

— ЭлСиК —

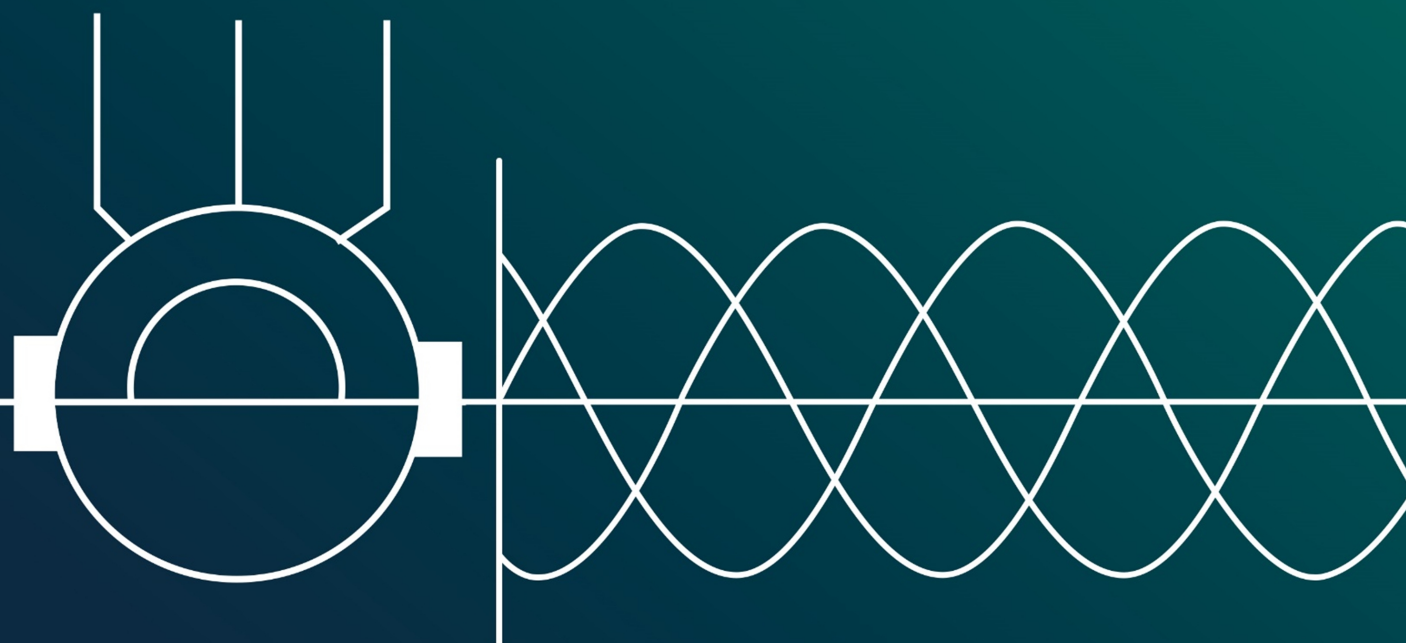
ISSN 2311-8318

ISSN (online) 2658-3151

ЭЛЕКТРО- ТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

№ 1(58)

2023 г.



ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

ИЗДАЕТСЯ С ЯНВАРЯ 1996 Г.

№ 1(58), МАРТ 2023

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

Редакционная коллегия

Главный редактор:

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

Ответственный редактор:

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

Члены редколлегии:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Технические редакторы:

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

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

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

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

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

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

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

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

Адрес редакции:

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

Адрес издателя:

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

Адрес типографии:

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

Выход в свет 27.03.2023. Заказ 89. Тираж 500 экз.
Цена свободная.

ELECTROTECHNICAL SYSTEMS AND COMPLEXES

PUBLISHED SINCE JAN., 1996

NO. 1(58), MARCH, 2023

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

Editorial Board

Editor in Chief:

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

Executive Editor:

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

Editor Board Members:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Technical Editors:

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

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

© FSBEI HE NMSTU, 2023

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

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

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

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

The publisher:

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

The editorial office:

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

The printing-office:

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

Publication date: 27.03.2023. Order 89. Circulation: 500.
Open price.

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА	4
<i>Попова В. С., Соловьев В.А.</i>	
Разработка модели системы прогнозирования гололёдообразования.....	4
<i>Кацай А.В., Шевлюгин М.В.</i>	
Утилизация избыточной рекуперации в контактной сети электротранспорта при зарядке стационарного накопителя	10
<i>Лыгин М.М.</i>	
Повышение энергоэффективности электростанций за счёт использования принципа частотно-каскадного регулирования группы приводов питательных насосов.....	21
<i>Назирова Х.Б., Абдулкеримов С.А., Ганиев З.С., Джурарев Ш.Дж., Ахеев Дж.С.</i>	
Оценка режима работы инверторов солнечных электростанций с точки зрения обеспечения качества электроэнергии.....	31
<i>Кондрашова Ю.Н., Шалимов А.В., Третьяков А.М., Снигур А.</i>	
Оценка вариантов реконструкции схемы электропитания для шламовой насосной с целью повышения резервирования ответственных потребителей кислородно-конвертерного цеха	39
ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА.....	49
<i>Сенцов Е.В., Мещеряков В.Н.</i>	
Моделирование бездатчиковой системы управления электропривода печного рольганга с применением нейросетевых объектов	49
ИНФОРМАЦИОННОЕ, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ	57
<i>Андреев С.М., Прасолов А.С., Бондарев И.С., Швидченко Н.В.</i>	
Интеллектуальная система автоматической коррекции длительности периодов для воздухоподогревателей доменной печи с учетом их реального состояния	57
ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА, АВТОМАТИКА И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ	67
<i>Ульянов А.В., Копытов С.М.</i>	
Пример реализации скалярного управления с упрощённой пространственно-векторной широко-импульсной модуляцией на языке описания аппаратуры verilog	67
МОНИТОРИНГ, КОНТРОЛЬ И ДИАГНОСТИКА ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ.....	76
<i>Хазиева Р.Т., Павлова З.Х., Сердюк А.А., Мухаметшин А.В.</i>	
Разработка и исследование датчиков тока для защиты источника регулируемого напряжения резонансной испытательной установки.....	76
<i>Пилугин Г.А., Пантелеев В.И., Филатов А.Н.</i>	
Методика оценки состояния синхронного двигателя при изменении управляющих воздействий	84
СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	92

CONTENT

ELECTRICAL ENGINEERING	4
<i>Popova V.S., Solovyev V.A.</i>	
Development of the Ice Formation Forecasting System Model	4
<i>Katsay A.V., Shevlyugin M.V.</i>	
Excessive Recovery Disposal in the Contact Network of Electric Vehicles When Charging a Stationary Storage Device	10
<i>Lygin M.M.</i>	
Improving the Power Plant Energy Efficiency Through the Use of Frequency-Cascade Regulation Principle for Feed Pump Drives	21
<i>Nazirov Kh.B., Abdulkarimov S.A., Ganiev Z.S., Juraev Sh.D., Akheev J.S.</i>	
Inverter Operating Mode Evaluation of Solar Power Plants from the Power Quality Viewpoint	31
<i>Kondrashova Yu.N., Shalimov A.V., Tretyakov A.M., Snigur A.</i>	
Option Evaluation for Power Supply Scheme Reconstruction for Slurry Pumping Station in Order to Increase the Redundancy of Critical Consumers at Oxygen Converter Shop	39
THEORY AND PRACTICE OF AUTOMATED ELECTRIC DRIVE	49
<i>Sentsov E.V., Meshcheryakov V.N.</i>	
Simulation of Electric Drive Sensorless Control System for the Furnace Roller Table Using Neural Network Objects	49
TECHNICAL SYSTEMS DATAWARE AND SOFTWARE	57
<i>Andreev S.M., Prasolov A.S., Bondarev I.S., Shvidchenko N.V.</i>	
Intelligent Automatic Correction System of Period Duration for Hot Blast Stoves Taking into Account Their Real-Life State	57
POWER ELECTRONICS, AUTOMATION AND CONTROL SYSTEMS.....	67
<i>Ulyanov A.V., Kopytov S.M.</i>	
Scalar Control Implementation with a Simplified Space-Vector Pulse-Width Modulation in the Description Language of Verilog Device.....	67
MONITORING, DIAGNOSTICS AND CONTROL OF ELECTRIC EQUIPMENT	76
<i>Khazieva R.T., Pavlova Z.Kh., Serdyuk A.A., Mukhametshin A.V.</i>	
Development and Research of Current Sensors to Protect the Supply of Adjustable Voltage of a Resonant Test Device.....	76
<i>Pilyugin G.A., Panteleev V.I., Filatov A.N.</i>	
Method for Assessing the Synchronous Motor State when Control Actions Change	84
INFORMATION ABOUT THE AUTHORS	92

