подхода были положены методы графической интерпретации и аналитического обобщения априорной информации о функциональных связях между измеряемыми величинами в виде соответствующих фазовых соотношений.

Согласно предлагаемому способу осуществляется косвенный способ контроля теплового состояния обмотки статора ЭД, основанный на результатах прямых измерений и последующем алгоритмическом вычислении физической величины, функционально связанной с искомой величиной, а именно разности фаз φ между векторами \dot{U} и \dot{I} , зависящей от величин активной r и реактивной x составляющих импеданса обмотки статора ЭД, численные значения которых зависят от нагрева этой обмотки. Обобщая, можно констатировать, что предлагаемый способ контроля фактически основан на следующем свойстве разности фаз φ между векторами \dot{U} и \dot{I} : $\varphi = f[r(T); x(T)] = F(T)$.

Рассмотрим в системном изложении обоснование сущности предлагаемого нового способа теплового контроля измерения составляющих полного сопротивления обмотки статора ЭД и особенности работы устройства для его реализации.

Схему включения ЭД в питающую электросеть можно представить в виде неразветвленной цепи синусоидального тока (рис. 5): 1 – источник питающего сетевого напряжения; 2 – обмотка статора ЭД; 3 – управляемое устройство коммутации; F_y – управляющий сигнал, подключающий или отключающий ЭД к источнику питающего сетевого напряжения.

Измеряя напряжение питания обмотки статора (ОС) ЭД и ток в цепи этой обмотки, можно определить импеданс ОС ЭД, воспользовавшись следующим выражением:

$$\dot{Z} = \frac{\dot{U}}{\dot{I}} = \frac{Ue^{j\psi_U}}{Ie^{j\psi_I}} = \frac{U}{I}e^{j\varphi} = Ze^{j\varphi} = r + jx, \quad (3)$$

где \dot{U} и \dot{I} – комплексные действующие значения напряжения и тока в цепи обмотки; ψ_U – угол между вектором \dot{U} и вещественной осью на комплексной плоскости; ψ_I – угол между вектором \dot{I} и вещественной осью на комплексной плоскости; $\varphi = \psi_U - \psi_I$ – угол (разность фаз) между векторами \dot{U} и \dot{I} ; r – активная составляющая импеданса ОС ЭД; $x = \omega \cdot L$ – реактивная составляющая импеданса ОС ЭД; ω – циклическая частота напряжения питания ОС ЭД; $L = F(\mu, \{Q_i\})$ – индуктивность ОС ЭД; μ – магнитная проницаемость материала статора ЭД; $\{Q_i\}$ – набор конструктивных параметров ОС и самого статора ЭД.

Для анализа особенностей физических процессов, происходящих в рассматриваемой электрической цепи, построим соответствующую векторную диаграмму напряжений на комплексной плоскости (рис. 6).

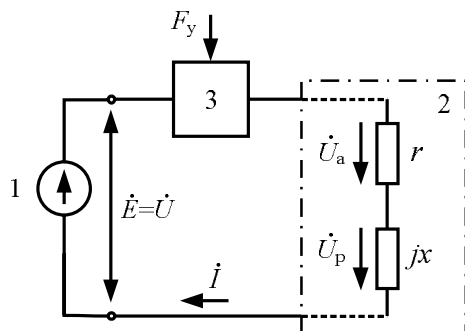


Рис. 5. Обобщенная блок-схема включения ЭД

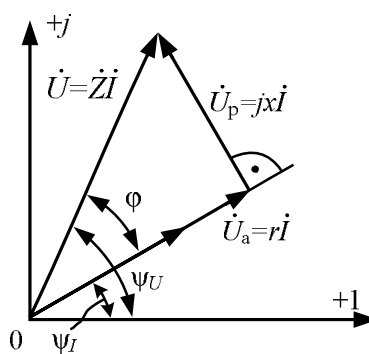


Рис. 6. Векторная диаграмма напряжений

В соответствии с (3) и рис. 2 можем записать следующее уравнение цепи:

$$\dot{U} = \dot{I}\dot{Z} = \dot{I}r + j\dot{I}x = \dot{U}_a + \dot{U}_p, \quad (4)$$

где $\dot{U}_a = \dot{I}r$ – напряжение на внутреннем активном сопротивлении ОС ЭД; $\dot{U}_p = j\dot{I}x$ – напряжение на внутреннем реактивном сопротивлении ОС ЭД.

Совместим вектор тока электрической цепи с вещественной осью координат на комплексной плоскости (рис. 7).

Из анализа выражения (4) и рис. 7 следует, что при совмещении вектора тока \dot{I} с вещественной осью координат комплексной плоскости вектор \dot{U} напряжения питания условно можно разложить по отношению к фазе тока \dot{I} на синфазную (вещественную) \dot{U}_C и квадратурную (мнимую) \dot{U}_K составляющие:

$$\begin{aligned} \dot{U} &= U \cos \varphi + jU \sin \varphi = Ir + jIx = \\ &= U_C + jU_K, \end{aligned} \quad (5)$$

причем $U_a = U_C$; $U_p = jU_K$.

Следует отметить, что удельное сопротивление материала ОС является функцией температуры и в линейном приближении определяется зависимостью вида

$$\rho = \rho_0 [1 + \alpha_\rho (T - T_0)], \quad (6)$$

где ρ_0 и α_ρ – удельное сопротивление и температурный коэффициент удельного сопротивления, отнесенные к началу температурного диапазона T_0 ; ρ – удельное сопротивление при температуре T .

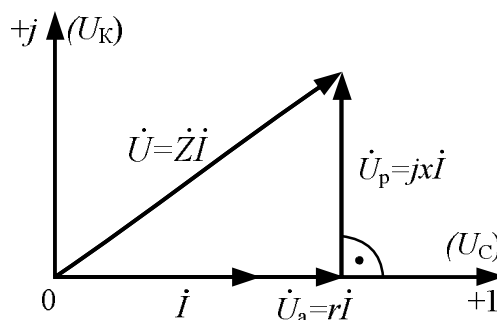


Рис. 7. Трансформированная векторная диаграмма напряжений

В свою очередь, известно, что для индуктивности L ОС одним из параметров, зависящим от температуры, является μ , для которого существует следующая зависимость:

$$\mu = \mu_0 \left[1 + \frac{\alpha_\mu}{T - T_0} \right], \quad (7)$$

где μ_0 и α_μ – магнитная проницаемость и температурный коэффициент магнитной проницаемости, отнесенные к началу температурного диапазона T_0 ; μ – магнитная проницаемость при температуре T .

Важным является тот факт, что из выражений (4) и (5) следует факт наличия разнонаправленных трендов в изменениях r и x при воздействии на эти параметры колебаний температуры.

В соответствии с выражением (5) и сделанными выше замечаниями можно сделать вывод о том, что любое изменение активной r или реактивной x составляющей импеданса ОС ЭД при изменении температуры ОС ЭД вызовет соответствующее изменение угла φ между векторами \dot{U} и \dot{I} на комплексной плоскости.

Иными словами, между углом φ и температурой T ОС ЭД существует явная функциональная зависимость, определяемая соотношением между x и r :

$$\varphi = \arctg \frac{x}{r} = \arctg \frac{U_{\kappa}}{U_c} = F(T). \quad (8)$$

При изменении температуры T конец вектора \dot{U} будет перемещаться на комплексной плоскости по окружности радиусом $R = U = \text{const}$ с центром в точке 0 и занимать положение, соответствующее отношению U_{\Re}/U_{\Im} . Причем наличие в изменениях r и x под воздействием температуры разнонаправленных трендов обеспечит в соответствии с (6) существенные изменения φ .

Из выражений (5) и (8) видно, что для решения поставленной задачи, т.е. для контроля температуры ОС ЭД, достаточно регистрировать состояние разности фаз φ между векторами \vec{U} и \vec{I} . Используя синхронизацию обработки сигналов по фазе тока в неразветвленной цепи, можно аппаратными средствами регистрировать действующие значения квадратурной U_k и синфазной U_c составляющих напряжения питания \vec{U} , а значит, и определить текущее значение $\varphi_i = F(T_i)$ с целью обеспечения тепловой защиты ЭД. Фактически речь идет о возможности реализации нового фазового метода контроля температуры ОС ЭД.

Для осуществления рассматриваемого метода контроля температуры ОС ЭД предлагается соответствующий вариант структурной блок-схемы устройства тепловой защиты ЭД (**рис. 8**): 1 – источник питания ОС ЭД; 2 – ОС ЭД, используемая в качестве термодатчика; 3 – устройство коммутации ОС ЭД; 4 – измерительный трансформатор тока (ИТТ); 5 – преобразователь тока в напряжение; 6 – аттенуатор-регистратор; 7 – фазовращатель; 8 – формирователь квадратурных опорных напряжений; 9 и 10 – синхронные детекторы соответственно синфазной и квадратурной составляющих напряжения питания ОС ЭД; 11 – логотриггерный преобразователь с цифровым выходом; 12 – цифровой компаратор; 13 – блок задания уровня компарации; 14 – формирователь управляющего сигнала.

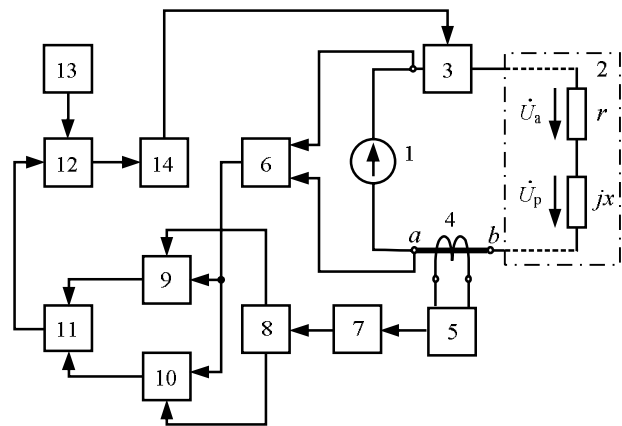


Рис. 8. Блок-схема устройства для тепловой защиты ЭД

Рассмотрим особенности функционирования предлагаемого устройства тепловой защиты ЭД. В исходную неразветвленную цепь синусоидального тока (см. **рис. 5**) в качестве датчика электрического тока добавлен ИТТ, измерительная шина которого через соответствующие контактные разъемы *a* и *b* замыкает электрическую цепь (см. **рис. 8**).

При включении устройства коммутации 3 под действием синусоидального напряжения питания $u = U_m \sin(\omega t + \psi_U)$, с соответствующим комплексным значением напряжения $\dot{U} = U e^{j\psi_U}$, в замкнутой электрической цепи возникает электрический ток $i = i_m \sin(\omega t + \psi_I)$, с соответствующим комплексным значением тока $\dot{I} = I e^{j\psi_I}$.

Измерительной обмоткой ИТТ регистрируется ток $\dot{I}^* = K_{\text{ИТТ}} \dot{I}$, который посредством блока 5 преобразуется в напряжение

$$\dot{U}^* = M^* \dot{I}^* = M^* K_{TT} \dot{I}, \quad (9)$$

где K_{TT} – коэффициент трансформации ИТТ; M^* – размерный коэффициент.

Посредством фазовращателя 7 векторная исходная диаграмма напряжений (см. **рис. 6**) трансформируется в рабочую векторную диаграмму напряжений (см. **рис. 7**) и корректируется фазовая погрешность предыдущих преобразований регистрируемого сигнала. После чего блоком 8 из скорректированного входного сигнала \dot{U}^* формируются соответствующие квадратурные опорные напряжения для синхронных детекторов:

$u_{OC} = U_{mOC} \cos(\omega t + \psi_0)$ – синфазное опорное напряжение;

$$u_{OK} = U_{mOK} \sin(\omega t + \psi_0) \quad - \text{квadrатурное опорное напряжение,}$$

где ψ_0 – фаза опорных напряжений, синхронизированная с фазой ψ , тока электрической цепи.

Для трансформированных координат комплексной плоскости можем записать:

$$\dot{U}=Ue^{j\varphi}; \quad \dot{I}=I. \quad (10)$$

Фактически синхронные детекторы 9 и 10 являются когерентными преобразователями, осуществляющими операции перемножения входного информационного сигнала с входным опорным напряжением с последующей низкочастотной фильтрацией полученного после перемножения сигнала.

В соответствии с (10) блок 6 масштабирует питающее сетевое напряжение $u = U_m \sin(\omega t + \varphi)$ до уровня

$u^* = K_M U_m \sin(\omega t + \varphi)$, которое затем подается на информационные входы синхронных детекторов 9 и 10, где и происходит его необходимое преобразование, в результате которого на выходе синхронных детекторов 9 и 10 получаем следующие соответствующие сигналы:

$$\begin{aligned} U_C &= K_{сд} K_M U_m \cos(\psi_0 - \varphi); \\ U_K &= K_{кд} K_M U_m \sin(\psi_0 - \varphi), \end{aligned} \quad (11)$$

где U_C и U_K – соответственно синфазная и квадратурная составляющие напряжения питания; $K_{сд}$ и $K_{кд}$ – коэффициенты преобразования соответственно синхронного детектора 9 и синхронного детектора 10; K_M – коэффициент масштабирования блока 6.

Блок 11 осуществляется преобразование входных сигналов U_C и U_K путем вычислительной процедуры в соответствии с выражением

$$\Theta(\varphi) = \arctg \frac{U_K}{U_C}. \quad (12)$$

Кроме того, блоком 11 дополнительно осуществляется операция аналого-цифрового преобразования $\Theta(\varphi)$:

$$\Phi: [\Theta(\varphi)] \rightarrow \Theta_{ц}(n/f_d), \quad (13)$$

где Φ – оператор аналого-цифрового преобразования; n/f_d – функция дискретного времени, f_d – частота дискретизации сигнала, $n=0, 1, 2, \dots$.

С выхода блока 11 цифровой сигнал $\Theta_{ц}(n/f_d)=F(T)$ поступает на блок 12, который сравнивает $\Theta_{ц}(n/f_d)=F(T)$ с заданным эталонным значением $\Theta_{ц}^*(n/f_d)=F^*(T)$, выдаваемым блоком 13.

По результатам операции сравнения блоком 12 вырабатывается бинарный D -сигнал уровня логического 0 или 1, исходя из следующих условий:

$$D = \begin{cases} 1, & \text{при } \Theta_{ц}(n/f_d) \geq \Theta_{ц}^*(n/f_d); \\ 0, & \text{при } \Theta_{ц}(n/f_d) < \Theta_{ц}^*(n/f_d). \end{cases} \quad (15)$$

В дальнейшем сигнал D поступает на вход блока 14, который в зависимости от состояния сигнала D формирует необходимый управляющий сигнал для устройства коммутации 3.

При критической ситуации, когда уровень выходного сигнала блока 12 $D=1$, т.е. температура перегрева ЭД T превышает допустимое значение T^* , блок 3 отключает ОС ЭД от источника сетевого напряжения, предотвращая тем самым аварийную ситуацию на эксплуатируемом электротехническом оборудовании.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА РАЗРАБОТАННОГО УСТРОЙСТВА

Эксперименты проводились с использованием двух одинаковых асинхронных ЭД типа 4А63В4 мощностью 0,37 кВт. При этом показатели одного из (базового) принимались в качестве критерия оценки точности результатов, полученных на втором ЭД (испытуемом). Питание обоих электродвигателей осуществлялось от сети переменного напряжения 380 В. Все измерительные процедуры выполнялись при холостом ходе в режиме S1 при установившемся тепловом режиме.

Для проведения экспериментальных исследований был разработан специализированный испытательный стенд, структурная блок-схема которого представлена на **рис. 9**: 1 – испытательная камера; 2 – регулируемый калорифер; 3 – базовый ЭД; 4 – испытуемый ЭД; 5 – силовой выключатель; 6 – устройство для тепловой защиты ЭД, реализующее новый фазовый метод контроля температуры ОС ЭД; 7 – система сбора данных Е502 производства «ЛКард», 8 – малогабаритный электронный термометр (МЭТ) с выносным цифровым термодатчиком 9; 10 – персональный компьютер (ПК).

Регулировкой калорифера 3 задавались различные температурные режимы среды в испытательной камере 1 с находящимися на нем ЭД 3 и 4, для которых осуществлялись измерения температуры их ОС посредством соответственно МЭТ и устройства для тепловой защиты ЭД 6. Полученные по результатам этих измерений данные регистрировались ПК 10 с соответствующим аппаратно-программным интерфейсом и сравнивались между собой, после чего проводился окончательный анализ результатов экспериментальных исследований.

В качестве измерителя температуры использовался специально разработанный для этой цели малогабаритный электронный термометр (МЭТ) 8 с выносным цифровым термодатчиком 9, подключенный к USB-порту персонального компьютера (ПК) (**рис. 10**).

Особенность данного МЭТ заключается в том, что его работой управляет микроконтроллер (МК) PIC18F14K50, имеющий встроенный модуль USB, а в качестве чувствительного термоэлемента используется цифровой датчик (ЦД) LM75AD, подключаемый к МК посредством экранированной витой пары длиной 5 м ($Z=90$ Ом). В МЭТ также предусмотрена световая индикация контроля его рабочего режима посредством соответствующего светодиода.

Для обеспечения нормального функционирования МЭТ в ПК устанавливался соответствующий программный драйвер, создающий виртуальный COM-порт с определенным режимом работы: восемь информационных разрядов без контроля четности и один стоповый, а также автоматическое определение скорости обмена информацией.