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ СИСТЕМЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ГОЛОЛЁДООБРАЗОВАНИЯ

В статье рассмотрен один из возможных вариантов расширения имеющейся системы прогнозирования гололедообразования на проводах ЛЭП с использованием нечётких идентификаторов. Этот вариант подразумевает использование второстепенных параметров, влияющих на процесс ледообразования, таких как атмосферное давление на уровне станции, дефицит насыщения, облачность, погода в срок наблюдения, геофизические параметры местности. В статье описана настройка нечеткого идентификатора, входными переменными которого являются атмосферное давление на уровне станции и дефицит насыщения. Показано распределение функций принадлежности входных и выходных переменных этого нечёткого идентификатора. Приведена база правил этого нечёткого идентификатора. Показано влияние весового коэффициента на возмущающее воздействие на выходную переменную этого идентификатора, а также сделан выбор весового коэффициента для него. Проведено моделирование выходной переменной (диаметр отложения) при подстановке на входы модели статистических данных для станции Братолюбковка Ромненского района, Зейя Зейского района Амурской области, Большой Шантар Тугуро-Чумиканского района, Николаевск Николаевского района, Елабуга Хабаровского района Хабаровского края. Найдено среднее отклонение смоделированной величины от статистической по всем вышеперечисленным станциям. Сделан вывод о том, что на данных метеостанциях дополнительное влияние на процесс гололедообразования оказывают ещё не рассмотренные второстепенные параметры. Показано, что введение в систему прогнозирования гололедообразования дополнительных нечетких идентификаторов позволяет учесть дополнительные параметры, влияющие на процесс гололедообразования. В качестве входных данных этих идентификаторов целесообразно будет рассмотреть расстояние от ЛЭП до лесополосы, высоту над уровнем моря, «облачность» и «осадки», в качестве же выходных данных этих идентификаторов рассмотрим скорость ветра. В заключении статьи приведена результирующая система прогнозирования гололедообразования.

Ключевые слова: моделирование, прогнозирование, гололедообразование, ЛЭП, нечёткий идентификатор, нечёткая логика, функции принадлежности, метеостанции, статистические данные, интеллектуальная система

ВВЕДЕНИЕ

Проблематика создания математического описания прогнозирующей модели гололедообразования достаточно подробно освещена в [1, 2]. Так, например, в [1] показано, что установить однозначную аналитическую зависимость между выходной величиной гололеда (массой, диаметром обледенения) и хотя бы одним параметром, оказывающим влияние на процесс обледенения (температура воздуха, скорость ветра и направление, относительная влажность, парциальное давление, дефицит насыщения, атмосферное давление) практически невозможно. Поскольку каждый из связанных параметров нелинейно и неоднозначно влияет на процесс обледенения, необходимо использовать нетрадиционные подходы для разработки модели процесса гололедообразования.

Материал, изложенный в [2], предлагает один из возможных вариантов построения системы прогнозирования на основе нечёткого подхода. Анализ этого материала показывает, что реализация системы прогнозирования с использованием базовых параметров не позволяет добиться полного соответствия между прогнозируемой величиной, снимаемой с модели и реальными значениями с метеостанций. Отклонение выходной величины модели системы прогнозирования – диаметра гололеда – от статистических данных составляло порядка 15%. Это подтверждает тот фактор, что на формирование массы гололеда оказывают влияние не только базовые параметры, на которые опирались при разработке имитационной модели, но и

второстепенные. Дальнейшее уточнение разрабатываемой модели будем проводить последовательно, вводя в структуру модели дополнительные элементы. При этом введение каждого дополнительного элемента будем оценивать в рамках его влияния на физический процесс ледообразования.

На текущем этапе предполагается учесть в модели прогнозирования гололедообразования такие параметры, как атмосферное давление на уровне станции, дефицит насыщения, облачность (все виды), погода в срок наблюдения (наличие или отсутствие осадков), геофизические параметры местности.

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ СИСТЕМЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ГОЛОЛЁДООБРАЗОВАНИЯ

В качестве учёта дополнительных параметров в модель, описанную в [2], введем нечёткий идентификатор. Входными параметрами этого идентификатора на первом этапе будут являться атмосферное давление на уровне станции и дефицит насыщения. Построение данного идентификатора будем осуществлять по принципу, изложенному в [3].

Настройка идентификатора показана на **рис. 1, 2**. Диапазон изменения дефицита насыщения – от 0 до 0,8 гПа, однако наибольшая кучность функций принадлежности (3 из 4) находится в диапазоне от 0 до 0,5 гПа. Диапазон изменения атмосферного давления на уровне станции от 975 до 1029 мм рт. ст. Все 4 функции принадлежности находятся внутри этого диапазона.

Выходные переменные нечёткого идентификатора приравнены к диаметру гололеда из статистической базы, состоят из четырёх термов и равны $mf1=5$ мм, $mf2=6$ мм, $mf3=7$ мм, $mf4=8$ мм.

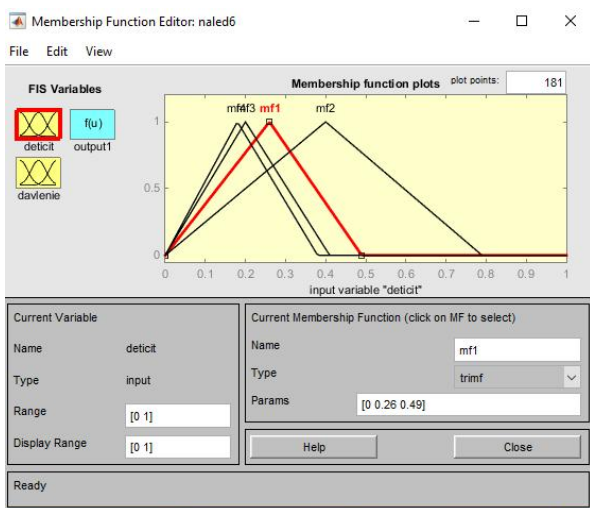


Рис. 1. Распределение нечётких термов входной переменной «Дефицит насыщения» нечеткого контроллера «Fuzzy logic controller5»

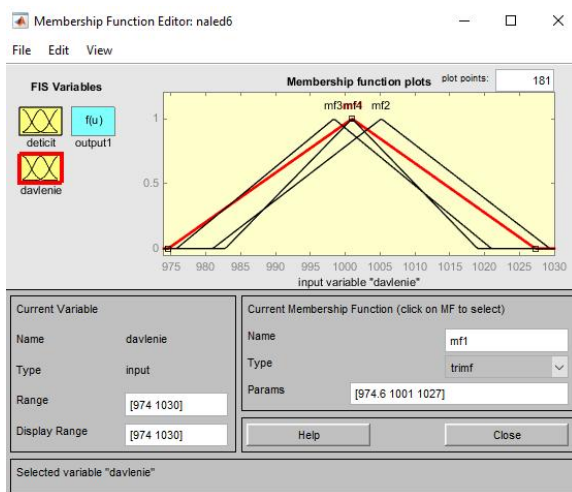


Рис. 2. Распределение нечётких термов входной переменной «Атмосферное давление на уровне станции» нечеткого контроллера «Fuzzy logic controller5»

Распределение нечётких термов входной переменной строится на анализе статистических данных с помощью муравьиного алгоритма аналогично распределению, приведенному в [3].

В силу того, что указанные выше параметры являются второстепенными, то в общей системе учёт данных параметров будем реализовывать в виде блока возмущения, сигнал которого поступает в общий блок прогнозирования.

Как и все предыдущие блоки системы прогнозирования, данный блок должен иметь свой весовой коэффициент. Для выбора весового коэффициента на возмущающее воздействие случайным образом выберем один зафиксированный случай гололедообразования для каждой метеостанции, по которой имеются статистические данные. Подадим на входы модели статистические данные и определим отклонение выходной величины от реальных данных при различных весовых коэффициентах на возмущающее воздействие (табл. 1).

В табл. 1 приведены следующие сокращения:

- K_V – коэффициент к возмущающему воздействию;
- t_{nach} – температура воздуха в начале нарастания отложения, °C;

- N_{nach} – направление ветра в начале нарастания отложения, град;
- H – относительная влажность воздуха, %;
- D – диаметр отложения, мм;
- Pr_1 – продолжительность стадии нарастания, ч;
- v_{sn} – скорость стадии нарастания, мм/ч;
- D_n – дефицит насыщения, гПа;
- P_s – атмосферное давление на уровне станции, мм рт. ст.;
- D_m – диаметр отложения согласно моделированию в программном комплексе *Matlab*, мм;
- $\Delta\%$ – процент отклонения смоделированного диаметра от статистического, %

Как видно из табл. 1, результаты моделирования при весовом коэффициенте на возмущающее воздействие, равном 0,1, имеют лучший результат. Процент отклонения смоделированного диаметра отложения от статистического составляет 1%.

Проведем моделирование системы для оценки влияния остальных дополнительных параметров (атмосферное давление на уровне станции, дефицит насыщения) на конечный результат [5-9]. В табл. 2 приведены статистические значения метеостанции Братолюбовка, а также результаты исследования выходной переменной (диаметр отложения) при подстановке в модель на входы статистических данных. Среднее отклонение смоделированной величины от статистической – 8,28%. Это полная система с учетом дополнительного параметра.

Также было проведено моделирование системы для станций Большой Шантар, Елабуга, Николаевск и Зей. Среднее отклонение смоделированной величины от статистической по станции Большой Шантар – 4,44%, по станции Елабуга – 10,22%, по станции Николаевск – 10,22%, по станции Зей – 8,18%.

Анализ результатов моделирования говорит о том, что несмотря на то, что по некоторым метеостанциям величина отклонения составляет незначительную величину от среднестатистической, на ряде других станций она всё-таки существенна. Следовательно, на данных метеостанциях дополнительное влияние на процесс гололедообразования оказывают ещё не рассмотренные параметры. Анализ географического месторасположения метеостанций указывает на то, что они находятся в существенно различных условиях.

В [4] описывается влияние расположения лесополосы от проводов с обледенением на скорость ветра, которая, в свою очередь, влияет на процесс гололедообразования. Автор, ссылаясь на статистику по метеостанциям, делает вывод о том, что в непосредственной близости от лесополосы (1 м и менее) скорость ветра снижается практически до нуля. На расстоянии 3 м скорость ветра снижается на 84%, на расстоянии 7 м – до 57%, на расстоянии 11 м – на 34%. При удалении лесного массива более чем на 20 м скорость ветра остается такой же, как на открытой местности.

Таблица 1
Влияние весового коэффициента на возмущающее воздействие на выходную переменную для станции Братолюбовка

K_V	t_{nach}	N_{nach}	H	D	Pr_1	v_{sn}	D_n	P_s	D_m	$\Delta\%$
0,05	-26,70	107	75	5	3	1,67	0,17	995,30	4,7	-6
0,1	-26,70	107	75	5	3	1,67	0,17	995,30	4,95	-1
0,15	-26,70	107	75	5	3	1,67	0,17	995,30	5,2	4
0,2	-26,70	107	75	5	3	1,67	0,17	995,30	5,6	12
0,25	-26,70	107	75	5	3	1,67	0,17	995,30	5,95	19

Таблица 2

Результаты исследования выходной переменной (диаметр отложения) при подстановке на входы модели статистических данных для станции Братолюбовка

t_{nach}	N_{nach}	H	D	Pr_1	v_{sn}	D_n	P_s	D_m	$\Delta\%$
-27,50	275	73	5	5	1,00	0,18	993,6	4,3	14,0
-22,80	352	79	5	5	1,00	0,21	988,4	6	20,0
-27,20	258	75	5	6	0,83	0,17	989	4,3	14,0
-24,70	326	77	5	6	0,83	0,19	999,5	4,3	14,0
-26,70	107	75	5	3	1,67	0,17	995,3	4,9	2,0
-19,6	0	99	5	3	1,67	0	993,4	4,3	14,0
-22,0	108	96	5	3	1,67	0,05	988,2	5,4	8,0
-14,0	0	70	5	14	0,36	0,91	988,6	4,5	10,0
-30,6	246	72	5	6	0,83	0,14	992	4,3	14,0
-18,2	169	97	5	5	1,00	0,07	974,6	4,1	18,0
-12,4	322	88	5	5	1,00	0,24	983,4	4,5	10,0
-12,3	226	98	5	2	2,50	0	986,1	4,5	10,0
-27,6	298	87	5	6	0,83	0,1	994,4	4,3	14,0
-13,4	99	95	5	8	0,63	0,08	992,8	6	20,0
-34,4	276	83	5	5	1,00	0,05	991,4	4,3	14,0
-31,8	0	81	5	6	0,83	0,09	1002,3	5,5	10,0
-28,0	225	84	5	5	1,00	0,09	990,8	4,3	14,0
-15,4	315	96	5	3	1,67	0,09	991,9	4,8	4,0
-18,0	135	88	5	5	1,00	0,2	975,2	5,6	12,0
-19,6	311	89	5	4	1,25	0,13	993,3	5,5	10,0
-30,9	108	84	5	4	1,25	0,07	987,7	5	0,0
-13,3	292	95	5	5	1,00	0,11	992,3	4,3	14,0
-16,5	67	91	5	6	0,83	0,17	985,2	5,4	8,0
-15,5	202	94	5	3	1,67	0,09	987,2	5	0,0
-12,3	292	96	5	6	0,83	0,12	977,3	4,3	14,0
-4,9	0	100	5	9	0,56	0	988,7	5,5	10,0
-22,7	104	78	6	5	1,20	0,22	985,6	6,2	3,3
-22,0	0	79	6	8	0,75	0,22	990,1	6	0,0
-24,9	307	76	6	5	1,20	0,2	989,2	6	0,0
-18,2	102	82	6	5	1,20	0,25	992	6,4	6,7
-28,7	123	74	6	8	0,75	0,15	993,6	5,3	11,7
-17,8	258	86	6	5	1,20	0,21	989,5	6	0,0
-24,9	0	86	6	3	2,00	0,12	1000,8	5	16,7
-31,8	0	82	6	5	1,20	0,09	981,2	5,9	1,7
-8,8	0	100	6	3	2,00	0	982,7	6,1	1,7
-28,8	0	87	6	3	2,00	0,09	998,9	5,2	13,3
-20,8	0	88	6	6	1,00	0,12	985,9	6	0,0
-13,1	142	91	6	9	0,67	0,22	980,7	6,2	3,3
-10,8	0	93	6	6	1,00	0,13	989,7	6,3	5,0
-17,9	112	94	6	6	1,00	0,08	993,4	6,5	8,3
-17,7	273	83	7	7	1,00	0,26	987,3	6,4	8,6
-13,5	271	86	7	9	0,78	0,31	981,3	6	14,3
-15,3	0	94	7	3	2,33	0,09	975,8	6,2	11,4
-3,5	0	97	7	3	2,33	0,15	983,6	7,1	1,4
-17,7	315	96	7	10	0,70	0,08	991,8	7,2	2,9
-17,8	337	95	7	9	0,78	0,08	980,8	7,4	5,7
-14,8	247	88	8	9	0,89	0,24	982,8	8,7	8,7
-20,3	173	84	8	6	1,33	0,2	989,1	8,1	1,3
-22,3	125	89	8	9	0,89	0,1	994,3	8	0,0
-22,4	45	86	8	8	1,00	0,15	984,2	8,4	5,0
-21,7	0	94	8	6	1,33	0,05	989,1	8	0,0
-25,9	0	86	8	5	1,60	0,11	993,5	7	12,5
-21,7	250	86	8	9	0,89	0,16	995,8	8,4	5,0
-20,9	285	90	8	8	1,00	0,11	990,1	7,2	10,0
-14,0	315	95	8	8	1,00	0,1	989,6	8,4	5,0

Для настройки нечеткого идентификатора *Fuzzy logic controller8* используем данные, описанные выше. Входными данными будет расстояние до лесополосы, выходными данными – скорость ветра. Настройка не-

четкого идентификатора представлена на рис. 3, 4.