По умолчанию опрос МК осуществлялся каждые 5 с, а в режиме «по запросу компьютера» ввод информации производится не чаще одного раза в секунду. Для компенсации систематической погрешности в программе предусмотрена возможность ввода и изменения необходимой поправки, позволяющей увеличивать или уменьшать показания МЭТ с шагом 0,1°C.

Контактным методом измерялась температура выступающих лобовых частей ОС базового ЭД посредством специальным образом закрепленного на них ЦД.

В процессе эксплуатации МЭТ показал достаточно высокие точностные параметры: погрешность измерений в пределах всего рабочего диапазона температур 10...+125°C не превышала 1°C.

Система сбора данных Е502 производства «ЛКард», посредством которой обеспечивалось совместное функционирование ПК с устройством для тепловой защиты ЭД, представляет собой универсальный 16-битный модуль ввода/вывода до 32 аналоговых и 17 цифровых сигналов в персональный компьютер через интерфейсы USB 2.0 (high-speed) и Ethernet (100 Мбит) с частотой преобразования до 2 МГц и возможностью их цифровой обработки в реальном времени.

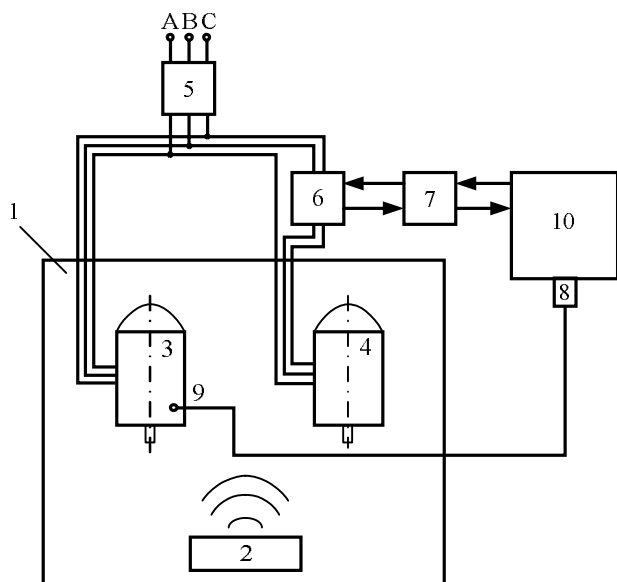


Рис. 9. Блок-схема испытательного стенда

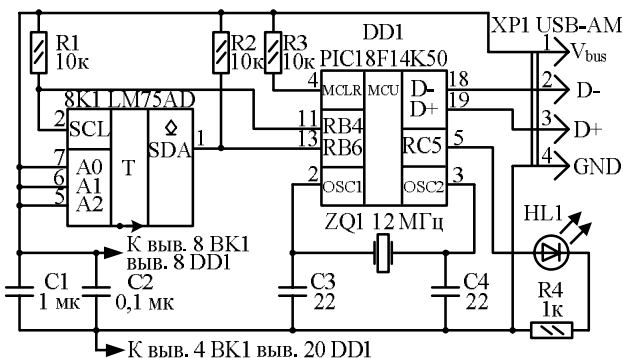


Рис. 10. Принципиальная электрическая схема МЭТ

ПК посредством системы сбора данных 7 фактически осуществлял развертывающее сканирование результата измерения блоком 6 фазы φ между параметрами \dot{U} и \dot{I} путем формирования последовательного перебора возможных значений этой фазы. В случае совпадения результата измерения блоком 6 и задаваемого ПК текущего цифрового значения фазы происходило фиксирование данного значения, по которому и определялась температура в соответствии с градуировочной характеристикой $\varphi=F(T)$.

Следует отметить, что значения всех необходимых коэффициентов и вариант градуировочной характеристики $\varphi=F(T)$ определялись на стадии предварительной калибровки измерительных каналов устройства для тепловой защиты ЭД и размещались в памяти ПК для последующего использования в процессе проведения экспериментальных исследований.

Результаты экспериментальных исследований представлены на рис. 11. На рисунке обозначены $T_{\text{УТЗ}}$ – температура ОС ЭД, регистрируемая устройством тепловой защиты ЭД; $T_{\text{МЭТ}}$ – температура, измеренная малогабаритным электронным термометром; 1 – график, представляющий результаты измерений температуры ОС базового ЭД посредством МЭТ; 2' и 2'' – графики, отражающие результаты многократных измерений температуры ОС испытуемого ЭД устройством тепловой защиты ЭД; $2\Delta_i$ – диапазон разброса значений температуры ОС испытуемого ЭД, измеренной устройством тепловой защиты ЭД.

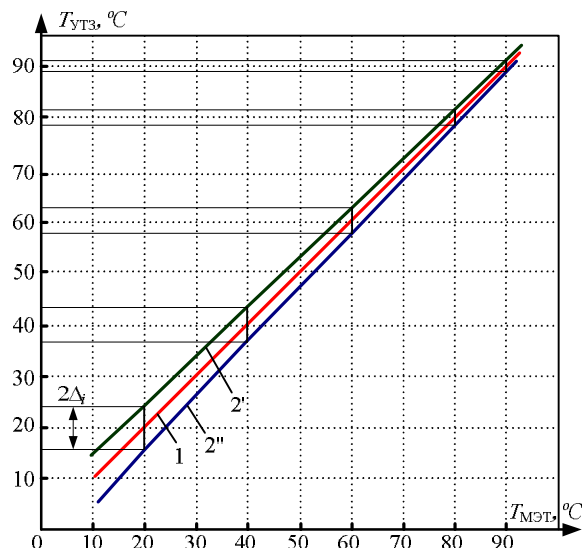


Рис. 11. Результаты экспериментальных исследований фазового метода контроля

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ графической интерпретации результатов экспериментальных исследований показывает, что предлагаемый новый фазовый метод контроля температуры ОС ЭД имеет возможность конкретной технической реализации и обеспечивает вполне приемлемую точность измерений температуры ОС ЭД в требуемом диапазоне ее изменений (5-3% в диапазоне 10-125°C).

В заключение следует отметить, что предложенный способ тепловой защиты может быть применен не только для ЭД, но и для защиты любого другого электрооборудования переменного тока, например генераторов, трансформаторов, реакторов, электромагнитов и т.п.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кисаримов Р.А. Электропривод: справочник. М.: РадиоСофт, 2012. 352 с.
2. Контроль состояния изоляции электрических машин в эксплуатации / Г.А. Безчастнов, А.М. Красильников, Т.М. Нэмени, Ю.А. Филиппов. М.: Энергопрогресс, 2001. 64 с.
3. Hewitson L., Brown M., Balakrishnan R. Practical power systems protection. Newnes, 2005. 289 p.
4. McCleer P.J. The Theory and Practice of Overcurrent Protection. Mechanical Products in Jackson, Mich., 1987. 233 p.
5. Paithankar Y.G., Bhide S.R. Fundamentals of Power System Protection. Prentice-Hall of India Pvt.Ltd 2004. 301 p.
6. Юндин М.А. Токовая защита электроустановок. СПб.: Изд-во «Лань», 2011. 288 с.
7. Гордов А.Н., Жагулло О.М., Иванова А.Г. Основы температурных измерений. М.: Энергоатомиздат, 1992. 303 с.
8. Zhi Gao. Sensorless stator winding temperature estimation for induction machines. Georgia Institute of Technology, 2006. 204 p.
9. Макаров А.В., Вечеркин М.В., Завьялов А.С. Обзор тепловых моделей асинхронных двигателей // Электротехнические системы и комплексы. 2013. № 21. С. 75-84.
10. Gao Zhi, Habetler T.G., Harley R.A. An Online Adaptive Stator Winding Temperature Estimator Based on a Hybrid Thermal Model for Induction Machines. IEEE International Conference on Electric Machines and Drives, 2005, pp. 754-761.
11. Zhang P., Du Y., Habetler T. G. A transfer function-based thermal model reduction study for induction machine thermal overload protective relays. IEEE Transactions on Industry Applications, 2009, vol. 46, Issue 5, pp. 1919-1926.

12. Бочкарев И.В., Ашмарин А.В. Устройство для измерения температуры обмотки электрической машины переменного тока под нагрузкой: а.с. 1108337 SU, МКИ G01K7/16, G01R27/08, заявл. 23.11.81; опубл. 15.08.84, Бюл. № 30.
13. Albla A.A.H., Brkovic B.M., Ječmenica M.M., Lazarevic Z.M. Online temperature monitoring of a grid connected induction motor. *Engineering*, 2017, p. 276-282.
14. Bochkarev I.V. Measuring the winding temperature of AC machines under load. *Russian Electric Engineering*. New York, Allerton Press, Inc. 1999, vol. 70, no. 2, pp. 28-32.
15. Бочкарев И.В., Ашмарин А.В. Устройство для измерения температуры обмотки электрической машины: а. с. 998873 SU, МКИ G01K7/16, заявл. 15.09.81; опубл. 23.02.83, Бюл. № 7.
16. Бочкарев И.В., Ашмарин А.В. Устройство для тепловой защиты электрической машины: а.с. SU № 1187234. МКИ H02H5/04, H02H7/08. Заявлено 23.04.83, опубл. 23.10.1985, Бюл. № 39.
17. Zhang P., Lu B., Habetler T.G. Active stator winding thermal protection for AC motors. *Conference Record of 2009 Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference* 2009, pp. 11-19.
18. Zhang P. Active thermal protection for induction motors fed by motor control devices. *Georgia Institute of Technology*, 2010. 202 p.
19. Lee S.B., Habetler T.G. An On-line Stator Winding Resistance Estimation Technique for Temperature Monitoring of Line-connected Induction Machines. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2003, vol. 39, no. 3, pp. 685-694.
20. Aalabaf Sabaghi M., Feshki Farahani H., Hafezi H.R., Kiani P., Jalilian A. Stator winding resistance estimation for temperature monitoring of induction motor under unbalance supplying by DC injection method. *Engineering* 2007, 42nd International Universities Power Engineering Conference 2007, pp. 217-222.
21. Sabaghi M., Farahani H. F. Monitoring of induction motor temperature under unbalanced supplying by stator resistance estimation. *Indian Journal of Science and Technology*, 2012, vol. 5, no 3, pp. 2354-2359.
22. Enany T. A., Wahba W. I., Hassan M. A Remote and Sensorless Stator Winding Temperature Estimation Method for Thermal Protection for Induction Motor. *Engineering, Computer Science IJSDA*. 2014, vol. 3, pp. 53-72.
23. Zhang P., Lu B., Habetler T. G. A Remote and Sensorless Stator Winding Resistance Estimation Method for Thermal Protection of Soft-Starter-Connected Induction Machines. *Computer Science, Engineering. IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2008, vol. 55, no.10, pp. 3611-3618.
24. Zhang P., Du Y., Lu B., Habetler T. G. A DC Signal Injection-Based Thermal Protection Scheme for Soft-Starter-Connected Induction Motors. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2009, vol. 45, pp. 1351-1358.
25. Enany T.A., Hassan M., Othman E.S. Induction motor temperature monitoring via signal injection enhanced with adaptive neuro-fuzzy inference system. *Engineering*, 2017, pp. 91-109.
26. Zhang P., Lu B., Habetler T.G. An active stator temperature estimation technique for thermal protection of inverter-fed induction motors with considerations of impaired cooling detection. *IEEE International Electric Machines and Drives Conference*, 2009, 9 p.
27. Matic P.R., Gecic M. A., Lekić Đ., Marcetic D.P. Thermal Protection of Vector-Controlled IM Drive Based on DC Current Injection. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 2015, vol. 62, Issue 4, pp. 2082-2089.
28. Tshimanga T.P., Bezabih E., Iyer V.R., Zhang S., He L., Harley R.G. Stator temperature estimation of open-loop controlled induction machines via active DC voltage injection. *North American Power Symposium (NAPS)*, 2015.
29. Baneira F., Asiminoaei L., Doval-Gandoy J., Delpino H.A.M., Yepes A. G. G., Godbersen J. Estimation Method of Stator Winding Resistance for Induction Motor Drives Based on DC-Signal Injection Suitable for Low Inertia. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2019, vol. 34, pp. 5646-5654.
30. Yoo J., Lee J.-H., Sul S.-K., Baloch N. A. Stator Resistance Estimation Using DC Injection With Reduced Torque Ripple in Induction Motor Sensorless Drives. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2020.
31. Контроль температуры обмоток и защита от перегрева электрических машин переменного тока / И.В. Брякин, И.В. Бочкарев, Х.Г. Багиев, К.К. Келебаев. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2019. Т. 19. №1. С. 75-84.
32. Брякин И.В., Бочкарев И.В., Келебаев К.К. Диагностика параметров электрических машин переменного тока // Электротехнические системы и комплексы. 2017. №4(37). С. 38-44.
33. Брякин И.В., Бочкарев И.В. Способ измерения составляющих полного сопротивления и устройство для его реализации: пат. RU 2691624. Опубл. 17.06.2019. Бюл. № 17.

Поступила в редакцию 10 июля 2020 г.

INFORMATION IN ENGLISH

DEVELOPMENT OF PROTECTION SYSTEMS AGAINST OVERHEATING OF AC ELECTRIC MOTORS

Igor V. Bochkarev

D.Sc. (Engineering), Professor, Department of Electromechanics, Power Engineering Faculty, Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov, Bishkek, the Kyrgyz Republic. E-mail: elmech@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9873-9203>

Ivan V. Bryakin

D.Sc. (Engineering), Senior Researcher, Chief of the Laboratory of information and measuring systems, Institute of Mechanical Engineering and Automation, National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic, Bishkek, the Kyrgyz Republic. E-mail: bivas2006@yandex.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7463-8072>

Vadim R. Khrumshin

D.Sc. (Engineering), Professor, Department of Industrial Electric Power Supply, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: hvrnmg@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0972-2803>

Aida R. Sandybaeva

Assistant Professor, Department of Electromechanics, Power Engineering Faculty, Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov, Bishkek, the Kyrgyz Republic. E-mail: aida.kgtu@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1097-0989>

The analysis of common methods and systems of thermal protection of electric motors is carried out. It is shown that the most promising of them are the methods based on monitoring the active resistance of the stator winding of an electric motor, the value of which is uniquely determined by its temperature. However, such methods require either the input of a constant measuring current, or the selection of the indicated parameters by an algorithmic way from the operating variables. A new method of thermal protection of AC electric motors is proposed. The method is based on the fact that a change in the active and / or reactive components of the impedance of the winding due to a change in its temperature causes a corresponding change in the angle between the vectors of phase voltages and currents. This provides thermal protection by controlling the change in the specified angle. The corresponding version of the structural block diagram of the device that implements the proposed method of thermal protection has been developed. Experimental studies have been carried out, the results of which have confirmed the efficiency and effectiveness of the proposed technical solution.

Keywords: AC motor, thermal model, soft start device, active resistance of the stator winding, synchronous detector, in-phase and quadrature components of the supply voltage, phase difference between voltage and current vectors.