Кроме того, автор [4] рассматривает влияние высоты над уровнем моря на скорость ветра. На основании данных [4] можно определить относительное влияние высоты над уровнем моря на величину скорости ветра в относительных единицах.

Данное влияние учтём в виде блока нечеткого идентификатора *Fuzzy logic controller9* с входным параметром – высота над уровнем моря, выходным параметром – скорость ветра. Настройка нечеткого идентификатора представлена на рис. 5, 6.

Выходы обоих идентификаторов представляют собой относительную величину корректировки скорости ветра. Они перемножаются между собой и умножаются на параметр «скорость ветра», подающийся на вход возмущающего воздействия «*Fuzzy logic controller3*».

Подобным способом введем в модель влияние параметра «облачность» и «осадки» как процентную корректировку к параметру «влажность воздуха». Данные для создания идентификатора возьмем из статистических данных.

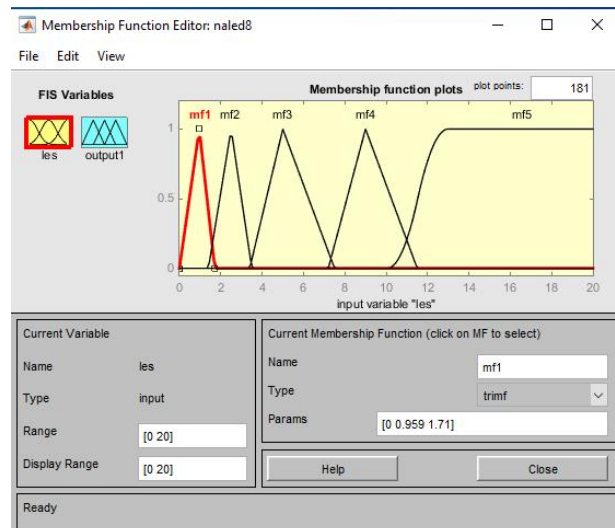


Рис. 3. Распределение нечетких термов входной переменной «Расстояние до лесополосы» нечеткого контроллера «*Fuzzy logic controller8*»

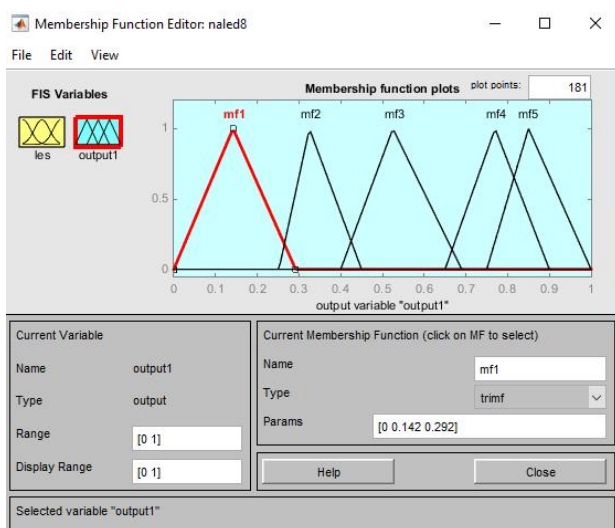


Рис. 4. Распределение нечетких термов выходной переменной «Скорость ветра» нечеткого контроллера «*Fuzzy logic controller8*»

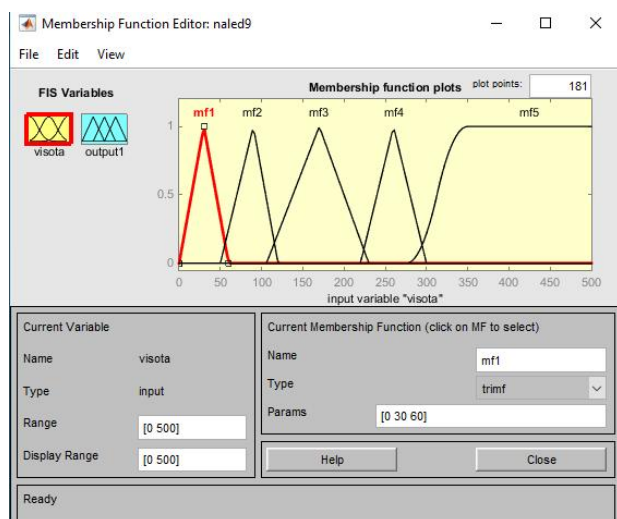


Рис. 5. Распределение нечётких термов входной переменной «Высота над уровнем моря» нечеткого контроллера «Fuzzy logic controller9»

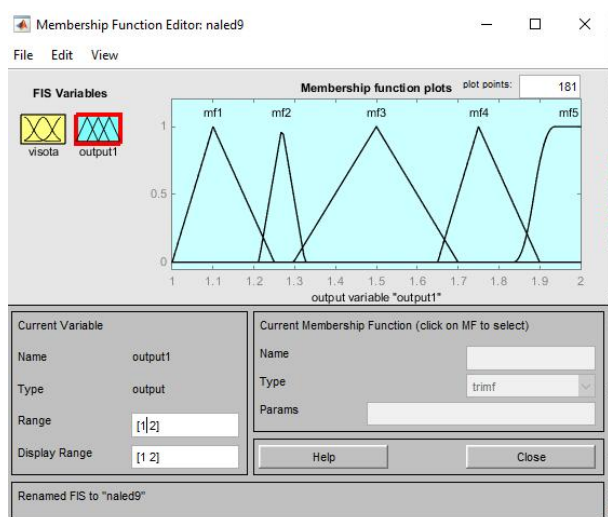


Рис. 6. Распределение нечётких термов выходной переменной «Скорость ветра» нечеткого контроллера «Fuzzy logic controller9»

Согласно статистическим данным, облачность и осадки присутствуют не во всех случаях гололёдообразования. Однако во всех случаях выпадения снега наблюдается облачность в 10 баллов, то есть небо затянуто облаками полностью. Таким образом, можно сделать вывод о том, что наличие облачности и осадков взаимосвязано, а также оказывает влияние на относительную влажность воздуха. Влияние облачности представим в виде нечеткого идентификатора *Fuzzy logic controller7*, настроенного на основании статистических данных. Настройка нечеткого идентификатора представлена на рис. 7, 8.

Влияние осадков представим в виде блоков *Subsystem2* и *Subsystem3*. Всего в статистических данных присутствует два вида осадков – снег и туман. Поэтому создадим часть модели, в которой блок *Subsystem2* будет отвечать за параметр «снег», а блок *Subsystem3* будет отвечать за параметр «туман».

Фрагмент модели, представленный на рис. 9, работает следующим образом: если снег идет, то коэффициент к влажности воздуха принимается равным 1,2, если нет, то равным 1. Если есть туман, то коэффициент к влажности воздуха принимается равным 1,1, если нет, то равным 1. Значение данного блока умножается

с блоком идентификатора, отвечающим за облачность, и умножается на входной параметр влажности воздуха.

Таким образом, на основании вышеизложенного результирующая система прогнозирования гололёдообразования может быть представлена в виде, показанном на рис. 10.

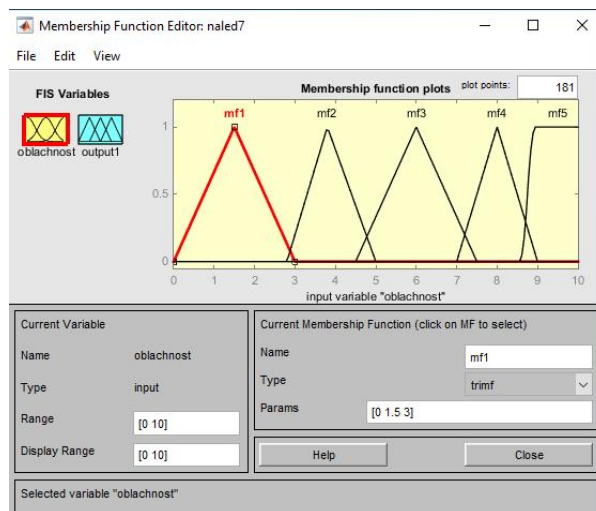


Рис. 7. Распределение нечётких термов входной переменной «Облачность» нечеткого контроллера «Fuzzy logic controller7»

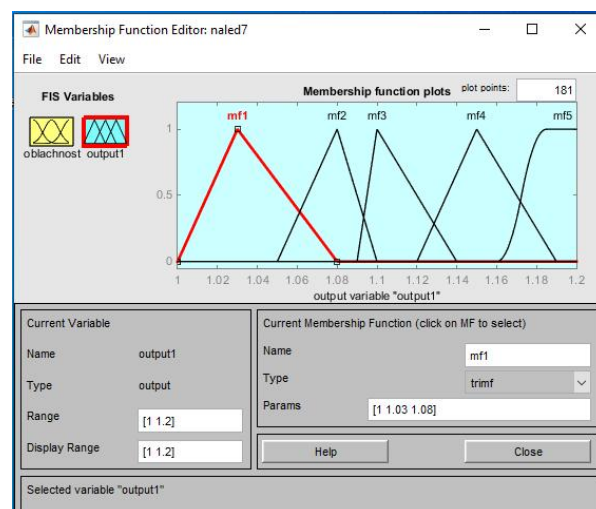


Рис. 8. Распределение нечётких термов выходной переменной «Скорость ветра» нечеткого контроллера «Fuzzy logic controller7»

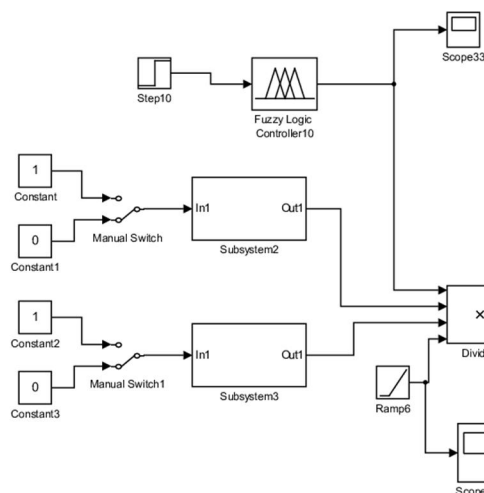


Рис. 9. Фрагмент модели, отвечающий за влияние осадков

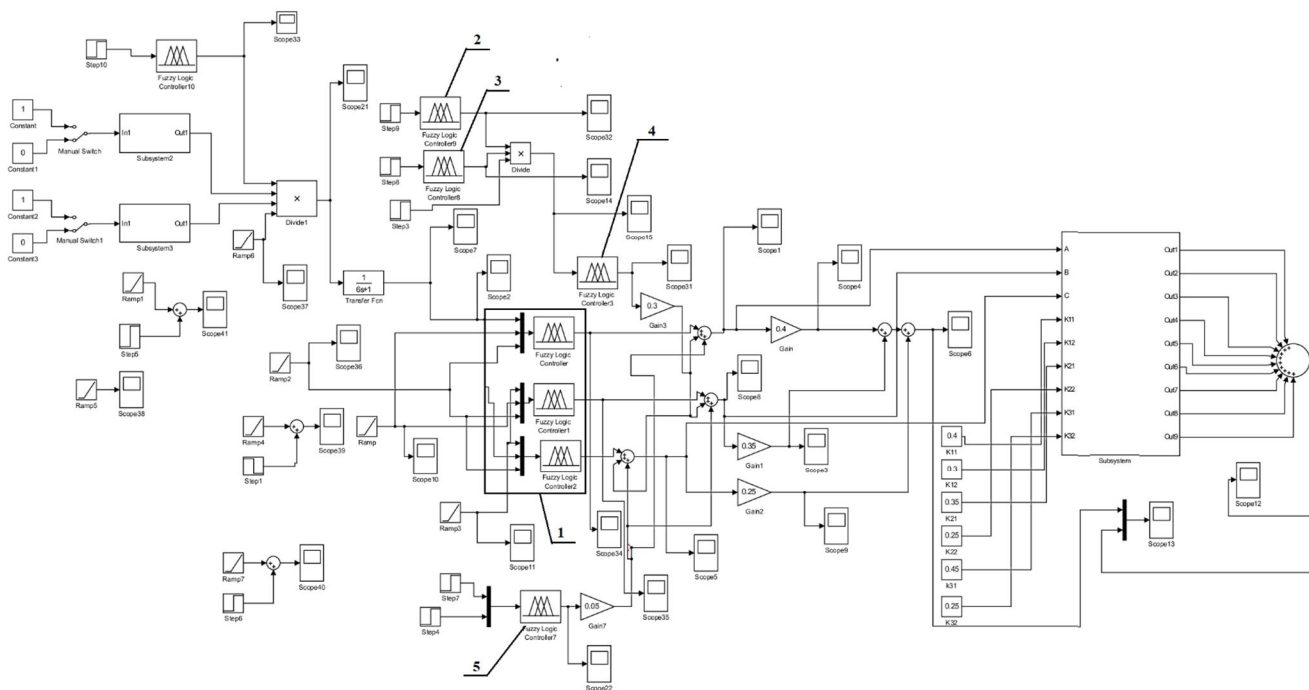


Рис. 10. Модель прогнозирования гололёдообразования: 1 – группа основных контроллеров Fuzzy logic controller, Fuzzy logic controller1, Fuzzy logic controller2; 2 – Fuzzy logic controller8 (отвечает за влияние на скорость ветра облачности и удаленности от лесополосы); 3 – Fuzzy logic controller7 (отвечает за влияние на скорость ветра атмосферного давления); 4 – Fuzzy logic controller4 (возмущающее воздействие в виде скорости ветра); 5 – Fuzzy logic controller5 (отвечает за влияние на систему дефицита насыщения)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты апробации данной системы показали её работоспособность и удовлетворительную сходимость с набором статистических данных, участвующих в процессе гололёдообразования. Полученные результаты говорят о том, что подход правомерен, обеспечивает точность отработки системы нечеткой идентификации не менее чем в 10 %.

Проведённое исследование системы нечеткой идентификации в различных условиях показало, что созданная система прогнозирования позволяет оценить скорость изменения процесса гололёдообразования при вариации входных параметров, а также оценить влияние каждого из входных параметров на скорость изменения гололёдообразования и на размер выходной величины.

Отчетное исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, проект № 19-38-90129.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Popova V.S., Solovyev V.A. Opportunity Analysis of Mathematic Description for Ice-Accretion // International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). IEEE, 2020. doi: 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271254
2. Popova V.S., Solovyev V.A. Synthesis of an ETL Icing Forecasting System // SMART Automatics and Ener-

- gy. Smart Innovation, Systems and Technologies. 2022. Vol. 272. Pp. 723-735. doi: 10.1007/978-981-16-8759-4_75
3. Popova V.S., Solovyev V.A. Applying Computational Algorithms to Determine the Probabilistic Range of Fuzzy Identifier Membership Functions for the Ice Prediction Module// International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). IEEE, 2020. doi: 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271189
4. Бучинский В.Е. Гололед и борьба с ним. Л.: Гидрометеиздат, 1960. 192 с.
5. Кудинов Ю.И. Нечёткие системы управления // Техническая кибернетика. 1990. № 5. С. 196-201.
6. Мелихов А.Н., Берштейн Л.С., Корвин С.Я. Ситуационные советующие системы с нечёткой логикой. М.: Наука, 1990. 272 с.
7. Килин П.М., Чекмарева Н.И. Статистические методы обработки данных. Тюмень: ТюмГНГУ, 2013. 128 с.
8. Зубова Н.В., Рудых В.Д. Поиск оптимальных функций принадлежности нечетких множеств для оптимизации систем управления ветроэнергетической установкой // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. 2018. №95. С. 51-55. doi: 10.24411/0131-5226-2018-10031
9. Боронихина Е.А. «Муравьиный» алгоритм для решения задачи коммивояжера // Математическое и программное обеспечение информационных, технических и экономических систем: материалы II Всероссийской молодежной научной конференции с международным участием. Томск, 2014.