REFERENCES

- Kisarimov R.A. *Elektroprivod: Spravochnik* [Electric drive: Handbook]. Moscow: RadioSoft, 2012. 352 p. (In Russian)
- Bezchastnov G.A., Krasilnikov A.M., Nemeny T.M., Filipov Yu.A. *Kontrol sostoyaniya izolyatsii elektricheskikh mashin v ekspluatatsii* [Insulation monitoring of electrical machines in operation]. Moscow: Energoprogress, 2001. 64 p. (In Russian)
- Hewitson L., Brown M., Balakrishnan R. Practical power systems protection. Newnes, 2005. 289 p.
- McCleer P.J. The Theory and Practice of Overcurrent Protection. Mechanical Products in Jackson, Mich. 1987. 233 p.
- Paithankar Y. G., Bhide S. R. Fundamentals of Power System Protection. Prentice-Hall of India Pvt. Ltd 2004. 301 p.
- Yundin M.A. *Tokovaya zashchita elektroustanovok* [Current protection of electrical installations]. St. Petersburg: Publishing house "Lan", 2011. 288 p. (In Russian)
- Gordov A.N., Zhagullo O.M., Ivanova A.G. *Osnovy temperaturnykh izmereniy* [Basics of temperature measurements]. Moscow: Energoatomizdat, 1992. 303 p. (In Russian)
- Zhi Gao. Sensorless stator winding temperature estimation for induction machines. Georgia Institute of Technology. 2006. 204 p.
- Makarov A.V., Vecherkin M.V., Zavyalov A.S. Review of thermal models of induction motors. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical systems and complexes], 2013, no. 21, pp. 75-84. (In Russian)
- Gao Zhi, Habetler T. G., Harley R. A. An Online Adaptive Stator Winding Temperature Estimator Based on a Hybrid Thermal Model for Induction Machines. IEEE International Conference on Electric Machines and Drives, 2005, pp. 754-761.
- Zhang P., Du Y., Habetler T. G. A transfer function-based thermal model reduction study for induction machine thermal overload protective relays. IEEE Transactions on Industry Applications, 2009, vol. 46, Issue 5, pp. 1919-1926.
- Bochkarev I.V., Ashmarin A.V. A device for measuring the temperature of the winding of an alternating current electric machine under load. 1108337 SU, MKI G01K7 / 16, G01R27 / 08, app. 11/23/81; publ. 08/15/84, Bul. No. 30. (In Russian)
- Albla A. A. H., Brkovic B. M., Ječmenica M. M., Lazarevic Z. M. Online temperature monitoring of a grid connected induction motor. Engineering, 2017, p. 276-282.
- Bochkarev I.V. Measuring the winding temperature of AC machines under load. Russian Electric Engineering. New York, Allerton Press, Inc. 1999, vol. 70, no. 2, pp. 28-32.
- Bochkarev I.V., Ashmarin A.V. Device for measuring the temperature of the winding of an electric machine / A. s. 998873 SU, MKI G01K7 / 16, app. 09/15/81; publ. 02/23/83, Bul. No. 7. (In Russian)
- Bochkarev I.V., Ashmarin A.V. Device for thermal protection of an electrical machine / A.S. SU No. 1187234. MKI H02H5 / 04, H02H7 / 08. Stated 04/23/83, published 10/23/1985, Bull. No. 39. (In Russian)
- Zhang P., Lu B., Habetler T. G. Active stator winding thermal protection for AC motors. Conference Record of 2009 Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference 2009, pp. 11-19.
- Zhang P. Active thermal protection for induction motors fed by motor control devices. Georgia Institute of Technology, 2010. 202 p.
- Lee S.B., Habetler T.G. An On-line Stator Winding Resistance Estimation Technique for Temperature Monitoring of Line-connected Induction Machines. IEEE Transactions on Industry Applications, 2003, vol. 39, no. 3, pp. 685-694.
- AalabafSabaghi M., Feshki Farahani H., Hafezi H.R., Kiani P., Jalilian A. Stator winding resistance estimation for temperature monitoring of induction motor under unbalance supplying by DC injection method. Engineering 2007, 42nd International Universities Power Engineering Conference 2007, pp. 217-222.
- Sabaghi M., Farahani H. F. Monitoring of induction motor temperature under unbalanced supplying by stator resistance estimation. Indian Journal of Science and Technology, 2012, vol. 5, no 3, pp. 2354-2359.
- Enany T.A., Wahba W.I., Hassan M. A Remote and Sensorless Stator Winding Temperature Estimation Method for Thermal Protection for Induction Motor. Engineering, Computer Science IJSDA. 2014, vol. 3, pp. 53-72.
- Zhang P., Lu B., Habetler T. G. A Remote and Sensorless Stator Winding Resistance Estimation Method for Thermal Protection of Soft-Starter-Connected Induction Machines. Computer Science, Engineering. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, vol. 55, no.10, pp. 3611-3618.
- Zhang P., Du Y., Lu B., Habetler T. G. A DC Signal Injection-Based Thermal Protection Scheme for Soft-Starter-Connected Induction Motors. IEEE Transactions on Industry Applications, 2009, vol. 45, pp. 1351-1358.
- Enany T. A., Hassan M., Othman E. S. Induction motor temperature monitoring via signal injection enhanced with adaptive neuro-fuzzy inference system. Engineering, 2017, pp. 91-109.
- Zhang P., Lu B., Habetler T. G. An active stator temperature estimation technique for thermal protection of in-verter-fed induction motors with considerations of impaired cooling detection. IEEE International Electric Machines and Drives Conference, 2009, 9 p.
- Matic P. R., Gecic M. A., Lekić Đ., Marcetic D. P. Thermal Protection of Vector-Controlled IM Drive Based on DC Current Injection. IEEE Transactions on Industrial Electronics 2015, vol. 62, Issue 4, pp. 2082-2089.
- Tshimanga T. P., Bezabih E., Iyer V. R., Zhang S., He L., Harley R. G. Stator temperature estimation of open-loop

- controlled induction machines via active DC voltage injection. North American Power Symposium (NAPS), 2015.
29. Baneira F., Asiminoaei L., Doval-Gandoy J., Delpino H.A.M., Yepes A. G. G., Godbersen J. Estimation Method of Stator Winding Resistance for Induction Motor Drives Based on DC-Signal Injection Suitable for Low Inertia. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, vol. 34, pp. 5646-5654.
 30. Yoo J., Lee J.-H., Sul S.-K., Baloch N. A. Stator Resistance Estimation Using DC Injection With Reduced Torque Ripple in Induction Motor Sensorless Drives. IEEE Transactions on Industry Applications, 2020.
 31. Bryakin I.V., Bochkarev I.V., Bagiev Kh.G., Kelebaev K.K. Temperature control of windings and protection against overheating of AC electric machines. *Vestnik YuUrGU. Seriya «Energetika»* [Bulletin of SUSU. Series "Energy"], 2019, vol. 19, no. 1, pp. 75–84. (In Russian)
 32. Bryakin I.V., Bochkarev I.V., Kelebaev K.K. Diagnostics of the parameters of AC electrical machines. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrical systems and complexes], 2017, no. 4 (37), pp. 38-44. (In Russian)
 33. Bryakin I.V., Bochkarev I.V. *Sposob izmereniya sostavlyayushchikh polnogo soprotivleniya i ustroystvo dlya ego realizatsii* [Method for measuring impedance components and a device for its implementation]. Patent RU, no. 2691624. 2019.

Разработка систем защиты от перегрева электродвигателей переменного тока / И.В. Бочкарев, И.В. Брякин, В.Р. Храмшин, А.Р. Сандыбаева // Электротехнические системы и комплексы. 2020. № 3(48). С. 41-51. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-3\(48\)-41-51](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-3(48)-41-51)

Bochkarev I.V., Bryakin I.V., Khrumshin V.R., Sandybaeva A.R. Development of Protection Systems Against Overheating of AC Electric Motors. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2020, no. 3(48), pp. 41-51. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-3\(48\)-41-51](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-3(48)-41-51)

Лебедев Г.Г.¹, Сарваров А.С.², Вечеркин М.В.², Петушков М.Ю.², Косматов В.И.²

¹ ООО «Челябинский тракторный завод – УРАЛТРАК»

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

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОКА ХОЛОСТОГО ХОДА АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

В настоящее время в связи с устойчивой тенденцией применения АД практически во всех отраслях промышленности часто возникает необходимость в определении параметров двигателя, которых нет в среде справочных данных. Требуются знания параметров АД в различных режимах работы: холостой ход, номинальный режим, произвольный нагрузочный режим, пусковой режим. Их расчет базируется на схемах замещения, точность расчета параметров которых во многом зависит от точности расчета тока и потерь холостого хода. В данной статье рассмотрен ряд известных в теории и практике электрических машин методик расчета тока и потерь холостого хода. Проведено обоснование возможности расчета тока холостого хода на основе баланса реактивной мощности АД для номинального режима по паспортным данным двигателя. Получено рациональное выражение для расчета тока холостого хода. Рассмотренные методы расчета тока холостого хода и данные, приведенные в справочной литературе, исследованы применительно к двум типам АД из группы мощности до 100 кВт и мощностью 1000 кВт. В рамках исследования проведены расчеты тока холостого хода по паспортным данным рассмотренных двигателей и дана оценка полученных результатов. Установлено, что выражение для расчета тока холостого хода, полученное из условия баланса реактивной мощности в номинальном режиме, дает наиболее близкие значения к результатам расчета с использованием базового метода, основанного на данных для номинального режима и их величин при частичных нагрузках на двигатели.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, параметры, энергетическая диаграмма, номинальный режим, частичная нагрузка, ток холостого хода, методы расчета, расчетные графики, кривые энергетических показателей, табличные данные, баланс реактивной мощности, сопоставление результатов.

ВВЕДЕНИЕ

Преобладающее применение асинхронных двигателей (АД) практически во всех отраслях промышленности стало неоспоримым фактом. К известным достоинствам АД добавились преимущества, обусловленные применением современных полупроводниковых устройств.

Доля асинхронных электроприводов в 1995 году составляла 75%, а в 2002 году – 85% [1]. На крупнейшем металлургическом предприятии ПАО «ММК» доля электроприводов переменного тока в 2012 году составила 82% [2].

По экспертным оценкам в Российской Федерации число асинхронных двигателей составляет 230–270 млн единиц [3]. На долю трехфазных АД напряжением 380 В приходится около 50 млн единиц. Ежегодный выход асинхронных электродвигателей из строя составляет не менее 10–12% [4] и по информации из других источников может достигать 20–25%. Особенно высока доля выхода АД в сельском хозяйстве, где квалификация электротехнического персонала недостаточно высокая.

Обеспечение надежной эксплуатации электроприводов с асинхронными двигателями, особенно тех, которые прошли многократные ремонты, требует знания параметров в различных режимах работы: холостой ход, номинальный режим, произвольный нагрузочный режим, пусковой режим. Для исследования эксплуатационных режимов АД используются рабочие и механические характеристики, которые определяются экспериментально или рассчитываются на основе схемы замещения. При этом из существующего разнообразия схем замещения АД предпочтение отдается Т-образной схеме.

При отсутствии данных каталога или отклонениях

некоторых из них от паспортных параметры АД могут определяться без проведения полных испытаний на основе аналитических или графоаналитических методов расчета с использованием табличных данных, кривых и коэффициентов, полученных на основе обобщения огромного опыта эксплуатации АД [5–8].

Иногда выдаваемая заводом-изготовителем информация о параметрах АД недостаточна и требует проведения дополнительных исследований. В таких случаях стоимость испытаний АД увеличивается на 10–15% [9]. Действительно, проведение полных испытаний, регламентированных для асинхронных двигателей в ГОСТ 7217-87, является весьма затратным мероприятием с привлечением специализированных организаций с соответствующими лицензиями. Достаточно громоздкими являются также исследования АД в опыте холостого хода [10], где предложено использовать нелинейность кривой намагничивания для расчета параметров схемы замещения. В [11] приведена методика с использованием относительных единиц, что несколько усложняет процедуру расчетов.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В настоящее время существует большое многообразие подходов к определению параметров Т-образной схемы замещения АД и каждый из них дает приближенные значения параметров, точность которых не всегда определена. Для снижения погрешности при определении параметров схемы замещения следует использовать точное значение I_0 . В этой связи в данной статье ставится задача проанализировать известные методы расчета тока холостого хода и на этой основе обосновать наиболее рациональный подход к его определению без проведения специальных опытов.

Величина этого тока является не только одним из базовых параметров для расчета параметров Т-образной схемы замещения, но и одним из главных диагностических признаков технического состояния АД.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Предлагается определить ток холостого хода различными методами для двигателей из разных групп мощностей:

- до 100 кВт с напряжением 0,38 кВ (это двигатели массового применения);
- для мощных двигателей (обычно это высоковольтные двигатели).

Типы и паспортные данные электродвигателей, выбранных для исследования, приведены в **табл. 1**.

Таблица 1

Паспортные данные АД

Двигатель 4А225М4УЗ	Двигатель А4-450У4ВУЗ
$P_{2н}=55$ кВт	$P_{2н}=1000$ кВт
$n_1=1500$ об/мин	$n_1=1500$ об/мин
$U_{1н}=0,38$ кВТ; $S_n=0,02$	$U_{1н}=6$ кВТ; $S_n=0,012$
$\eta_n=0,925$; $\cos\varphi_n=0,9$	$\eta_n=0,955$; $\cos\varphi_n=0,89$
$I_n/I_n=7$	$I_n=113$ А
$M_n/M_n=1,2$	$I_n/I_n=5,7$
$M_k/M_n=2,2$	$M_k/M_n=2,1$

ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТОДИК ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ХОЛОСТОГО ХОДА

1. Метод на основе энергетической диаграммы, паспортных данных и расчетного графика $m=f(\cos\varphi_{1н})$.

В теории электрических машин традиционно сложился подход, основанный на применении энергетической диаграммы. Энергетическая диаграмма АД (**рис. 1**) дает наглядную картину преобразования и распределения потока потребляемой из сети электрической энергии P_1 .

Суммарные потери в двигателе в номинальном режиме согласно диаграмме представляются выражением

$$P_{\Sigma\text{дв(н)}} = p_{\Sigma\text{эл}} + p_m + p_{\Sigma\text{эл2}} + p_{\text{мех}} + p_{\text{доб}}. \quad (1)$$

По паспортным данным суммарные потери в номинальном режиме определяются с учетом номинального значения КПД:

$$P_{\Sigma\text{дв(н)}} = P_{2н} \left(\frac{1 - \eta_n}{\eta_n} \right). \quad (2)$$

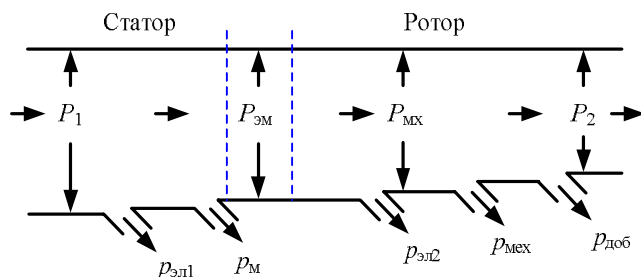


Рис. 1. Энергетическая диаграмма АД: P_1 – активная мощность, потребляемая из сети; $P_{эм}$ – мощность, передаваемая от статора к ротору; $P_{мх}$ – полная механическая мощность; P_2 – механическая мощность на валу двигателя; $p_{эл1}$ – электрические потери в обмотке статора; p_m – потери в сердечнике статора (магнитные потери); $p_{эл2}$ – электрические потери в обмотке ротора; $p_{мех}$ – механические потери; $p_{доб}$ – добавочные потери (принимаются равными $0,005P_{2н}$)

Активные потери холостого хода (мощность холостого хода)

$$P_0 = p_{\Sigma\text{эл(0)}} + p_m + p_{\text{доб}}. \quad (3)$$

Эта мощность составляет определенную долю от суммарных потерь мощности в двигателе [5, 12]:

$$P_0 = 0,4P_{\Sigma\text{дв(н)}}. \quad (4)$$

Соотношение (4) получено исходя из того, что для АД основного применения наибольший КПД достигается при нагрузке на 15-20% меньше номинальной [12].

Для АД более ранних серий или в тех случаях, когда характер изменения КПД по каталогу трудно выявить, приближенное значение определяется по данным **табл. 2**.

Величина реактивной мощности холостого хода может быть рассчитана по выражению [7]

$$Q_0 = P_{2н} \frac{m}{\eta_n}, \quad (5)$$

где m – расчетный параметр.

Величина m устанавливает связь между активной составляющей номинального тока статора АД и током холостого хода:

$$m = \frac{I_0}{I_{1н} \cos\varphi_{1н}}. \quad (6)$$

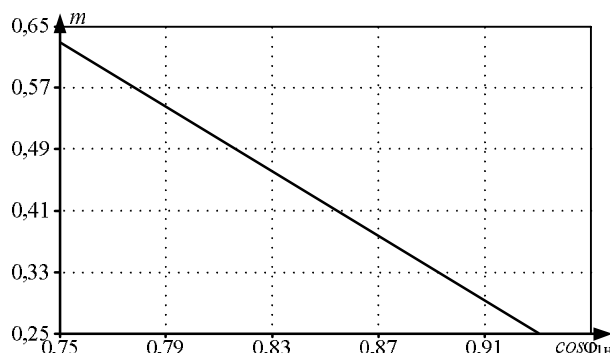
Так как величина I_0 в каталожных данных не задается, то предложено пользоваться расчетным графиком $m=f(\cos\varphi_{1н})$, приведенным на **рис. 2**.

Пользуясь расчетным графиком, по паспортному значению $\cos\varphi_{1н}$ предварительно определяется параметр m , по величине которого на основе (5) и (6) рассчитываются Q_0 и I_0 .

Таблица 2

 Определение соотношения $P_0/P_{1н}$

Параметр	Мощность двигателя $P_{2н}$, кВт								
	1,1	2,2	5,5	11	22	37	55	110	220
η_n	0,75	0,8	0,83	0,86	0,89	0,9	0,91	0,92	0,93
$P_{1н}$	1,5	2,75	6,6	12,8	24,7	41	60,4	119,5	215
$P_0/P_{1н}$	0,11	0,08	0,07	0,06	0,05	0,045	0,04	0,035	0,03


 Рис. 2. Расчетный график $m=f(\cos\varphi_{1н})$

2. Метод на основе данных для номинального режима и их величин при частичных нагрузках на двигателях (безитерационная методика).

Заслуживает внимания безитерационная методика определения параметров схемы замещения АД на основе данных каталога для номинального режима (100%) и их величин при частичных нагрузках на двигателях (25 и 50%) [9]. В работе [9] приводится формула для расчета тока холостого хода со ссылкой на [12]:

$$I_0 = \sqrt{\frac{I_{1p}^2 - \left[I_{1n} p^* (1 - s_n) / (1 - p^* s_n) \right]^2}{1 - \left[p^* (1 - s_n) / (1 - p^* s_n) \right]^2}}, \quad (7)$$

где I_{1n} , I_{1p}^* – номинальный ток двигателя и ток при частичной нагрузке; p^* – относительная величина загрузки двигателя по мощности; s_n – номинальное скольжение.

Следует отметить, что данная формула дает по крайней мере меньшую погрешность [9]. В других работах также приводятся результаты использования расчетной формулы для тока холостого хода АД.

Номинальный ток трехфазного АД рассчитывается по известной в теории электрических машин формуле

$$I_{1n} = \frac{P_{2n}}{3U_{1n}\eta_n \cos \varphi_n}. \quad (8)$$

Определенные сложности возникают при определении I_{1p}^* – тока при частичной нагрузке двигателя по мощности. Её величина в общем виде может определяться по формуле

$$I_{1p}^* = \frac{P_{2p}^*}{3U_{1p} \eta_{p^*} \cos \varphi_{p^*}}, \quad (9)$$

где величины η_{p^*} и $\cos \varphi_{p^*}$ – текущие значения КПД и коэффициент мощности, например, при частичной нагрузке $p^* = 0,25$ или других её значениях.