Поступила в редакцию 14 ноября 2022 г.

Принята к печати 30 декабря 2022 г.

INFORMATION IN ENGLISH

DEVELOPMENT OF THE ICE FORMATION FORECASTING SYSTEM MODEL

Valeriya S. Popova

Postgraduate student, Komsomolsk-on-Amur State Technical University, Komsomolsk-on-Amur, Russia, <https://orcid.org/0000-0002-1874-0598>

Vyacheslav A. Solovyev

D.Sc. (Engineering), Professor, Head of the Department, Electric Drive and Automation of Industrial Installations Department, Komsomolsk-on-Amur State Technical University, Komsomolsk-on-Amur, Russia, epapu@knastu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7930-0601>

The article considers one of the possible options for expanding the existing system for predicting icing on power line wires using fuzzy identifiers [2]. This option implies the use of secondary parameters that affect the ice formation process, such as atmospheric pressure at the station level, saturation deficit, cloudiness, weather at the observation time and the local geophysical parameters. The article describes the setting of a fuzzy identifier, with such input variables as the atmospheric pressure at the station level and the saturation deficit. The membership function distribution for input and output variables of this fuzzy identifier is shown. The rule database of this fuzzy identifier is given. The influence of the weighting factor on the perturbing effect on the output variable of this identifier is shown, and the weighting factor choice for it is also made. The modeling of the output variable (deposit diameter) was carried out by substituting statistical data for the Bratolyubovka, Bolshoy Shantar, Yelabuga, Nikolaevsk and Zeya stations into the model inputs. The average deviation of the simulated value from the statistical value was found for all the above stations. It is concluded that at these meteorological stations an additional influence on the process of icing is exerted by secondary parameters that have not yet been considered. It is shown that the introduction of additional controllers into the icing prediction system makes it possible to take into account additional parameters that affect the icing process. As the input data of these fuzzy identifiers, it would be advisable to consider the distance from the power line to the forest belt, height above sea level, cloudiness and precipitation, as the output data of these fuzzy identifiers, and also consider the wind speed. In conclusion, the article presents the resulting system for forecasting icing.

Keywords: modeling, forecasting, icing, power line, fuzzy identifier, fuzzy logic, membership functions, weather stations, statistical data, intelligent system

REFERENCES

1. Popova V.S., Solovyev V.A. Opportunity Analysis of Mathematical Description for Ice-Accretion. International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). IEEE, 2020. doi: 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271254
2. Popova V.S., Solovyev V.A. Synthesis of an ETL Icing Forecasting System. SMART Automatics and Energy. Smart Innovation, Systems and Technologies. 2022, vol. 272, pp. 723-735. doi: 10.1007/978-981-16-8759-4_75
3. Popova V.S., Solovyev V.A. Applying Computational Algorithms to Determine the Probabilistic Range of Fuzzy Identifier Membership Functions for the Ice Prediction Module. International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). IEEE, 2020. doi: 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271189
4. Buchinsky V.E. *Gololed i borba s nim* [Icing and protection from it]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1960. 192 p. (In Russian)
5. Kudinov Yu.I. Fuzzy control systems. *Tekhnicheskaya kibernetika* [Technical cybernetics], 1990, no. 5, pp. 196-201. (In Russian)
6. Melikhov A.N., Bershtein L.S., Korovin S.Ya. *Situatsionnye sootvetstvuyushchie sistemy s nechetkoy logikoy* [Situational advising systems with fuzzy logic]. Moscow, Nauka Publ., 1990. 272 p. (In Russian)
7. Kilin P.M., Chekmareva N.I. *Statisticheskie metody obrabotki dannykh* [Statistical methods of data processing]. Tyumen, TSOGU Publ., 2013. 128 p. (In Russian)
8. Zubova N.V., Rudykh V.D. Search for optimal membership functions of fuzzy sets for optimizing wind turbine control systems. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktov rastenievodstva i zhivotnovodstva* [Technologies and technical means of mechanized production of crop and livestock products], 2018, no. 95, pp. 51-55. (In Russian)
9. Boronikhina E.A. Ant algorithm for solving the traveling salesman problem. *Matematicheskoe i programnoe obespechenie informatsionnykh, tekhnicheskikh i ekonomicheskikh sistem: materialy II Vserossiyskoy molodeshnoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Materials of the II All-Russian Youth Scientific Conference with international participation "Mathematical and software support for information, technical and economic systems"]. Tomsk, 2014. (In Russian)

Попова В.С., Соловьев В.А. Разработка модели системы прогнозирования гололёдообразования // Электротехнические системы и комплексы. 2023. № 1(58). С. 4-9. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-1\(58\)-4-9](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-1(58)-4-9)

Popova V.S., Solovyev V.A. Development of the Ice Formation Forecasting System Model. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2023, no. 1(58), pp. 4-9. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-1\(58\)-4-9](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-1(58)-4-9)

Кацай А.В.¹, Шевлюгин М.В.²¹ ООО «Кинемак», Москва² Российский университет транспорта (МИИТ), Москва

УТИЛИЗАЦИЯ ИЗБЫТОЧНОЙ РЕКУПЕРАЦИИ В КОНТАКТНОЙ СЕТИ ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА ПРИ ЗАРЯДКЕ СТАЦИОНАРНОГО НАКОПИТЕЛЯ

Рассмотрены перетоки энергии рекуперации подвижного состава горьэлектротранспорта в процессе торможения. Определено влияние мощности сетевой нагрузки на направления перетоков полезной рекуперированной энергии при торможении подвижного состава. Проанализированы особенности работы в контактной сети стационарного буферного накопителя энергии НКЭ-3Г маховичного типа. Выведен коэффициент расхода энергии на тягу и нетяговые нужды как собственная характеристика системы выполнения транспортной работы в ГЭТ. Установлена устойчивая статистическая зависимость температуры окружающей среды и соотношения тягового и нетягового энергопотребления транспортной системы при выполнении перевозочной работы. Проанализировано изменение характера энергии избыточной рекуперации тормозящего вагона при перенаправлении её на зарядку стационарного накопителя энергии в контактной сети. Выявлен прежде не описанный в литературе эффект дополнительной экономии энергии стационарным накопителем сверх того, что он выдаёт на нагрузку в контактную сеть ранее запасённую энергию избыточной рекуперации. Дополнительная полезная утилизация мобилизованной избыточной энергии рекуперации возникает в ходе зарядки накопителя, когда часть её непосредственно, то есть без пребывания в накопителе, потребляется нетяговой сетевой нагрузкой, чего не происходит без стационарного накопителя, реализующего функциональный режим управляемой сетевой нагрузки. Данному явлению присвоено название «эффект КБК». Заложена основа способа расчёта количества непосредственного потребления сетевой нагрузкой мобилизованной избыточной энергии рекуперации в ходе зарядки накопителя при современном уровне развития и применения средств учёта в горьэлектротранспорте.