Примеры расчетов, проведенные по этой формуле, показали возможность её применения в случаях, когда известно значение тока двигателя I_{1p}^* в режиме частичной загрузки p^* , например, при нагрузках 25, 50% или при другой произвольной нагрузке. Однако границы произвольной загрузки, дающие наиболее точные результаты в этой методике, не исследованы. По этой причине специально проведены расчеты, результаты которых для выбранных двигателей приведены в табл. 3.

Расчеты проводились с использованием данных табл. 4, где приведены в относительных единицах значения тока статора АД для относительных значений мощности двигателя при частичной нагрузке.

Таблица 3

Результаты расчетов					
Для двигателя 4A225M4Y3 мощностью $P_{2n} = 55$ кВт					
p^*	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
I_0 , А	28,33	28,29	27,8	25,0	21,7
Для двигателя A4450Y4BY3 мощностью $P_{2n} = 1000$ кВт					
p^*	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
I_0 , А	32,23	31,6	30,95	27,3	23,78

Таблица 4

Данные для определения частичной загрузки по мощности по значениям тока АД

$\kappa_3 = P_2/P_{2n}$	I_1/I_{1n} при $\cos \varphi_{1n}$							
	0,92	0,89	0,86	0,83	0,79	0,76	0,73	0,69
0	0,2	0,25	0,32	0,37	0,44	0,48	0,54	0,58
0,1	0,24	0,29	0,34	0,39	0,45	0,49	0,55	0,59
0,2	0,3	0,34	0,38	0,43	0,47	0,52	0,57	0,62
0,3	0,35	0,4	0,43	0,47	0,51	0,55	0,59	0,65
0,4	0,43	0,47	0,5	0,53	0,56	0,59	0,64	0,69
0,5	0,5	0,54	0,57	0,59	0,62	0,64	0,68	0,72
0,6	0,59	0,62	0,64	0,66	0,68	0,70	0,74	0,77
0,7	0,69	0,7	0,72	0,74	0,75	0,77	0,79	0,82
0,8	0,77	0,79	0,81	0,82	0,83	0,85	0,86	0,88
0,9	0,87	0,88	0,89	0,9	0,91	0,92	0,93	0,94
1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0

Из полученных результатов следует, что наиболее близкими по своим значениям являются токи холостого хода при частичных нагрузках менее $0,4p^*$. При значениях $p^* \geq 0,5$ происходит заметное снижение расчетных значений тока холостого хода, что позволило уточнить условия использования данного метода.

Для определения частичной загрузки двигателя по мощности можно воспользоваться специальными кривыми, приведенными на рис. 3.

При отсутствии кривых (см. рис. 3) можно воспользоваться данными табл. 4. Кроме этого, в каталогах [13] часто приводятся энергетические показатели при нагрузках АД, равных 25, 75, 50 и 125% от номинальной (рис. 4).

При этом для заданного коэффициента загрузки двигателя по мощности определяется фактическое значение мощности P_{2p}^* , а с использованием кривых энергетических показателей определяют текущие значения КПД η_{p^*} и $\cos \varphi_{p^*}$.

В дальнейшем по формуле (9) рассчитывается ток, потребляемый из сети при частичной нагрузке, что позволяет на основе (7) найти величину тока холостого хода I_0 .

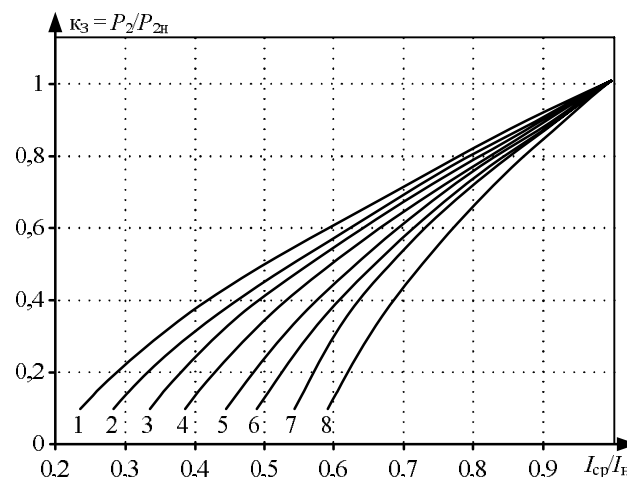


Рис. 3. Кривые для определения частичной загрузки двигателя по мощности в зависимости от относительного значения тока статора АД при различных значениях $\cos \varphi_{1n}$: 1 - 0,92; 2 - 0,89; 3 - 0,86; 4 - 0,83; 5 - 0,79; 6 - 0,76; 7 - 0,73; 8 - 0,69

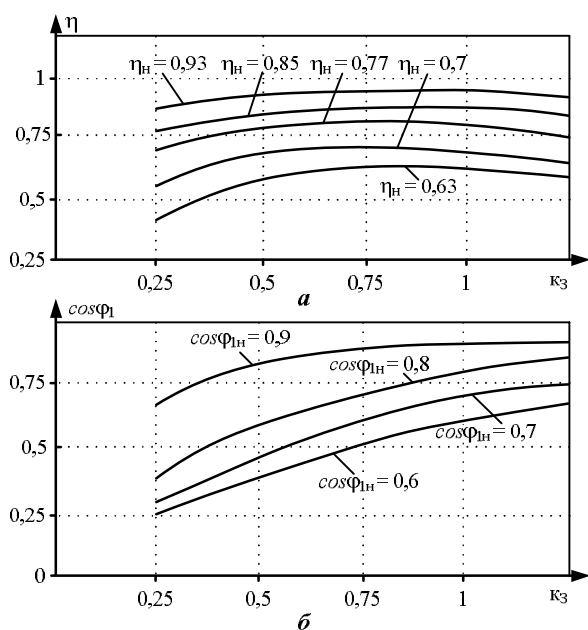


Рис. 4. Кривые энергетических показателей АД

3. Упрощенное выражение с учетом кратности пускового момента.

Номинальное значение намагничивающего тока [14] без учета потерь в стали и пренебрежении активным сопротивлением статора рассчитывается по формуле

$$I_0 \approx I_{\text{н}} \frac{\sin \varphi_{\text{н}} - \cos \varphi_{\text{н}}}{k_{\text{м}} + \sqrt{k_{\text{м}}^2 - 1}}, \quad (10)$$

где $k_{\text{м}}$ – кратность максимального момента.

В дальнейшем данное выражение можно представить в виде

$$I_0 \approx I_{\text{н}} \left(\sin \varphi_{\text{н}} - \frac{S_{\text{н}}}{S_{\text{кр}}} \cos \varphi_{\text{н}} \right). \quad (11)$$

4. Метод с использованием таблиц из справочников.

При отсутствии паспорта и данных каталога для расчета параметров могут быть использованы таблицы, кривые и коэффициенты [5, 15]. Так, например, средние значения величин I_0 в долях от номинального тока для двигателей общего назначения [5] представляются в виде данных, приведенных в табл. 5.

В ряде случаев, особенно для контроля качества ремонтов, необходимо знать примерные средние и допустимые значения токов холостого хода. Ниже в табл. 6 они приведены в относительных единицах в зависимости от номинального коэффициента мощности.

Таблица 5
Средние значения тока холостого хода АД
в долях от номинального тока

$P_{2\text{н}}$, кВт	Синхронная скорость вращения n_1 , об/мин					
	3000	1500	1000	750	600	500
0,1-0,5	0,55	0,7	0,8	0,9	0,95	-
0,51-1	0,4	0,55	0,6	0,65	0,85	0,9
1,1-5	0,35	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7
5,1-10	0,25	0,45	0,5	0,55	0,6	0,65
10,1-25	0,2	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6
25,1-50	0,18	0,35	0,4	0,45	0,5	0,55
50,1-100	-	0,3	0,33	0,35	0,4	0,45
>100	-	0,25	0,3	0,33	0,35	0,4

Таблица 6
Значения $I_{0\text{ср}}/I_{\text{н}}$ и $I_{0\text{доп}}/I_{\text{н}}$ в зависимости от номинального коэффициента мощности $\cos \varphi_{\text{н}}$

$\cos \varphi_{\text{н}}$	0,69	0,73	0,76	0,79	0,83	0,86	0,89	0,92	0,95
$I_{0\text{ср}}/I_{\text{н}}$	0,56	0,53	0,48	0,43	0,38	0,32	0,26	0,23	0,18
$I_{0\text{доп}}/I_{\text{н}}$	0,6	0,55	0,5	0,45	0,4	0,35	0,3	0,25	0,2

5. Метод с использованием полиномов 2-го порядка.

Для снижения погрешности при определении параметров схемы замещения в [16] предложено определять точное значение I_0 с использованием полиномов второго порядка для различных групп мощностей АД

$$\begin{cases} I_0 = -1,161 \cdot 10^{-8} P_{\text{н}}^2 + 0,001194 P_{\text{н}} - 8,85 \\ \text{при } 30 \text{ кВт} \leq P_{\text{н}} \leq 45 \text{ кВт;} \\ I_0 = -1,459 \cdot 10^{-8} P_{\text{н}}^2 + 0,002663 P_{\text{н}} - 80,70 \\ \text{при } 55 \text{ кВт} \leq P_{\text{н}} \leq 90 \text{ кВт;} \\ I_0 = -6,688 \cdot 10^{-10} P_{\text{н}}^2 + 0,000426 P_{\text{н}} - 3,37 \\ \text{при } 110 \text{ кВт} \leq P_{\text{н}} \leq 315 \text{ кВт.} \end{cases}$$

Данный метод разработан для ограниченного диапазона мощности – для двигателей средней мощности.

6. Метод на основе баланса реактивной мощности в номинальном режиме.

Уравнение баланса реактивной мощности АД можно представить выражением

$$Q_{\text{н}} = \sqrt{3} \cdot U_{\text{н}} I_{\text{н}} \sin \varphi_{\text{н}} = 3I_{\text{н}}^2 x_{\text{к}} + 3I_0^2 (x_1 + x_0), \quad (12)$$

или в общем виде

$$Q_{\text{н}} = Q_{\text{к}} + Q_0, \quad (13)$$

где $x_{\text{к}}$, x_1 и x_0 – соответственно индуктивное сопротивление короткого замыкания АД, индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора и индуктивное сопротивление намагничивания.

Относительное значение индуктивного сопротивления короткого замыкания $X_{\text{к}}$ примерно равно обратной величине от кратности пускового тока $k_i = I_{\text{н}} / I_{\text{нф}}$ [11], т.е. можно записать $X_{\text{к}} = 1 / k_i$. При этом базовая величина сопротивления $R_0 = U_{\text{нф}} / I_{\text{нф}}$.

Таким образом, индуктивное сопротивление короткого замыкания определится по выражению

$$x_{\text{к}} \approx \frac{1}{k_i} \cdot \frac{U_{\text{нф}}}{I_{\text{нф}}}, \quad (14)$$

а величина реактивной мощности короткого замыкания

$$Q_{\text{к}} \approx 3I_{\text{н}}^2 x_{\text{к}} = 3I_{\text{нф}}^2 \frac{1}{k_i} \cdot \frac{U_{\text{нф}}}{I_{\text{нф}}}. \quad (15)$$

После преобразований получено

$$Q_{\text{к}} = \frac{S_{\text{н}}}{k_i}. \quad (16)$$

Выражение для тока холостого хода примет вид

$$I_0 = \frac{\sqrt{3}U_{1н}I_{1н} \sin \varphi_{1н} - \sqrt{3}U_{1н}I_{1н}/k_i}{\sqrt{3}U_{1н}}. \quad (17)$$

В итоге получим выражение для расчета тока холостого хода по паспортным данным двигателя:

$$I_0 \approx I_{1н} \left(\sin \varphi_{1н} - \frac{1}{k_i} \right). \quad (18)$$

Данное выражение является наиболее простым из известных, например сравним с формулой (10).

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

Величины тока холостого хода I_0 , определенные различными рассмотренными методами, сведены в табл. 7.

Для сравнительной оценки результатов необходимо осуществить обоснованный выбор базового метода определения тока холостого хода, который является, по мнению многих специалистов, наиболее точным. Анализируя существующие публикации по данной тематике, можно отметить, что **метод, основанный на использовании данных для номинального режима и их величин при частичных нагрузках на двигатели**, нашел наиболее широкое применение. Весомым аргументом в пользу данного метода является его применение в учебном процессе [17]. Результаты, полученные по данному методу, предлагается принять в качестве базового для оценки точности других рассмотренных в данной работе методов.

Таблица 7

Значения тока холостого хода асинхронных двигателей из различных групп мощностей с использованием различных методов

Наименование метода	Значение тока I_0 , А	
	55 кВт	1000 кВт
1. На основе энергетической диаграммы, паспортных данных и расчетного графика $m=f(\cos \varphi_{1н})$	28,5	34,2
2. На основе данных для номинального режима и их величин при частичных нагрузках на двигатели (при $p^* = 0,3$)	228,3	331,6
3. Упрощенное выражение с учетом кратности пускового момента $I_0 \approx I_{1н} \frac{\sin \varphi_{1н} - \cos \varphi_{1н}}{k_m + \sqrt{k_m^2 - 1}}$	222,0	226,1
4. С использованием таблиц (коэффициентов) из справочников: - по табл. 5 - по табл. 6.	330,1 226,1-330,1	228,3 227,2-330,1
5. С использованием полиномов 2-го порядка	221,7	—
6. На основе баланса реактивной мощности в номинальном режиме	229,4	331,7

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате определения тока холостого хода с использованием рассмотренных методов определения тока холостого хода для АД из разных групп мощности (средней мощности и мощных двигателей) и анализа результатов следует:

1. Метод определения тока холостого хода АД в номинальном режиме, основанный на использовании данных для номинального режима и их величин при частичных нагрузках на двигатели целесообразно принять в качестве базового, как наиболее точный, по экспертным оценкам специалистов.

2. Базовый метод определения тока холостого хода при использовании табличных данных для определения загрузки по мощности по значениям тока АД дает достаточно близкие своим значениям тока холостого хода при частичных нагрузках менее $0,4p^*$. Расчеты при значениях $p^* \geq 0,5$ показали заметное снижение значений тока холостого хода. Таким образом, на основе проведенных расчетов уточнены условия использования данного метода.

3. Упрощенное выражение с учетом кратности пускового момента (п. 3 в табл. 7) дает наибольшую погрешность свыше 15%, что не позволяет использовать данный метод для расчета параметров схемы замещения АД.

4. Результаты, полученные с использованием таблиц (коэффициентов из справочников), дают достаточно близкие результаты для предварительного определения тока холостого хода, однако не во всех справочниках они приводятся.

5. Наиболее близкие к базовому методу получены значения тока холостого хода по методу на основе баланса мощности для номинального режима. Получено наиболее простое выражение из известных, в котором из паспортных данных использованы $\cos \varphi_{1н}$ и кратность пускового тока k_i . Погрешность для АД из группы средней мощности составила менее 4%, а для АД из группы мощных двигателей результаты практически совпали, что позволяет данный метод использовать в тех случаях когда, нет возможности воспользоваться базовым.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Браславский И.Я., Ишматов З.Ш., Поляков В.Н. Энергосберегающий асинхронный электропривод / под ред. И.Я. Браславского. М.: Издательский центр «Академия», 2004. 256 с.
- Головин В.В., Разворотнев В.П., Юдин А.Ю. Масштабное внедрение частотно-регулируемых электроприводов в ОАО «ММК» // Труды VII Международной (XIII Всероссийской) научно-технической конференции по автоматизированному электроприводу; ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». Иваново, 2012. С. 448-453.
- Мугалимов Р.Г., Мугалимова А.Р. Энергосберегающие асинхронные двигатели с компенсацией реактивной мощности // Известия академии наук. Энергетика. 2013. №5. С. 30-45.
- Venkataraman B., Godsey B., Premerlani W., Shulman E., Thakur M., Midence R. Fundamentals of a Motor Thermal Model and its Applications in Motor Protection // Conf. Record of 2005 Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference. Jacksonville, FL, USA, 20-23 June, 2005, pp. 11-28. Doi:10.1109/PAPCON.2005.1502046.

5. Гейлер Л.Б. Справочник электрика промышленных предприятий. Минск: Беларусь, 1963. 588 с.
6. Лебедев Г.Г. Определение параметров асинхронного двигателя напряжением до 1000 В при отсутствии паспорта // Промышленная энергетика. 1981. №2. С. 15-16.
7. Литвак Л.В. Рациональная компенсация реактивных нагрузок на промышленных предприятиях. М.: Госэнергоиздат, 1963.
8. Электротехнический справочник. Т.3, кн.2 / гл. редактор И.Н. Орлов. 6 изд. М.: Энергоиздат, 1982, 560 с.
9. Мощинский Ю.А., Беспалов В.Я., Кирякин А.А. Определение параметров схемы замещения асинхронной машины по каталожным данным // Электричество. 1998. №4. С. 38-42.
10. Шеремет А.И., Шевченко Г.С. Определение параметров Т-образной схемы замещения асинхронного двигателя на основе опыта холостого хода // Научный Вестник ДГМА. 2017. №3. С. 104-108.
11. Донской Н.В. Определение параметров асинхронных двигателей по паспортным данным и пусковым характеристикам // Труды VII Международной (XIII Всероссийской) научно-технической конференции по автоматизированному электроприводу: ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». Иваново, 2012. С. 196-201.
12. Регулируемые асинхронные двигатели в сельскохозяйственном производстве / под ред. Д.Н. Быстрицкого. М.: Энергия, 1975. 399 с.
13. Асинхронные двигатели серии 4А: справочник / А.Э. Кравчик и др. М.: Энергоатомиздат, 1982.
14. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей. М.: ГЭИ, 1969. 527 с.
15. Справочник по электрическим машинам / под общ. ред. И.П. Копылова и Б.К. Клокова. Т.1. М.: Энергоатомиздат, 1988. 456с.
16. Макеев М.С., Кувшинов А.А. Алгоритм расчета параметров схемы замещения асинхронного двигателя по каталожным данным // Вектор науки ТГУ. 2013. №1(23). С. 108-112.
17. Качин С.И., Чернышев А.Ю., Качин О.С. Электрический привод: учеб.-метод. пособие. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. 157 с.