Ключевые слова: рекуперативное торможение, перетоки рекуперативной энергии, полезная и избыточная энергии рекуперации, стационарный накопитель, контактная сеть, тяговая подстанция, подвижной состав, тяговая нагрузка, нетяговая нагрузка, перенаправление избыточной рекуперации

ВВЕДЕНИЕ

Первичным источником энергии для выполнения транспортной работы системой городского электро-транспорта является понизительно-выпрямительная тяговая подстанция (ТП), которая понижает и выпрямляет энергию переменного тока из высоковольтной питающей линии и выдаёт её в виде тока с постоянным напряжением в контактную сеть (КС) на нагрузку [1]. Электроподвижной состав (ЭПС) городского электро-транспорта (ГЭТ), оснащённый транзисторно-инверторными системами управления (ТИСУ) тяговыми электродвигателями способен в ходе рекуперативного торможения преобразовывать механическую энергию линейного движения вагона в электрическую, имеющую напряжение $U_{рек}$ выше такового от тяговой подстанции $U_{ТП}$, позволяющее выдавать эту энергию в контактную сеть, чтобы она могла быть использована на выполнение полезной транспортной работы другими вагонами или стационарной нагрузкой [2-5]. Выдающие электрическую рекуперативную энергию в контактную сеть тормозящие вагоны являются в ней вторичными источниками питания, поскольку часть однажды использованной энергии возвращают на повторное применение. При наличии в контактной сети нагрузки, значение мгновенной мощности которой сопоставимо с мгновенной мощностью рекуперации тормозящего вагона или больше неё, эта энергия рекуперации напрямую потребляется указанной нагрузкой, в силу чего и называется полезной энергией рекуперации. По данным ряда исследователей [6], полезная ре-

куперация может составлять до 30-35% от потреблённой из КС на тягу энергии. В современном метрополитене объём межпоездных перетоков рекуперации достигает 10% от тягового энергопотребления [7, 8].

Исходными данными для исследования послужили непосредственные замеры потребления вагонами энергии на тягу $E_{тяги}$ и выданной в сеть полезной рекуперации $E_{рек-полезн}$. Доля последней составила за 2021 г. 27,3% от первой (**рис. 1**). В рассматриваемой трамвайной системе все вагоны одноплатформенные и оснащены тяговыми преобразователями, позволяющими выдавать рекуперированную энергию в контактную сеть. При отсутствии в сети ТП стационарных накопителей энергии вся выданная в сеть рекуперация $E_{рек-полезн}$ направляется непосредственно на выполнение полезной работы тяговой и нетяговой сетевой нагрузкой.

Если мощность нагрузки в контактной сети недостаточна для приёма всей рекуперированной мощности и отсутствует буферный накопитель, то на клеммах тягового преобразователя тормозящего вагона растёт уровень напряжения и при достижении установленной уставки тормозного прерывателя инвертора $U_{чопп}$ (обычно порядка 720 В) последний подключает к звену постоянного тока инвертора тормозные резисторы, на которых избыточная энергия утилизируется и рассеивается в виде тепла в атмосфере. Этот объём рекуперативной энергии называется избыточным ($E_{рек-изб}$). По данным исследователей этой темы, объём избыточной энергии рекуперации современным ЭПС с ТИСУ может составлять, в зависимости от условий движения, от 10-20 [9] до 15-30% [8] от потребления на тягу.

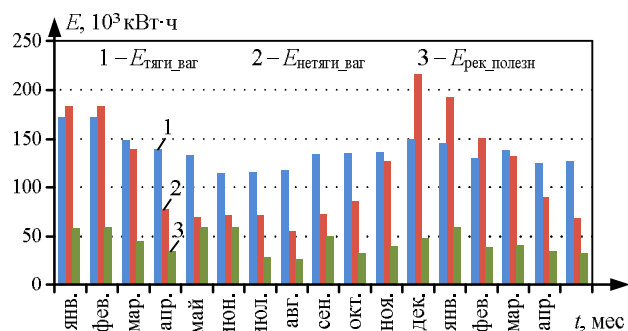


Рис. 1. Диаграмма потребления на тягу, нетяговые нужды сети и рекуперации вагонов на исследуемой подстанции за 17 месяцев (янв. 2021 г. – май 2022 г.)

Баланс выдачи энергии от источников и её потребления нагрузкой, выполняющей транспортную работу, в системе с рекуперировавшими вагонами описывается формулой

$$E_{\text{ТП}} + E_{\text{рек-полезн}} = E_{\text{тяги}} + E_{\text{нетяги}}, \quad (1)$$

где $E_{\text{ТП}}$ – электроэнергия, выдаваемая в КС тяговой подстанцией (по выпрямленной стороне), кВт·ч; $E_{\text{тяги}}$ – энергия, потребляемая тяговой системой вагонов, кВт·ч; $E_{\text{нетяги}}$ – потребление системами нетяговых нужд вагонов и стационарной инфраструктуры, подключённой к контактной сети, кВт·ч.

При этом избыточная рекуперация $E_{\text{рек-изб}}$ в общем балансе энергии сети участия не принимает, так как полезно не утилизируется. В данном исследовании транспортные потери энергии в контактном проводе отнесены к нетяговому энергопотреблению и включены в показатель $E_{\text{нетяги}}$. Более подробное рассмотрение состава транспортных потерь тока в КС на материале изучаемой трамвайной системы будет проведено в другом исследовании.

В исследуемой трамвайной системе доля тягового энергопотребления $E_{\text{тяги}}$ от общей выдачи первичным и вторичным энергоисточниками составила 55,5% по итогам 2021 г. С учётом того, что энергопотребление на тягу может составлять до половины и более от общего потребления энергии на транспортную работу предприятий ГЭТ, повышение объёмов полезной рекуперации за счёт снижения избыточной рекуперации (то есть перевод избыточной рекуперации в полезную) является одной из важнейших задач по снижению сетевого энергопотребления и повышению эффективности пассажироперевозок.

Для решения этой задачи могут применяться организационные меры, например заключающиеся в оптимизации графика движения подвижного состава или обучении водителей способам вождения, повышающим эффективность рекуперативного торможения. Однако результативность таких мер достаточно ограничена в силу вполне понятных объективных и субъективных причин (например, сдвиги графиков движения по маршрутам, случайный характер процессов торможения и разгона ЭПС по маршруту, приоритет безопасности вождения и др.). Другим, техническим, способом повышения уровня полезной утилизации рекуперативной энергии торможения ЭПС является применение буферных накопителей энергии, которые могут размещаться как на борту подвижного состава, так и стационарно. Буферные накопители могут запасать избыточно генери-

руемую энергию вторичными источниками – рекуперировавшими вагонами, хранить её некоторое время и выдавать затем на полезное потребление в КС. Другими словами, первые опосредствуют применение на полезную работу избыточной энергии рекуперации, выделяемой вторыми, и, следовательно, являются третичными источниками энергии в контактной сети. Предметом настоящего исследования является изучение каналов экономии энергии на транспортную работу ГЭТ путём задействования на полезную работу избыточной рекуперации при использовании стационарных накопителей энергии. Одним из основных преимуществ стационарных накопителей перед бортовыми является тот факт, что при практически одинаковых технических характеристиках (энергоёмкость и мощность) для полной утилизации избыточной рекуперации бортовых накопителей требуется столько, сколько единиц ЭПС выпускается на линию, а стационарных – только по одному на каждую тяговую подстанцию.

Наиболее обсуждаемый на сегодняшний день вопрос касательно перспектив применения стационарных накопителей энергии – создание и подтверждение способов определения энергетической эффективности работы таких агрегатов [10-13]. Поскольку выдаваемая накопителем энергия избыточной рекуперации вагонов, которой он предварительно зарядился, непосредственно измеряется счётчиком, то есть этот эффект работы стационарного накопителя фиксируется инструментально, то целью исследования было изучить возможность дополнительных эффектов по экономии энергии на выполнение транспортной работы стационарным накопителем. Для достижения этой цели в данной статье мы будем рассматривать не процесс выдачи стационарным накопителем ранее запасённой энергии избыточной рекуперации вагонов, а только процессы, происходящие в ходе его зарядки.

СТАЦИОНАРНЫЙ НАКОПИТЕЛЬ ЭНЕРГИИ для КС ГЭТ МАХОВИЧНОГО ТИПА НКЭ-3Г

С целью решения этой задачи была проведена длительная эксплуатация стационарного накопителя энергии в контактной сети трамваев. Тип применённого накопителя – маховичный модели НКЭ-3Г (рис. 2). Основные характеристики устройства: мощность зарядки максимальная – до 200 кВт, энергоёмкость полная – 2 кВт·ч. Агрегат располагался в собственном контейнере на одном из изолированных участков питания тяговой подстанции и присоединялся непосредственно к контактной сети. Нарботка агрегата в ходе рассматриваемых испытаний превысила 3500 моточасов.