Поступила в редакцию 24 июля 2020 г.

INFORMATION IN ENGLISH

CALCULATION OF IDLING CURRENT OF AN ASYNCHRONOUS MOTOR

Gennady G. Lebedev

Engineer, LLC Chelyabinsk Tractor Plant - URALTRAC, Chelyabinsk, Russia.

Anvar S. Sarvarov

D.Sc. (Engineering), Professor, Department of Automated Electrical Drive and Mechatronics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: anvar@magtu.ru.

Maksim V. Vecherkin

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Department of Physics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: vecherkin@inbox.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8679-9831>.

Mikhail Yu. Petushkov

D.Sc. (Engineering), Associate Professor, Professor of the Department of Electronics and Microelectronics Engineering, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: petushkov_m@mail.ru.

Valeriy I. Kosmatov

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

Now in connection with a steady trend of application of asynchronous motors practically in all industries, there is frequently a necessity for calculation of parameters of the motor, which are not present in the reference data. Knowledge of the following asynchronous motor parameters in various operating modes is required: idling mode, nominal mode, arbitrary load mode, starting mode. Their calculation is based on substitution schemes, the accuracy of which depends largely on the accuracy of the calculation of current and no-load losses. In this article, a number of well-known theoretical and practical methods for calculating current and no-load losses of idling speed are considered. The substantiation of a possibility of no-load current calculation is carried out on the basis of reactive power balance of an asynchronous motor for nominal mode according to motor passport data. The rational expression for no-load current calculation is obtained. The considered methods of no-load current calculation and the data given in the reference literature are investigated with reference to two types of boosters from the power group up to 100 kW and power 1000 kW. Within the framework of the research, idle current calculations were carried

out on the basis of passport data of the considered motors and the evaluation of the obtained results was given. It is established that the expression for no-load current calculation obtained from the condition of reactive power balance in the nominal mode gives the closest values to the results of calculation using the basic method based on the data for the nominal mode and their values at partial loads on the engines.

Keywords: asynchronous motor, parameters, energy diagram, nominal mode, partial load, idle current, calculation methods, calculation graphs, energy curves, tabular data, reactive power balance, comparison of results.

REFERENCES

1. Braslavskiy I.Ya., Ishmatov Z.Sh., Polyakov V.N. *Energoberegayushchiy asinkhronnyi elektropriwod* [Energy saving asynchronous electric drive]. Under the editorship of I. Ya. Braslavskiy. Moscow, Academia, 2004. 256 p. (In Russian)
2. Golovin, V.V., Razvorotnev, V.P., Yudin A.Yu. Large-scale introduction of the variable frequency electric drives in JSC "MMK". *Trudy VII Mezhdunarodnoy (XIII Vserossiyskoy)*

- nauchno-tekhnicheskoy konferentsii po avtomatizirovannomu elektropivodu: FGBOU VPO «Ivanovskiy gosudarstvennyi energeticheskiy universitet imeni V.I. Lenina»* [Proceedings of VII International (XIII All-Russian) Scientific and Technical Conference on the automated electric drive: FSBEI HPE "Ivanovo State Power Engineering University named after V.I. Lenin"], Ivanovo, 2012, pp. 448-453. (In Russian)
3. Mugalimov R.G., Mugalimova A.R. Energy saving induction motors with the reactive power compensation. *Izvestia akademii nauk. Energetika* [Proceedings of the Academy of sciences. Power engineering], 2013, no. 5, pp. 30-45. (In Russian)
 4. Venkataraman B., Godsey B., Premerlani W., Shulman E., Thakur M., Midence R. Fundamentals of a Motor Thermal Model and its Applications in Motor Protection // Conf. Record of 2005 Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference. Jacksonville, FL, USA, 20-23 June 2005. Pp. 11–28. Doi:10.1109/PAPCON.2005.1502046.
 5. Gailer L.B. *Spravochnik elektrika promyshlennyykh predpriyatiy* [Handbook of Industrial Enterprises Electricians], Minsk, Belarus, 1963, 588 p. (In Russian)
 6. Lebedev G.G. Determination of asynchronous motor parameters with voltage up to 1000 V in the absence of passport. *Promyshlennaya energetika* [Industrial Power Engineering], 1981, pp.15-16. (In Russian)
 7. Litvak L.V. *Ratsionalnaya kompensatsiya reaktivnykh nagruzok na promyshlennyykh predpriyatiyakh* [Rational compensation of reactive loads at the industrial enterprises], Moscow, Gosenergoizdat, 1963. (In Russian)
 8. *Elektrotekhnicheskiy spravochnik* [Electrical Engineering Handbook], vol. 3, book 2, Editor-in-Chief I.N. Orlov, 6 ed., Moscow, Energoizdat, 1982, 560 p. (In Russian)
 9. Moshchinskiy Yu.A., Bepalov V.Ya., Kiryakin A.A. Definition of parameters of the asynchronous machine replacement scheme by the catalogue data. *Elektrichestvo* [Electricity], 1998, no. 4, pp. 38-42. (In Russian)
 10. Sheremet A.I., Shevchenko G.S. Definition of parameters of the T-shaped scheme of asynchronous motor replacement on the basis of idling experience. *Nauchnyi Vestnik DGMA* [Scientific bulletin of DGMA], 2017, no. 23, pp. 104-108. (In Russian)
 11. Donskoy N.V. Parameter determination of asynchronous motors on the basis of passport data and starting characteristics. *Trudy VII Mezhdunarodnoy (XIII Vserossiyskoy) nauchno-tekhnicheskoy konferentsii po avtomatizirovannomu elektropivodu: FGBOU VPO «Ivanovskiy gosudarstvennyi energeticheskiy universitet imeni V.I. Lenina»* [Proceedings of VII International (XIII All-Russian) Scientific and Technical Conference on Automated Electric Drive: FSBEI HPE "Ivanovo State Power Engineering University named after V.I. Lenin"], Ivanovo, 2012, pp. 196-201. (In Russian)
 12. *Reguliruemye asinkhronnye dvigateli v selskhozvystvennom proizvodstve* [Adjustable asynchronous motors in agricultural production] / Under the editorship of D.N. Bystritskiy. Moscow: Energia, 1975, 399 p. (In Russian)
 13. *Asinkhronnye dvigateli serii 4A. Spravochnik* [Asynchronous motors of the 4A series. Handbook] / A.E. Kravchik et al. - Moscow: Energoatomizdat, 1982. (In Russian)
 14. Syromyatnikov I.A. *Rezhimy raboty asinkhronnykh i sinkhronnykh dvigateley* [Operation modes of the asynchronous and synchronous motors]. M.: GEI, 1969. 527 c. (In Russian)
 15. *Spravochnik po elektricheskim mashinam* [Reference book of electric machines] under the general editorship of I.P. Kopylov and B.K. Klovov. Vol.1. Moscow: Energoatomizdat, 1988. 456 p. (In Russian)
 16. Makeev M.S., Kuvshinov A.A. Algorithm of calculation of parameters of the asynchronous motor replacement scheme on the basis of the catalogue data. *Vektor nauki TGU* [Vector of Science of TSU], 2013, no. 1 (23), pp. 108-112. (In Russian)
 17. Kachin S.I. *Elektricheskiy privod: uchebno-metodicheskoe posobie* [Electric drive: teaching and methodical manual]. S.I. Kachin, A.Yu. Chernyshev, O.S. Kachin; Tomsk Polytechnic University. Tomsk: Tomsk Polytechnic University Publisher, 2009. 157 p. (In Russian)

Определение тока холостого хода асинхронного электродвигателя / Г.Г. Лебедев, А.С. Сарваров, М.В. Вечеркин, М.Ю. Петушков, В.И. Косматов // Электротехнические системы и комплексы. 2020. № 3(48). С. 52-58. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-3\(48\)-52-58](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-3(48)-52-58)

Lebedev G.G., Sarvarov A.S., Vecherkin M.V., Petushkov M.Yu., Kosmatov V.I. Calculation of Idling Current of an Asynchronous Motor. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2020, no. 3(48), pp. 52-58. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-3\(48\)-52-58](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-3(48)-52-58)

ИНФОРМАЦИОННОЕ, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 658.512.22:004.622

[https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-3\(48\)-59-64](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-3(48)-59-64)Логинов А.Ю.¹, Обабков И.Н.²¹АО «ОКБ «Новатор», г. Екатеринбург²Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. ЕкатеринбургПРЕДСТАВЛЕНИЕ КОМПОНЕНТОВ С ЗАГОТОВКАМИ В ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ
НА ЭТАПЕ КОНСТРУКТОРСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА

В статье рассматриваются три варианта применения заготовок во время конструкторской подготовки производства, при которых заготовкой может являться покупной компонент, деталь или сборочная единица. Проводится анализ причин использования заготовок непосредственно во время конструкторской подготовки производства. Основной причиной использования в качестве заготовки покупного или стандартного элемента является попытка упрощения либо удешевления процесса производства. Использование в качестве заготовки сборочной единицы происходит с целью ускорения выпуска спецификации на этапе подготовки конструкторской документации. В статье рассказывается о правилах формирования состава в информационных системах предприятия для каждого из трёх типов используемых заготовок. Основным риском применения заготовок является разрыв в механизме оповещения об изменениях: изменения в заготовке необходимо так или иначе транслировать на элементы, порожденные от этой заготовки. Данный риск может быть нивелирован при помощи использования информационной системы класса PDM, отслеживающей все изменения, а также при помощи организации ассоциативной связи внутри применяемой PDM между элементом и его заготовкой. Описанный механизм ассоциативной связи применяется в PDM-системе собственной разработки «Состав изделия 2.0», эксплуатирующейся в АО «ОКБ Новатор» (г. Екатеринбург).

Ключевые слова: состав изделия, компоненты с заготовками, PDM, КПП, ЕСКД, электронный состав изделия.

ВВЕДЕНИЕ

Конструкторско-технологическая подготовка производства (КТПП) является наиболее важным этапом жизненного цикла машиностроительного изделия. От того насколько правильно организована КТПП, напрямую зависит качество выпускаемой продукции, её успех на рынке. Основная нагрузка при проведении КТПП возложена на конструкторские подразделения [1-3].

Конструкторская подготовка производства (КПП) представляет собой совокупность процессов и работ, направленных на разработку конструкторской документации для серийного изготовления новых и совершенствования выпускаемых изделий. В РФ конструкторская подготовка выполняется в соответствии с Единой системой конструкторской документации (ЕСКД) по ГОСТам серии 2.

Итогом КПП служит комплект конструкторской документации (КД), основными документами в котором являются чертеж выпускаемого изделия, а также спецификация, определяющая состав сборочной единицы.

В современном сквозном проектировании речь идет уже не о двухмерном чертеже, а о трехмерной модели сконструированной сборочной единицы или детали, представленной согласно ГОСТ Р 2.056-2014, ГОСТ Р 2.057-2019 [4-6]. При этом понятие состава всё равно остаётся актуальным. Ведь состав в дальнейшем используется для эффективной организации производства: для бесперебойного снабжения необходимыми материалами, для планирования и диспетчеризации [7-9].

Для последующего использования в информационных системах (ИС) состав сборочной единицы дол-

жен быть формализован.

В отличие от сборочной единицы деталь не имеет состава, а имеет лишь материал, из которого она изготавливается. Для таких деталей заготовки определяются на этапе технологической подготовки производства с учётом рекомендаций по выбору сортамента, которые могут быть указаны на чертеже.

Однако согласно ГОСТ 2.109-73 существует практика указания заготовок непосредственно в спецификации на сборочную единицу.

При использовании данной возможности на практике возникает ряд сложностей при работе со спецификациями и порожденными на их основании составами в ИС предприятия.

Данная статья посвящена описанию этих сложностей и указанию рекомендаций по их преодолению.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Согласно ГОСТ 2.102-2013 документом, определяющим состав сборочной единицы, комплекса или комплекта, является спецификация [10]. Согласно ГОСТ Р 2.106-2019 в спецификацию вносят составные части, входящие в специфицируемое изделие с указанием их количества на одно изделие в соответствующей графе [11] (см. **рис 1**).

Спецификация:					Порождённый состав:	
					Компонент	Кол.
				Сборочные единицы	ТТТ.000-10 Корпус	1
A2	1	ТТТ.000-10	Корпус	1	ТТТ.000-1 Крышка	1
				Детали	ТТТ.000-2 Клапан	1
					ТТТ.000-3 Колонка	2
A4	2	ТТТ.000-1	Крышка	1		
A4	3	ТТТ.000-2	Клапан	1		
A4	4	ТТТ.000-3	Колонка	2		

Рис. 1. Спецификация простейшей сборочной единицы и порождённый из неё состав

Состав такой сборочной единицы хорошо обрабатывается PDM-системами. Работа с электронной структурой изделия регламентируется ГОСТ 2.053-2013 [12].

В случае простейшей сборочной единицы состав представляет собой перечень входящих в сборочную единицу компонентов с указанными количествами.

Согласно ГОСТ 2.109-73 возможно вести разработку сборочных единиц и деталей на основании уже существующих [13]:

- покупных изделий;
- деталей;
- других сборочных единиц.

Основными причинами, побуждающими конструкторов использовать заготовки указанных типов, являются:

- стремление использовать доработанные покупные и стандартные изделия, что упрощает/удешевляет процесс производства;
- практика повторного использования ранее разработанных компонентов (в случае заготовок-деталей, заготовок-сборок);
- упрощение процесса согласования разработанных чертежей и спецификаций (в случае заготовок-деталей и заготовок-сборок);
- ускорение выпуска спецификации в случае минимального изменения сборочной единицы (не надо переносить полностью состав, достаточно сослаться на заготовку-сборку и указать необходимые доработки). В этом случае спецификация получается в разы короче.

Основными минусами использования заготовок на этапе конструкторской подготовки производства являются:

- сложности при проведении конструкторских извещений об изменениях. При возникающих изменениях в сборочной единице или детали, которые служат заготовкой необходимо провести извещения как в них, так и каким-то образом инициировать проведение извещений во всех элементах, для которых данные сборочная единица и деталь являются заготовкой;
- слабая отработка сценария использования заготовок на этапе конструкторской подготовки в информационных системах, представленных на российском рынке.

Применение в качестве заготовки стандартного элемента или покупного изделия является самым простым случаем. В выпускаемой спецификации он указывается так, как представлено на **рис. 2**.

При этом в составе данный случай учитывается как две записи: деталь и стандартный элемент, использованный в качестве заготовки. Согласно составу, для производства сборочной единицы нам необходимо закупить указанный стандартный элемент и изготовить его по чертежу соответствующей детали. В чертеже детали также напрямую указано, что стандартный элемент является для неё заготовкой.

Спецификация на ДДД.000:

Детали				
A2	1	ДДД.000-1	Втулка	1
Стандартные изделия				
	-	777.822.007	Втулка ОСТ 4Г.0822.007	1
(Заготовка для ДДД.000-1)				

Порождённый состав для ДДД.000

Компонент	Кол.
Втулка ДДД.000-1	1
Втулка ОСТ 4Г.0822.007	1

Рис. 2. Заготовка в виде стандартного изделия и порождаемый в этом случае состав

Случай, когда покупное изделие является элементом нормативно-справочной информации и является стандартным, подразумевает очень редкое его изменение – государственные и отраслевые стандарты меняются крайне редко.

Если покупное изделие не является стандартным, то извещения об изменениях (ИИ) на него приходят от предприятия-изготовителя и обрабатываются таким же способом, как ИИ на изменение заготовок-деталей и заготовок сборочных единиц.

Применение в выпускаемой спецификации в качестве заготовки детали указывается так, как представлено на **рис. 3**.

При этом в чертеже используемой детали напрямую указано, что деталь-заготовка является для неё заготовкой.

Обычно такой механизм применяется для использования деталей, по разным причинам скопившихся на складе предприятия после их доработки.

Аналогично предыдущему случаю в составе данный случай учитывается как две записи: сама деталь и деталь, использованная в качестве заготовки.

В этом случае при загрузке состава сборочной единицы в ERP-систему должны быть учтены два варианта:

- деталь-заготовка уже произведена, находится на складе (не требуется ни материальных, ни временных ресурсов на её производство);
- деталь-заготовка ещё не произведена, требуются материалы и иные ресурсы для её производства.

Решение о выборе одного из двух вариантов производства принимается на уровне ERP-системы [14, 15].

В данном случае необходимо отслеживать ИИ, приводящие к изменениям в детали-заготовке и предпринимать действия по модификации сборочных единиц и деталей, для которых данная деталь является заготовкой.

Наиболее сложный случай возникает тогда, когда в качестве заготовки выступает сборочная единица, обладающая самостоятельным составом.

При этом доработка сборочных единиц осуществляется с видоизменением состава: добавлением или удалением некоторых компонентов или же с изменением их количеств (**рис. 4**).

Если в состав сборочной единицы добавляются компоненты, то они размещаются под заголовком «Вновь установленные составные части» с количеством, соответствующим добавленному по сравнению со сборочной единицей заготовкой. Если из состава сборочной единицы исключаются компоненты, то они размещаются под заголовком «Снятые составные части» с количеством, соответствующим убранному по сравнению со сборочной единицей заготовкой.

Спецификация на сборочную единицу ДДД.000:

Детали				
A2	1	ДДД.000-1	Втулка	1
A2	-	ДЗ.000-1	Втулка (Заготовка для ДДД.000-1)	1

Порождённый состав для ДДД.000

Компонент	Кол.
Втулка ДДД.000-1	1
Втулка ДЗ.000-1	1

Рис. 3. Заготовка в виде детали и порождаемый в этом случае состав

Как видно из примера на **рис. 4**, состав сборочной единицы, порождаемый в этом случае, включает в себя состав заготовки-сборочной единицы с изменениями, описанными в спецификации.

Если какие-то компоненты добавлены в сборочную единицу, то их количество в составе будет равно сумме количества этих компонентов в сборочной единице-заготовке и количества данного компонента, указанного в разделе «Вновь установленные составные части».

Если же какие-то компоненты полностью исключены из спецификации, то они не попадают в состав. Если же компонент исключён не полностью, а частично, то он будет переходить в состав с количеством, равным своему количеству в сборочной единице заготовки, минус количество, указанное в разделе «Снятые составные части».

Для отслеживания изменений в заготовке-детали и заготовке-сборке наиболее подходящим инструментом является PDM-система. В ней необходимо организовать специальную ассоциативную связь [16], соединяющую эти компоненты-заготовки с порожденными на их основе деталями и сборочными единицами (см. **рис. 5**).

В случае модификации заготовки PDM-система должна автоматически сообщать об изменениях во все порожденные компоненты. Дальнейшая обработка таких сообщений может быть выполнена в соответствии с бизнес-процессами, принятыми на конкретном машиностроительном предприятии [17, 18].

Спецификация сборочной единицы-заготовки ЗГ.000						Порожденный состав:	
					Сборочные единицы	Компонент	Кол.
A2	1	ЗГ.000-10	Корпус	1		ЗГ.000-10 Корпус	1
					Детали	ЗГ.000-1 Крышка	1
A4	2	ЗГ.000-1	Крышка	1		ЗГ.000-2 Клапан	1
A4	3	ЗГ.000-2	Клапан	1			

Спецификация сборочной единицы СБ.000						Порожденный состав:	
					Сборочные единицы	Компонент	Кол.
A4		ЗГ.000	(Насос	1		ЗГ.000-10	1
			Заготовка для			ЗГ.000-1	1
			СБ.00)			ТТТ.000-2 Клапан	1
			Снятые составные части				
			Детали				
A4	3	ЗГ.000-2	Клапан	1			
			Вновь установленные				
			составные части				
			Детали				
A4	3	ТТТ.000-2	Клапан	1			

Рис. 4. Заготовка в виде сборки и порождаемый в данном случае состав

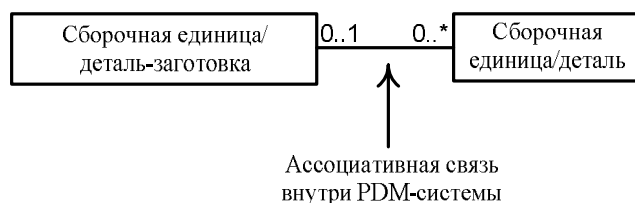


Рис. 5. Ассоциативная связь для отслеживания изменений

Существуют два варианта отработки составов при изменении сборки-заготовки:

- составы порождённых сборочных единиц меняются в PDM-системе вручную сотрудниками, ответственными за эти сборочные единицы, при получении соответствующих оповещений, возможно преобразованных в задания на исполнение;

- составы меняются автоматически, при условии того, что не происходит коллизий, связанных с изменениями в компонентах, упомянутых в сборочной единице, имеющей заготовку.

При изменении количества компонента в составе сборочной единицы заготовки (увеличении или уменьшении) во всех порождённых сборочных единицах происходит увеличение или уменьшение количества данного компонента ровно на эту же величину.

При этом спецификации сборочных единиц изменяются более сложным образом:

1. Если компонент, у которого изменилось количество, не располагается в «Снятых составных частях» и «Вновь установленных составных частях», то изменение спецификации сборочной единицы, имеющей заготовку, не происходит.

2. Если компонент, у которого изменилось количество, располагается в разделе «Снятые составные части», то:

- если количество в сборке-заготовке увеличилось (например, было 5, стало 7), то в порождённой сборке снимается больше компонентов на величину увеличения количества;

- если количество в сборке-заготовке уменьшилось (например, было 5, стало 3), то спецификации на порождённую сборку снимается меньшее количество компонентов (на величину уменьшения количества). При этом раздел «Снятые составные части» может совсем исчезнуть, если количество снимаемых компонентов уменьшится до 0.

3. Если компонент, у которого изменилось количество, располагается в разделе «Вновь установленные составные части», то:

- если количество в сборке-заготовке увеличилось (например, было 5, стало 7), то устанавливается меньше компонентов (на величину увеличения количества). При этом раздел «Вновь установленные составные части» может совсем исчезнуть из порождённой спецификации, если количество устанавливаемых компонентов уменьшится до 0;

- если же количество в сборке-заготовке уменьшилось (например, было 5, стало 3), то в порождённой спецификации устанавливается большее количество компонентов (на величину уменьшения количества).

При работе с составами сборочной единицы с заготовкой необходимо также учесть, что до внесения необходимых изменений выгрузка состава сборочной единицы, у которой была изменена заготовка, в ERP-систему должен быть запрещён, так как состав в этом случае считается недостоверным.

Как уже было сказано выше, несмотря на все сложности, возникающие при использовании заготовок во время конструкторской подготовки производства, конструкторы при разработке изделий пользуются всеми тремя описанными типами заготовок: заготовка-покупной элемент, заготовка-деталь, заготовка-

сборочная единица.

В табл. 1 представлены данные о процентном отношении случаев применения таких заготовок к общему числу деталей и сборок на опытном машиностроительном предприятии ОКБ «Новатор» (г. Екатеринбург).

Первые два столбца показывают отношение случаев применения заготовок соответствующих типов к общему числу деталей, третий столбец – к общему числу сборочных единиц.

Примечательно, что случаев применения сборочных единиц в качестве заготовок даже больше, чем случаев применения деталей и покупных элементов.

После опроса конструкторов удалось установить, что использование сборочных единиц в качестве заготовок в основном производится для ускорения выпуска КД. При этом, как правило, в качестве сборочной единицы-заготовки используется достаточно крупный узел, состав которого насчитывает 250-400 компонентов.

Высокий процент использования сборок с заготовками характерен именно для опытного машиностроительного предприятия, где конструкторскую подготовку надо провести в самые короткие сроки.

В ОКБ «Новатор» при работе со сборками с заготовками в виде сборочных единиц используется упрощённый механизм работы с составами, при котором все изменения в сборке-заготовке транслируются в порождённую сборочную единицу непосредственно при их регистрации в системе.

Данный подход не позволяет полностью симитировать цикл отработки извещений на изменение состава, проводимый конструкторами. Однако он позволяет решить основную проблему, возникающую при работе с составами сборок с заготовками: трансляция изменений в заготовке на элементы, порожденные от этой заготовки.

Следует отметить, что в современных российских PDM-системах, работа с составом компонентов, имеющих заготовки, реализована лишь частично (см. табл. 2).

Таблица 1

Количество сборок и деталей
с заготовками различных типов

Заготовка-покупной элемент	Заготовка-деталь	Заготовка-сборочная единица
0,08%	0,33%	2,25%

Таблица 2

Работа с составом компонентов,
имеющих заготовки в российских PDM

Информационная система	Виды заготовок		
	Покупной	Деталь	Сборочная единица
Лощман (АСКОН)	Да	Да	Нет
T-FLEX PDM (ТОП-Системы)	Да	Да	Да*
IPS (Интермех)	Да	Да	Да*
1C: PDM (1C, Аппиус)	Да	Да	Нет

Работа со сборочными единицами, являющимися заготовками в системах T-FLEX PDM компании «Топ Системы» и IPS компании «Интермех», возможна после серьёзной доработки стандартной конфигурации.

При рассмотрении ГОСТ 2.055-2014 [19], задающего правила построения электронной спецификации, обнаруживается, что там нет упоминаний об элементах с заготовками. Нет упоминаний о таких элементах и в ГОСТ 2.053-2013, описывающем электронную структуру изделия. ГОСТ Р 2.056-2014, описывающий электронную модель детали и ГОСТ Р 2.057-2019, задающий правила построения электронной модели сборочной единицы, также не содержат информации об элементах с заготовками, указываемыми на этапе КПП.

Отсюда можно сделать вывод, что случай использования заготовок на этапе КПП не формализован для электронных представлений КД и моделей детали и сборочной единицы. Возможно, это будет сделано в дальнейшем или же использование таких заготовок будет вовсе исключено.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Согласно ЕСКД существуют три варианта применения заготовок при КПП, при которых заготовкой может являться покупной компонент, деталь или сборочная единица. Все эти три случая используются конструкторами для ускорения выпуска КД при проектировании. Самым сложным случаем является использование в качестве заготовки другой сборочной единицы – тут происходит работа с составом.

Основным риском при применении заготовок в КПП является разрыв в механизме оповещения об изменениях: изменения в заготовке необходимо так или иначе транслировать на элементы, порожденные от этой заготовки.

Данный риск может быть нивелирован при помощи ИС класса PDM, отслеживающей все изменения, при помощи организации ассоциативной связи между элементом и его заготовкой.

Однако стандартные конфигурации в большинстве существующих PDM-системах не имеют настроенного механизма для работы с этим сценарием. Их необходимо доработать.

Кроме того, стандарты ЕСКД на электронное представление конструкторских документов и моделей деталей и сборочных единиц не имеют механизмов описания заготовок всех трёх указанных типов.

Несмотря на указанные сложности, описанный подход используется с 2006 года в системе «Состав изделий» в АО «ОКБ „Новатор“» (г. Екатеринбург) для хранения информации о составах сборочных единиц с заготовками в виде деталей, покупных изделий или других сборочных единиц.

На информационную систему получено свидетельство о регистрации программы для ЭВМ [20], выпущен официальный акт о внедрении. Опыт применения данного подхода (с небольшими доработками) в АО «ОКБ „Новатор“» признан успешным [21].

В настоящее время идёт доработка информационной системы. В частности, происходит разработка специального механизма, позволяющего при работе с заготовками иметь возможность накопления изменений в составе сборки-заготовки, с последующей трансляцией их в порождаемую сборочную единицу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Быков А.В. Автоматизация КТПП в машиностроении: проблемы и решения // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2005. №4. С. 53-57.
2. Скоробогатов А.С., Кобзев В.В. КТПП для обеспечения деятельности машиностроительных предприятий в рамках индустрии 4.0 // Инжиниринг предприятий и управление знаниями (ИП&УЗ-2018): сб. науч. тр. XXI Российской научной конференции. В 2-х т. М., 2018. С. 119-124.
3. Жуков Д. Intermech Professional Solutions – современное решение для информационной поддержки процессов КТПП // САПР и графика. 2011. №12. С. 65-67.
4. Романова Е.Б. Системы автоматизации конструкторско-технологической подготовки производства // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. 2004. №14. С.265-271.
5. ГОСТ Р 2.056-2014. Единая система конструкторской документации (ЕСКД). Электронная модель детали. Общие положения. М.: Стандартинформ, 2018. 12 с.
6. ГОСТ Р 2.057-2019 Единая система конструкторской документации (ЕСКД). Электронная модель сборочной единицы. Общие положения. М.: Стандартинформ, 2019. 16 с.
7. Цырков Г.А., Ермохин Е.А., Цырков А.В. Программно-методические средства формирования технологического состава сложных технических систем // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2015. №2. С. 32-40.
8. Сергеева Е.П., Сергеева И.И. ERP-системы как основа конкурентного бизнеса // Вестник ОрелГИЭТ. 2015. №3(33). С. 81-85.
9. Полянсков Ю.В., Кондратьева А.С., Черников М.С., Блюменштейн А.А. Интеграция САПР-, PDM-, ERP-систем в единое информационное пространство производственного предприятия // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2013. Т.15. №4-3. С. 628-633.
10. ГОСТ 2.102-2013. Единая система конструкторской документации (ЕСКД). Виды и комплектность конструкторских документов. М.: Стандартинформ, 2014. 13 с.
11. ГОСТ Р 2.106-2019. Единая система конструкторской документации (ЕСКД). Текстовые документы. М.: Стандартинформ, 2019. 36 с.
12. ГОСТ 2.109-73. Единая система конструкторской документации (ЕСКД). Основные требования к чертежам. М.: Стандартинформ, 2007. 30 с.
13. ГОСТ 2.053-2013. Единая система конструкторской документации (ЕСКД). Электронная структура изделия. Общие положения. М.: Стандартинформ, 2014. 12 с.
14. Шабалкин Д.Ю. Интеграция полиплатформенных автоматизированных подсистем различной функциональности в единое информационное пространство жизненного цикла изделия авиационной техники // Известия Самарского научного центра РАН. 2012. Т.14. №4(2). С. 545-549.
15. Михайлов В.Г. О подходах к созданию интегрированной информационной системы PDM-ERP // Системный анализ и прикладная информатика. 2016. № 2. С. 17-24.
16. Фаулер Мартин UML. Основы. Краткое руководство по стандартному языку объектного моделирования. М.: Символ-Плюс, 2018. 192 с.
17. Кузнецова В., Сергеев А., Сердюк А.И., Попов А. Совершенствование процесса изготовления сложных изделий с использованием PDM-систем: учеб. пособие. Оренбург: ОГУ, 2013. 144 с.
18. Ширяев Н. Некоторые тенденции развития PLM-технологий // САПР и графика. 2011. № 12. С. 21-23.
19. ГОСТ 2.055-2014. Единая система конструкторской документации (ЕСКД). Электронная спецификация. Общие положения. М.: Стандартинформ, 2019. 16 с.
20. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2018661868. Программа управления конструкторской и технологической информацией об изделии на машиностроительном предприятии (Программа «Состав изделий v.2») / Логинов А.Ю., Вольман Д.В., Розенбаум А.Е.; Правообладатель АО «ОКБ «Новатор»; заявл. 27.06.2018, опублик. 20.09.2018.
21. Логинов А.Ю., Вольман Д.В., Розенбаум А.Е. Организация единого информационного пространства сбора и обработки конструкторско-технологической информации об изделиях на базе информационных систем собственной разработки // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2012. №3 (262). С. 24-26.

Поступила в редакцию 23 июля 2020 г.

INFORMATION IN ENGLISH

USING COMPONENTS HAVING WORKPIECES IN INFORMATION SYSTEMS DURING PRODUCTION PREPARATION

Alexander Yu. Loginov

Chief of Department, Software Development Department, Novator Design Bureau, Yekaterinburg, Russia.

E-mail: loginovayu@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1082-1991>.

Ilya N. Obabkov

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Director of Engineering School of Information Technologies Telecommunications and Control Systems, Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7410-2822>.

The article considers three options for the using of non-raw material workpieces during design preparation of the production, in which the workpiece can be a purchased component, a part or an assembly unit. The authors carried out the analysis of the reasons for using such workpieces during design preparation. The main reason for using a purchased component or a standard unit as workpieces is simplifying the production process or decreasing price of the production. The main reason of using of an assembly unit as a non-raw material workpiece is decreasing the time of making specification document during design preparation. Also, the article describes the rules for the composition formation in the enterprise information systems for each of these three options.

The main risk of using such workpieces is a gap in the mechanism of notification changes. Changes in the workpiece must be transmitted somehow to the elements generated from it. This risk can be mitigated with the help of a PDM information system that monitors all changes by organizing an associative relationship between the element and its workpiece. The described mechanism used in PDM is named "Product composition 2.0" at Novator Design Bureau, Yekaterinburg.

Keywords: components having workpieces, production preparation, PDM, composition of product, USDD, electronic structure.

REFERENCES

1. Bykov A.V. Automation of design and technological preparation for production in mechanical engineering: problems and solutions. *Informatsionnye tekhnologii v proektirovanii i proizvodstve* [Information technologies in design and production], 2015, no. 4, pp. 53–57. (In Russian)
 2. Skorobogatov A.S., Kobzev V.V. Design and technological preparation of production to ensure the processes of machine-building enterprises within industry 4.0. *Inzhiniring predpriyatiy i upravlenie znaniyami (IP&UZ-2018). Sbornik nauchnykh trudov XXI Rossiyskoy nauchnoy konferentsii* [Enterprise Engineering and Knowledge Management (IP & UZ-2018). Proceedings of the XXI Russian scientific conference]. 2018. In 2 volumes. Moscow, 2018, pp. 119-124. (In Russian)
 3. Zhukov D. Intermech Professional Solutions – a modern solution for information support of the processes of design and technological preparation of production. *SAPR i grafika* [CAD and graphics]. 2011, no. 12, pp. 65-67. (In Russian)
 4. Romanova E.B. Automation systems for design and technological preparation of production. *Nauchno-tekhnicheskiy vestnik Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki* [Scientific and Technical Bulletin of the St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics]. 2004, no. 14, pp. 265-271. (In Russian)
 5. GOST R 2.056-2014. Unified system for design documentation. Digital part model. General principles. Moscow, Standartinform Publ., 2018. 12 p. (In Russian)
 6. GOST R 2.057-2019. Unified system for design documentation. Digital assembly model. General principles. Moscow, Standartinform Publ., 2019. 16 p. (In Russian)
 7. Tsyrov G.A., Ermohin E.A., Tsyrov A.V. Software and methodological tools for the formation of the technological composition of complex technical systems. *Informatsionnye tekhnologii v proektirovanii i proizvodstve* [Information technologies in design and production]. 2015, no. 2, pp. 32-40. (In Russian)
 8. Sergeeva E.P., Sergeeva I.I. ERP as a base of competitive business. *Vestnik OrelGIET* [News of OrelGIET]. 2015, no. 3(33), pp. 81-85. (In Russian)
 9. Polyansky Yu.V., Kondratjeva A.S., Chernikov M.S., Blumshtein A.A. CAPP, PDM, ERP integration in unified information space. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk* [News of Samara Research Center of the Russian Academy of Sciences], 2013, vol. 15, no. 4-3, pp. 628-633. (In Russian)
 10. GOST 2.102-2013. Unified system for design documentation. Types and sets of design documentation. Moscow, Standartinform Publ., 2014. 13 p. (In Russian)
 11. GOST R 2.106-2019. Unified system for design documentation. Textual documents. Moscow, Standartinform Publ., 2019. 36 p. (In Russian)
 12. GOST 2.109-73. Unified system for design documentation. Basic requirements for drawings. Moscow, Standartinform Publ., 2007. 30 p. (In Russian)
 13. GOST 2.053-2013. Unified system for design documentation. Product electronic structure. General principles. Moscow, Standartinform Publ., 2014. 12 p. (In Russian)
 14. Shabalkin D.Yu. Integration of multi-platform automated subsystems of various functionality into a single information space of the life cycle of an aircraft. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra* [Bulletin of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2012, vol. 14, no. 4(2), pp. 545-549. (In Russian)
 15. Mikhailov V.G. Approaches to creating an integrated PDM-ERP information system. *Sistemnyi analiz i prikladnaya informatika* [System analysis and applied informatics], 2012, no. 2, pp. 17-24. (In Russian)
 16. Fauler M. *Osnovy. Kratkoe rukovodstvo po standartnomu yazyku obyektnogo modelirovaniya* [UML basics. A quick reference to the standard object modeling language]. Moscow: SymbolPlus, 2018, 192 p. (In Russian)
 17. Kuznetsova V., Sergeev A., Serdyuk A., Popov A. *Sovershenstvovanie protsessa izgotovleniya slozhnykh izdeliy s ispolzovaniem PDM-sistem: uchebnoe posobie* [Improving the manufacturing process of complex products using PDM systems: a tutorial]. Orenburg: OGU, 2013. (In Russian)
 18. Shyryayev N. Some trends in the development of PLM technologies. *SAPR i grafika* [CAD and graphics], 2011, no. 12, pp. 21-23. (In Russian)
 19. GOST 2.055-2014. Unified system for design documentation. Electronic specification. Moscow, Standartinform Publ., 2019. 16 p. (In Russian)
 20. Loginov A.Yu., Volman D.V., Rozenbaum A.E. Information system for handling production design and technological information at mechanical plant (“Production composition v.2”). Software registration, no. 2018661868, 2018.
 21. Loginov A.Yu., Volman D.V., Rozenbaum A.E. Organization of a unified information space for managing design and technological information about products based on proprietary information systems. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: kompyuternye tekhnologii, upravlenie, radioelektronika* [News of South-Urals State University. Computer science, management, radio electronic systems], 2012, no. 3 (262), pp. 24-26. (In Russian)
- Логинов А.Ю., Обабков И.Н. Представление компонентов с заготовками в информационных системах на этапе конструкторской подготовки производства // *Электротехнические системы и комплексы*. 2020. № 3(48). С. 59-64. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-3\(48\)-59-64](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-3(48)-59-64)
- Loginov A.Yu., Obabkov I.N. Using Components Having Workpieces in Information Systems During Production Preparation. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electro-technical Systems and Complexes], 2020, no. 3(48), pp. 59-64. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-3\(48\)-59-64](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-3(48)-59-64)

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 621.31

[https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-3\(48\)-65-69](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-3(48)-65-69)

Сорокин Н.С., Кушмилъ О.Е.

ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат»

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СРЕДСТВ SQL SERVER ДЛЯ РАЗРАБОТКИ БАЗЫ ДАННЫХ К САПР ЗРУ CAD

В процессе проектирования различных объектов электроэнергетики инженер-проектировщик осуществляет обработку большого пласта информации. Это и технические параметры оборудования (типы, мощности, номиналы, габаритные размеры, классы защит и пожаробезопасности и др.), и нормативно-техническая документация (ГОСТ, СНиП и т.д.), так или иначе непосредственно влияющие на конечный результат проекта. Помимо поиска и обработки данной информации, проектировщик с её помощью обеспечивает подбор и расчет различных вариантов. Инженер сильно перегружается информацией, что в дальнейшем часто приводит к ошибкам и неточностям в разработке проекта. Все это в совокупности вызывает необходимость разработки САПР для облегчения работы проектировщика. В построении САПР одним из главных и неотъемлемых этапов является разработка базы данных - совокупности хранящихся в ЭВМ данных, которые с минимальной избыточностью и максимально возможным быстродействием удовлетворяют информационные потребности автоматизированного проектирования, тем самым освобождая проектировщика от длительных поисков информации. Однако создание базы данных не подразумевает только лишь сбор в одном месте большого количества информации. Для работоспособности совместно с САПР формируется схема – логическая структура для создания и поддержки базы данных. Схема представляет собой набор правил, в соответствии с которыми организуется информация, создаются логические и функциональные связи и реализуются взаимоотношения между объектами базы данных. В данной работе рассматривается процесс разработки базы данных для САПР «ЗРУ CAD». Основой для базы послужила широко распространенная и несложная к изучению платформа РСУБД Microsoft SQL Server. Рассмотрены особенности формирования базы данных и основные принципы построения связей в данной БД с примерами.

Ключевые слова: SQL, база данных, проектирование, электротехника, САПР, алгоритм, программное обеспечение, разработка, подстанция, автоматизация.

ВВЕДЕНИЕ

На текущий момент существует и разрабатывается множество САПР в различных областях электроэнергетики. Сами принципы построения САПР и подходы к их архитектуре распространили их для широкого спектра решения задач. Отдельные работы направлены на внедрение САПР в условиях сельских сетей [1]. Широкое применение САПР нашли при выборе и проверке электрооборудования. Так, в [2] рассматриваются вопросы разработки алгоритмов, ориентированных на выбор и проверку кабелей. Часть работ ориентированы на САПР, позволяющие моделировать электротехническое оборудование [3].

Основной задачей систем автоматизированного проектирования является исключение однообразной работы проектировщика. Так, в [4] авторами предлагается применение автоматизированного процесса при выборе и проверке трансформаторов тока, а в [5] описаны алгоритмы, позволяющие осуществлять автоматизированную проверку и выбор токопроводов. Кроме того, затратным по времени процессом при проектировании является расчет токов короткого замыкания. Данный процесс в некоторых случаях для одного и того же проекта необходимо повторять несколько раз: нашли ошибки на экспертизе, неверно внесли исходные данные и т.д., сокращение времени расчета обеспечит САПР по расчету токов короткого замыкания [6].

САПР получили широкое применения для обучения специалистов в области электроэнергетики и электротехники [7, 8]. В [9] предлагается использовать САПР для комплексного проектирования тепловых

электростанций.

Большое число работ посвящено разработке САПР, направленных на проектирование электрической части подстанций. В работах [10-14] осуществлено комплексное описание САПР проектирования распределительных устройств подстанций. В [10] по автоматизированному проектированию однолинейных схем закрытых распределительных устройств, позволяющий осуществлять выбор и проверку электрооборудования [11], установку приборов [12] на отдельных присоединениях, расчет технико-экономических показателей электроустановки [13], а также составлять планы и формировать проектную и рабочую документацию [14].

Большинство из таких продуктов завязаны на взаимодействии с базами данных (оборудования, материалов, конструкторских и строительных изделий и т.д.) [15].

Эффективность САПР в электротехнике и энергетике, как и в случае проектирования в любой другой отрасли, напрямую зависит от правильной обработки и компоновки информации.

Выбор типа СУБД непосредственно влияет на подход к обработке информации, а также зависит от целей, поставленных перед разработчиком [16]. Основываясь на опыте существующих программных продуктов в области электротехники и энергетики [17-21], наиболее оптимальным вариантом на данный момент является использование формата реляционных БД [22].

Ускорение процесса работы любой САПР зависит от ее архитектуры, в которую обязательно должны входить базы данных, позволяющие оперативно получать информацию, содержащие необходимую исходную информацию, хранящие промежуточные и/или итоговые расчеты. Кроме того, базы данных должны обеспечивать функциональную связь между отдель-

ними составными частями структуры САПР.

В данной работе рассматривается структура базы данных, ориентированная на решение задач САПР ЗРУ CAD, содержащая данные об основном оборудовании 6-10 кВ ЗРУ подстанции, об оборудовании собственных нужд 0,4 кВ, а также систем оперативного тока.

ПОДХОД К РАЗРАБОТКЕ БД И ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ СВЯЗЕЙ

Основой для базы данных к программному продукту «ЗРУ CAD» послужила платформа SQL Server – реляционная система управления базами данных, разрабатываемая и поддерживаемая компанией Microsoft. Данный выбор мотивирован статистикой – реляционные СУБД используются в абсолютном большинстве крупных проектов по разработке информационных систем.

Также использование именно платформы Microsoft обусловлено широким распространением продукции данной компании не только в России, но и в мире, что позволит без труда производить операции с документами Word, Excel и других программ при взаимодействии с БД. При таких условиях вероятность возникновения конфликта форматов, описанных в [23], минимальна.

Ключевая особенность данной БД, как и любой другой базы на основе реляционной СУБД – хранение и представление данных значениями в таблицах. Каждая таблица в своем составе имеет первичный ключ – идентификационный номер строки. С помощью этого организована связь каждой из основных таблиц, име-

ющих в своей структуре вторичные ключи с общими таблицами: Завод-изготовитель, Категория размещения, Климатическое исполнение и т. д. Таким образом, каждая таблица базы данных имеет собственную ER-модель – описываемый объект (например, тип электрооборудования) и характеристики объекта, взаимодействующие с ним при помощи связей. На **рис. 1** представлен пример связи таблицы «АБ» по первичному ключу с общими таблицами.

Помимо первичных ключей элементов и общих таблиц для каждого из видов электрооборудования приводятся номинальные параметры, условия их размещения, цена в укрупненно-стоимостных показателях и цена на текущий период (если имеется), показатели надежности (параметр потока отказов, длительность восстановления, интенсивность планово-предупредительных ремонтов и их продолжительность). Такая детализация позволяет не прибегать к использованию сторонних программ и справочной литературы в процессе разработки проекта. Пример наполнения таблицы «Предохранители» представлен на **рис. 2**.

Каждый отдельный элемент БД (значение элемента) доступен с помощью комбинации имени таблицы, значения первичного ключа и имени столбца. Такой подход позволяет значительно упростить работу с данными при внесении изменений в параметры уже существующего в базе оборудования и прочих целях. Пример выполненного запроса на таблицу «Автоматы» приведен на **рис. 3**.

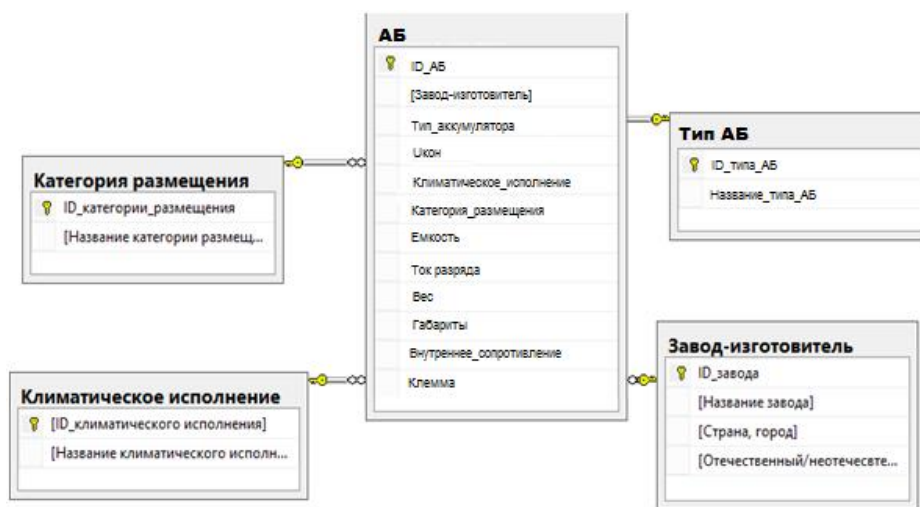


Рис. 1. ER-модель для таблицы «Аккумуляторная батарея (АБ)»

ID_предохран...	Завод-и...	Число п...	Тип	Шири...	Длина, мм	Высо...	Номин...	Номинал...	Номи...	Диапазон раб...	Степень з...
1	38	1	Вставка	52	128	38	220	50	355	от -60 до +40	IP20
2	38	1	Вставка	80	170	65	220	50	400	от -60 до +40	IP20
3	38	1	Вставка	52	128	38	220	50	100	от -60 до +40	IP20
4	38	1	Вставка	50	140	50	220	50	250	от -60 до +40	IP20
5	38	1	Вставка	52	128	38	220	50	80	от -60 до +40	IP20
6	38	1	Вставка	52	128	38	220	50	80	от -60 до +40	IP20
7	38	1	Вставка	50	140	50	220	50	250	от -60 до +40	IP20
8	38	1	Вставка	52	128	38	220	50	100	от -60 до +40	IP20
9	38	1	Вставка	50	140	50	220	50	250	от -60 до +40	IP20
10	38	1	Вставка	52	128	38	220	50	100	от -60 до +40	IP20

Рис. 2. Фрагмент наполненности таблицы «Предохранители»

	ID_автомата	Заводизготовитель	Климатическое исполнение	Номинальное напряжение, В	Номинальный ток, А	Номинальная отключ
1	1	29	6	380	2	10
2	2	29	6	380	3	10
3	3	29	6	380	6	10
4	4	29	6	380	10	10
5	5	29	6	220	25	10

Рис. 3. Пример запроса элемента БД «Автоматы»

База данных открыта для свободного редактирования, то есть пользователь вправе вносить необходимые изменения в содержание БД путём удаления оборудования неиспользуемых предприятием производителей, либо, напротив, внесения необходимых дополнительных единиц оборудования. Это даёт возможность пользователю не только использовать в процессе проектирования уже внесённые в базу элементы, но также позволяет изменять и добавлять новое оборудование в зависимости от требований заказчика. От пользователя лишь требуется соблюдать очередность нумерации первичного ключа в таблице.

Обобщая все вышеперечисленное, данная БД выполняет следующие функции:

- хранение и систематизация данных об электрооборудовании понизительных подстанций с высшим напряжением 35 кВ и выше;
- источник данных для пользователя программного продукта «ЗРУ САД» (выдача запрашиваемой информации на форму приложения);
- поиск информации об электрооборудовании цепей постоянного тока понизительных подстанций с высшим напряжением 35 кВ и выше.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренная в данной работе база данных разрабатывается для совместной работы с программным продуктом ЗРУ САД. Подробная детализация параметров оборудования в базе, а также возможность внесения дополнительных интересующих пользователя типов оборудования позволит удовлетворить все потребности расчетов и анализа вариантов проработки схемы. Все это, в конечном итоге, приведет к повышению качества труда проектировщика и снижению числа ошибок в процессе работы.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Афоничев Д.Н., Пиляев С.Н., Кекух И.А. Особенности автоматизации проектирования систем электроснабжения сельскохозяйственных потребителей // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2016. № 3(50). С. 152-158.
2. Елисеев Д.С. Алгоритмы САПР для выбора проводов и кабелей: учебное пособие. Волгоград: Волгоградский государственный аграрный университет, 2012. 184 с.
3. Еремин И.В., Тихонов А.И., Попов Г.В. Расчетная подсистема САПР силовых трансформаторов с сердечником из аморфной стали // Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии (XIX Бенардосовские чтения): материалы конференции. 2017. С. 185-188.
4. Алгоритм автоматизированного выбора и проверки из-

мерительных трансформаторов тока в составе САПР электрических подстанций / Е.А. Панова, А.В. Варганова, М.С. Панарина, Т.В. Хатюшина // Электротехнические системы и комплексы. 2019. № 2 (43). С. 19-24.

5. Панова Е.А., Варганова А.В., Панарина М.С. Автоматизированная проверка однополюсных шин прямоугольного сечения по условиям термической и электродинамической стойкости // Электротехнические системы и комплексы. 2020. № 1 (46). С. 28-33.
6. Автоматизированный расчет составляющих тока короткого замыкания и выбора высоковольтных выключателей в САПР распределительных устройств подстанций / Е.А. Панова, М.С. Панарина, А.В. Варганова, Т.В. Хатюшина // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2020. Т. 20. № 1. С. 38-46.
7. Павлюков В.А., Ткаченко С. Н., Коваленко А.В. Учебная САПР электрической части станций и подстанций: учебное пособие. Донецк: Донецкий национальный технический университет, 2016. 124 с.
8. Павлюков В.А., Ткаченко С. Н., Коваленко А.В. Применение САПР для учебного проектирования распределительных электростанций и подстанций // Актуальные проблемы электроэнергетики: сб. тр. Нижний Новгород: Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева, 2018. С. 273-278.
9. Трофимов А.В. Автоматизация проектирования АСУ ТП тепловых электростанций // Теплоэнергетика. 2009. № 10. С. 32-36.
10. Panova E.A., Varganova A.V., Kushmil' O.E. and Sorokin N.S. "The Algorithm for Automated Development of Design Drawings of One-Line Diagrams of Distribution Devices for 6-10 kV of Substations," 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), Vladivostok, Russia, 2019, pp. 1-5, doi: 10.1109/FarEastCon.2019.8934363.
11. Panova E.A., Varganova A.V. and Panarina M.S. "Automation of the Process of Electrical Substations Design through the Development and Application of CAD when Choosing Electrical Equipment," 2019 International Russian Automation Conference (RusAutoCon), Sochi, Russia, 2019, pp. 1-4, doi: 10.1109/RUSAUTOCON.2019.8867594.
12. Varganova A.V., Panova E.A. and Kushmil O.E. "Automation of the selection process and graphical display of measuring instruments on single-line diagrams of 6–220 kV substations," 2019 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS), Ufa, Russia, 2019, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICOECS46375.2019.8950026.
13. Varganova A.V., Panova E.A. and Irihov A.S. "Automated Decision-Making on an Economical Option of Layout for the Outdoor Switchgear of Substations with the Highest Voltage of 35-220 kV," 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), Vladivostok, Russia, 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/FarEastCon.2019.8933847.
14. Varganova A.V., Panova E.A. and Hatyushina T.V. "Algorithm for Automated Outdoor Switchgear Plans Designing in the "ORU CAD"," 2019 International Russian Automation Conference (RusAutoCon), Sochi, Russia, 2019, pp. 1-4, doi: 10.1109/RUSAUTOCON.2019.8867724.

15. Кренке Д. Теория и практика построения баз данных. СПб: Питер, 2005. 859 с.
16. Сидоров А. В. Обоснование выбора системы управления базой данных (СУБД) // Экономика сельского хозяйства России. 2013. № 3. С. 57-60.
17. Sapralfa.ru: Официальный сайт компании САПР-АЛЬФА.– Режим доступа: <http://sapralfa.ru>, свободный. Загл. с экрана.
18. Winelso.ru : Официальный сайт программы WinElso . Режим доступа: <https://winelso.ru>, свободный. Загл. с экрана.
19. Cadel.ru : Официальный сайт программы CadEL. Режим доступа: <http://cadel.ru>, свободный. Загл. с экрана.
20. Cad.ru : Официальный сайт АО «Русская Промышленная Компания». – Режим доступа: <https://cad.ru/support/bz/archive/111/cadelectro/>, свободный. – Загл. с экрана.
21. Csoft.ru : Официальный сайт группы компаний CSoft. – Режим доступа: <https://www.csoft.ru/catalog/soft/electrics-adt/electrics-adt.html>, свободный. – Загл. с экрана.
22. Самородов Ф. Microsoft: колоночная СУБД. Реляционные СУБД уходят в прошлое // Системный администратор. 2012. № 5 (114). С. 58-59.
23. Макаров С.П. Проблемы совместимости и обратной связи форматов баз данных в СУБД MS MSAccess 2007 // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2010. № 11. С. 32-35.

Поступила в редакцию 06 июля 2020 г.

INFORMATION IN ENGLISH

MAKING USE OF SQL SERVER TOOLS FOR DATABASE DEVELOPMENT FOR CLOSED SWITCHGEAR CAD

Nikita S. Sorokin

Equipment repair and maintenance electrician, PJSC Magnitogorsk Iron and Steel Works, Magnitogorsk, Russia. E-mail: sorokin540@yandex.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4380-1735>.

Oleg E. Kushmil

Equipment repair and maintenance electrician, PJSC Magnitogorsk Iron and Steel Works, Magnitogorsk, Russia. E-mail: sharkkush35@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6482-0751>.

In the process of designing various electric power facilities, the design engineer processes a large amount of information. It includes technical parameters of equipment (types, capacities, ratings, dimensions, classes of protection and fire safety, etc.), normative and technical documentation (State Standards, Construction Standards and Regulations, etc.), which in one way or another directly influence the final result of the project. In addition to searching for and processing this information, the designer uses it to select and calculate various options. The engineer is heavily overloaded with information, which often leads to errors and inaccuracies in the development of the project. All this together makes it necessary to develop CAD to facilitate the work of the designer. In the construction of CAD, one of the main and integral stages is the development of a database, which is a set of data stored in a computer that meets the information needs of computer-aided design with minimal redundancy and maximum possible speed, thereby relieving the designer of lengthy searches for information. However, creating a database does not mean just collecting a large amount of information in one place. In order to work together with CAD, a schema is formed, which is represented by a logical structure for creating and maintaining a database. A schema is a set of rules, which organize information, create logical and functional relationships and implement relationships between database objects. This paper discusses the process of developing a database for CAD "closed switchgear CAD". The basis for the database is a widespread and easy-to-learn Microsoft SQL Server platform. The basic principles of building links in this database with examples are considered.

Keywords: SQL, database, designing, electrical engineering, CAD, algorithm, software, development, substation, automation.

REFERENCES

1. Afonichev D.N., Pilyaev S.N., Kekuh I.A. Features of Automation of Design of Systems of Electricity Supply to Agricultural Consumers. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Bulletin of Voronezh State Agricultural University], 2016, no. 3 (50), pp. 152-158. (In Russian)
2. Eliseev D.S. *Algoritmy SAPR dlya vybora provodov i kabelej* [CAD algorithms for the selection of wires and cables]. Volgograd, Volgograd State Agrarian University, 2012. 184 p. (In Russian)
3. Eremin I.V., Tihonov A.I., Popov G.V. Calculating subsystem CAD power transformers with amorphous steel core. *Sostoyaniye i perspektivy razvitiya elektro- i teploekhnologii (XIX Benardosovskie chteniya)* [Status and prospects of electrical and heat technology (XIX Benardos readings)], 2017, pp. 185-188. (In Russian)
4. Panova E.A., Varganova A.V., Panarina M.S., Hatyushina T.V. Algorithm for automated selection and verification of instrument current transformers in the electrical substations CAD system. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical systems and complexes], 2019, no. 2 (43), pp. 19-24. (In Russian)
5. Panova E.A., Varganova A.V., Panarina M.S. Automated check of single-bar rectangular busbars on the conditions of thermal and electrodynamic withstand. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical systems and complexes], 2020, no. 1(46), pp. 28-33. (In Russian)
6. Panova E.A., Panarina M.S., Varganova A.V., Hatyushina T.V. Automated computation of short-circuit current components and selection of high-voltage circuit breakers of substation switchgear CAD. *Vestnik IUUrGU. Seriya «Energetika»* [Bulletin of the South Ural State University. Power Engineering Series], 2020, vol. 20, no. 1. pp. 38-46. (In Russian)
7. Pavlyukov V.A., Tkachenko S.N., Kovalenko A.V. *Uchebnaya SAPR elektricheskoy chaste stantsij i podstantsij* [Training CAD of the electrical part of the stations and substations]: training manual. Donetsk, Donetsk National Technical University, 2016, 124 pp. (In Russian)
8. Pavlyukov V.A., Tkachenko S. N., Kovalenko A.V. Application of CAD for training in the design of electrical power plants and substation units. *Aktualnye problemy elektroenergetiki: sbornik trudov* [Current electrical problems: collection of papers], 2018, pp. 273-278. (In Russian)
9. Trophymov A.B. Automation of the design of ACS of thermal power plants. *Teploenergetika* [Thermal Power Engineering], 2009, no. 10, pp. 32-36. (In Russian)
10. Panova E.A., Varganova A.V., Kushmil O.E. and So-

- rokin N.S. "The Algorithm for Automated Development of Design Drawings of One-Line Diagrams of Distribution Devices for 6-10 kV of Substations," 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), Vladivostok, Russia, 2019, pp. 1-5, doi: 10.1109/FarEastCon.2019.8934363.
11. Panova E.A., Varganova A.V. and Panarina M.S. "Automation of the Process of Electrical Substations Design through the Development and Application of CAD when Choosing Electrical Equipment," 2019 International Russian Automation Conference (RusAutoCon), Sochi, Russia, 2019, pp. 1-4, doi: 10.1109/RUSAUTOCON.2019.8867594.
 12. Varganova A.V., Panova E.A. and Kushmil O.E. "Automation of the selection process and graphical display of measuring instruments on single-line diagrams of 6–220 kV substations," 2019 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS), Ufa, Russia, 2019, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICOECS46375.2019.8950026.
 13. A.V. Varganova, E.A. Panova and A.S. Irihov. "Automated Decision-Making no an Economical Option of Layout for the Outdoor Switchgear of Substations with the Highest Voltage of 35-220 kV," 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), Vladivostok, Russia, 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/FarEastCon.2019.8933847.
 14. Varganova A.V., Panova E.A. and Hatyushina T.V. "Algorithm for Automated Outdoor Switchgear Plans Designing in the "ORU CAD"," 2019 International Russian Automation Conference (RusAutoCon), Sochi, Russia, 2019, pp. 1-4, doi: 10.1109/RUSAUTOCON.2019.8867724.
 15. Kroenke M.D. *Teoriya i praktika postroeniya baz dannyh* [Database Processing], St. Petersburg, Piter, 2005. 859 pp. (In Russian)
 16. Sidorov A.V. Rationale for the Selection of the Database Management System (DBMS). *Ekonomika selskogo hozyaistva Rossii* [Economics of Agriculture of Russia], Moscow, 2013, no. 3, pp. 57-60. (In Russian)
 17. Sapralfa.ru : Official website of SAPR-ALFA, <http://sapralfa.ru>. (In Russian)
 18. Winelso.ru : Official website of WinElso, <https://winelso.ru>, free. (In Russian)
 19. Cadel.ru : Official website of CadEL, <http://cadel.r>. (In Russian)
 20. Cad.ru: Official site of JSC "Russian Industrial Company", <https://cad.ru/support/bz/archive/111/cadelectro/>. (In Russian)
 21. Csoft.ru: Csoft Group Official Website, <https://www.csoft.ru/catalog/soft/electrics-adt/electrics-adt.html>. (In Russian)
 22. Samorodov F. Microsoft: Columnar DBMS. Relational DBMS go back to the past. *Sistemnyj administrator* [System Administrator], 2012, no. 5 (114), pp. 58-59. (In Russian)
 23. Makarov C. P. Problems of compatibility and feedback of database formats in MS MsAccess 2007. *Aktualnye problem gumanitarnykh i estestvennykh nauk* [Current Problems of Humanities and Natural Sciences], 2010, no. 11, pp. 32-35. (In Russian)

Сорокин Н.С., Кушмил О.Е. Использование средств SQL SERVER для разработки базы данных к САПР ЗРУ CAD // Электротехнические системы и комплексы. 2020. № 3(48). С. 65-69. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-3\(48\)-65-69](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-3(48)-65-69)

Sorokin N.S., Kushmil O.E. Making Use of SQL Server Tools For Database Development for Closed Switchgear CAD. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2020, no. 3(48), pp. 65-69. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-3\(48\)-65-69](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-3(48)-65-69)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Алексеев Денис Александрович – ассистент, кафедра информатики и вычислительной техники, Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия.

Апросин Константин Игоревич – старший преподаватель, кафедра автоматизированных электрических систем, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия.

Бочкарев Игорь Викторович – д-р техн. наук, профессор, кафедра электромеханики, Кыргызский государственный технический университет имени И. Раззакова, г. Бишкек, Кыргызстан. E-mail: elmech@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9873-9203>.

Брякин Иван Васильевич – д-р техн. наук, старший научный сотрудник, заведующий лабораторией информационно-измерительных систем, Институт машиностроения и автоматики, Национальная академия наук Кыргызской Республики, г. Бишкек, Кыргызстан. E-mail: bivas2006@yandex.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7463-8072>.

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

Вечеркин Максим Викторович – канд. техн. наук, доцент каф. физики, институт естествознания и стандартизации, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: vecherkin@inbox.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8679-9831>.

Грицай Александр Сергеевич – канд. техн. наук, доцент, кафедра информатики и вычислительной техники, Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия. E-mail: aleksandr.gritsay@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0805-2086>.

Денисевич Александр Сергеевич – аспирант, кафедра автоматизированного электропривода и мехатроники, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия. E-mail: denisevich993@mail.ru.

Дмитриев Степан Александрович – канд. техн. наук, доцент, кафедра автоматизированных электрических систем, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8781-2383>.

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

Кушмилль Олег Евгеньевич – электромонтер по ремонту и обслуживанию электрооборудования, ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: sharkkush35@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6482-0751>.

Лаптова Вероника Анатольевна – студент, кафедра автоматизированного электропривода и мехатроники, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия. E-mail: nikalaptova@gmail.com.

Лебедев Геннадий Григорьевич – инженер, ООО «Челябинский тракторный завод - УРАЛТРАК», г. Челябинск, Россия.

Логинов Александр Юрьевич – начальник отдела, отдел разработки программного обеспечения, АО «ОКБ «Новатор», г. Екатеринбург, Россия. E-mail: loginovayu@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1082-1991>.

Ложкин Игорь Александрович – соискатель, кафедра автоматизированного электропривода и мехатроники, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия. E-mail: i.lozhkin@magtu.ru.

Матренин Павел Викторович – канд. техн. наук, старший преподаватель, кафедра систем электроснабжения предприятий, Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5704-0976>.

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

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

Обабков Илья Николаевич – канд. техн. наук, доцент, директор института радиоэлектроники и информационных технологий, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7410-2822>.

Петушков Михаил Юрьевич – д-р техн. наук, доцент, профессор, кафедра электроники и микроэлектроники, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия. E-mail: petushkov_m@mail.ru.

Русина Анастасия Георгиевна – д-р техн. наук, профессор, заведующая кафедрой электрических станций, Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2591-4162>.

Сандыбаева Аида Рысмаговна – старший преподаватель, кафедра электромеханики, Кыргызский государственный технический университет имени И. Раззакова, г. Бишкек, Кыргызстан. E-mail: aida.kgtu@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1097-0989>.

Сарваров Анвар Сабулханович – д-р техн. наук, профессор, кафедра автоматизированного электропривода и мехатроники, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия. E-mail: anvar@magtu.ru.

Сапилова Алина Анатольевна – инженер, кафедра информатики и вычислительной техники, Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия. E-mail: alinka.s97@mail.ru.

Сафаралиев Муродбек Холназарович – инженер-исследователь, кафедра автоматизированных электрических систем, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия.

Семененко Сергей Игоревич – старший преподаватель, кафедра автоматизированных электрических систем, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9813-9067>.

Синюков Алексей Владимирович – аспирант, кафедра электропривода, Липецкий государственный технический университет, г. Липецк, Россия. E-mail: zeitsn@yandex.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6772-5370>.

Синюкова Татьяна Викторовна – канд. техн. наук, доцент, кафедра электропривода, Липецкий государственный технический университет, г. Липецк, Россия. E-mail: Stw0411@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9478-2477>.

Сорокин Никита Сергеевич – электромонтер по ремонту и обслуживанию электрооборудования, ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: sorokin540@yandex.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4380-1735>.

Тавлинцев Александр Сергеевич – доцент, кафедра автоматизированных электрических систем, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0592-845X>.

Тюньков Дмитрий Александрович – ассистент, кафедра информатики и вычислительной техники, Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия. E-mail: dmitry.tyunkov@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6496-7956>.

Хамитов Рустам Нуриманович – д-р техн. наук, профессор, кафедра электрической техники, Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия. E-mail: apple_27@list.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9876-5471>.

Храмшин Вадим Рифхатович – д-р техн. наук, профессор, кафедра электроснабжения промышленных предприятий, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия. E-mail: hvrmgn@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0972-2803>.

Худжасаидов Джахонгир Худжасаидович – канд. техн. наук, доцент, кафедра электрических станций, Таджикский технический университет имени академика М. С. Осими, г. Душанбе, Таджикистан. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3433-9742>.

Уважаемые коллеги!

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

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

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

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

05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты (технические науки);

05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы (технические науки);

05.09.10 – Электротехнология (технические науки);

05.09.12 – Силовая электроника (технические науки);

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

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

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

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

05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы (технические науки)

05.14.04 – Промышленная теплоэнергетика (технические науки).

Журнал публикует научные работы по следующим рубрикам:

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

Публикация статей является бесплатной.

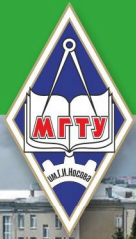
Статьи, направленные в адрес журнала, проходят обязательное научное рецензирование и редактирование. Несоответствие материалов требованиям к статьям может служить поводом для отказа в публикации.

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

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

Пакет подаваемых документов:

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



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



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

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

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



Перечень направлений подготовки в рамках НОЦ для бакалавров и магистрантов:

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

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

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