Рис. 2. Контейнер с накопителем энергии НКЭ-3Г во время работы в КС трамвая (а); внешний вид накопителя (б)

В наиболее интенсивные периоды наличия избыточной рекуперативной энергии – в теплый период года – количество полуволн приёма энергии достигало 4000 в рабочий день устройства продолжительностью 17 часов.

Управление агрегатом осуществляется автоматически по заданным в алгоритме уставкам напряжения контактной сети: верхняя уставка $U_{\text{верх}}$ фиксирует факт наличия в КС избыточной энергии рекуперативного торможения трамвая, нижняя уставка $U_{\text{ниж}}$ фиксирует наличие в сети потребителя энергии, на которого можно выдать запасённую перед этим энергию избыточной рекуперации. По срабатыванию уставок включаются, соответственно, режим зарядки накопителя и режим выдачи энергии, полученной им в ходе зарядки. На рис. 3 схематично изображены условия по напряжению для приёма стационарным накопителем энергии избыточной рекуперации вагонов, когда соблюдается отношение $U_{\text{сети}} > U_{\text{верх}}$ и условия последующей выдачи её накопителем как третичным источником питания в КС, когда соблюдается отношение $U_{\text{сети}} < U_{\text{ниж}}$. Когда выполняется отношение $U_{\text{ниж}} < U_{\text{сети}} < U_{\text{верх}}$, накопитель находится на выбеге, энергии не принимает и не выдаёт.

Проверка возможности экономии энергии на первом этапе цикла работы стационарного накопительного агрегата – в ходе запасаения избыточной энергии рекуперативного торможения вагонов – никем ранее не проводилась, в силу чего оценка его эффекта экономии производилась только по объёму выдачи им предварительно запасённой энергии избыточной рекуперации в КС на полезную нагрузку ($E_{\text{нак-выд}}$). Впервые анализ полезного использования избыточной рекуперации для выполнения транспортной работы в ходе зарядки стационарного накопителя был проведён авторами настоящего исследования при анализе работы стационарного буферного накопителя энергии НКЭ-3Г в контактной сети трамвая.

У стационарного накопителя НКЭ-3Г фиксация приёма $E_{\text{заряд}}$ и выдачи $E_{\text{нак-выд}}$ ранее запасённой энергии избыточной рекуперации производилась штатным для систем горэлектротранспорта двунаправленным счётчиком энергии постоянного тока типа СКВТ-Ф610 (производитель АО «ЛЭМЗ»), подключенным на входе устройства.

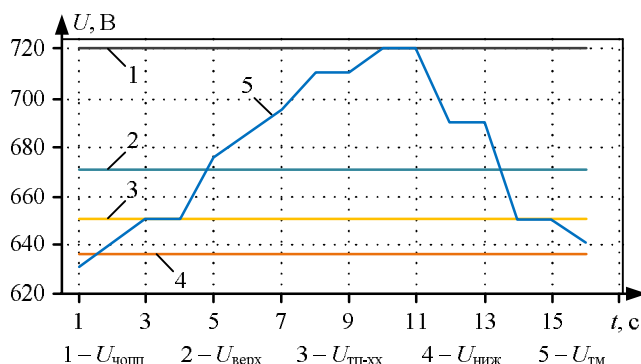


Рис. 3. Позиции уставок напряжения стационарного накопителя и тормозного прерывателя вагона, напряжения на выходе инвертора вагона $U_{\text{ТМ}}$

Накопитель работал в различные сезоны года, когда наружная температура изменялась в диапазоне от $+24^{\circ}$ до -23°C и, следовательно, существенно изменялась нетяговая и заметно – тяговая нагрузка в контактной сети (см. рис. 1). Вслед за изменением температуры также изменялись удельные значения тягового энергопотребления и рекуперации вагонов в расчёте на один километр пробега.

Кроме показателей работы самого накопителя инструментально фиксировались следующие показатели:

– на тяговых подстанциях – фидерные прямые потоки энергии $E_{\text{ТП-прям}}$, межфидерные обратные потоки рекуперации $E_{\text{межф-рек}}$;

– на подвижном составе: тяговое энергопотребление $E_{\text{тяги}}$, полезная рекуперация $E_{\text{рек-полезн}}$, пробег вагонов $L_{\text{ваг}}$.

Суммарный объём нетягового энергопотребления $E_{\text{нетяги}}$ за период (день, месяц) рассчитывался непосредственно исходя из формулы (1), поскольку все остальные данные были инструментально измерены.

СООТНОШЕНИЕ ТЯГОВОГО И НЕТЯГОВОГО ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ В КС

В ходе проведения исследований сети энергоснабжения транспортной работы было выявлено, что в разные дни при выполнении равной транспортной работы и в относительно одинаковых внешних погодных условиях потребление энергии на тягу и на нетяговые нужды подвижного состава и стационарной инфраструктуры, а также объём полезной рекуперации были примерно одинаковыми. Этот факт говорит о том, что при всей случайности событий тяги, нетягового потребления и рекуперативного торможения в КС имеет место фундаментальное усреднение вероятностей таких случайных событий и процессов за длительный период времени, и при одинаковых внешних условиях и равной транспортной работе доли энергопотребления на тягу и на нетяговые нужды также стабильно воспроизводятся. Для характеристики нагрузочного момента в энергетическом балансе контактной сети будем отношение потребления энергии на тягу $E_{\text{тяги}}$ и нетяговые нужды $E_{\text{нетяги}}$ называть коэффициентом тяги-нетяги:

$$K_{\text{тяги-нетяги}} = \frac{E_{\text{тяги}}}{E_{\text{нетяги}}} \quad (2)$$

Коэффициент тяги-нетяги является собственной характеристикой (качеством), совокупной, распределённой во времени и по участкам КС, нагрузки в системе энергоснабжения транспортной работы ГЭТ при фиксированных значениях пробега ЭПС и погодных условиях. $K_{\text{тяги-нетяги}}$ может рассчитываться для каждой тяговой подстанции, совокупности ТП или для всей системы ГЭТ в целом. Значение этого коэффициента демонстрирует распределение по видам нагрузки, потребляемой от всех источников в КС энергии. Назначение этого коэффициента – обеспечение численного контроля расхода энергии на разные виды нагрузки в определённых условиях движения службами энергоснабжения предприятий ГЭТ.

Интересно отметить практически полную пропорциональность кривых распределения значений $K_{\text{тяги-нетяги}}$ и среднемесячной температуры окружающей среды за 17 месяцев исследования (рис. 4 и 5). Коэффициент корреляции этих двух рядов составляет +0,88, что говорит о прямой сильной зависимости этих значений [14, 15]. Изменение условий выполнения транспортной работы непосредственно напрямую отражается в изменении значения коэффициента тяги-нетяги. Уход значений $K_{\text{тяги-нетяги}}$ от общей закономерности, близкой к синусоиде кривой в июне-июле 2021 г. (см. рис. 4), может быть объяснён изменением одного из значимых факторов работы транспортной системы – переходом в это время на летнее расписание, когда были увеличены интервалы движения поездов, из-за чего тяговое энергопотребление в этот период существенно снизилось, а нетяговое энергопотребление в КС изменилось мало, поскольку основные потребители нетяговых нужд – салонные отопители – не работали уже с конца апреля. Распределение потоков энергии в контактной сети от источников к тяговой и нетяговой нагрузке происходит пропорционально коэффициенту тяги-нетяги.

Сводные данные по источникам энергии и потреблению её нагрузкой в исследуемой КС изображены на рис. 6. Чтобы сравнение поведения кривых значений энергетических показателей и среднемесячной температуры было наглядным, значения последней на графике умножены на 2300.

Прямая корреляция с изменениями температуры наблюдается только у показателей избыточной рекуперации. У других показателей на рис. 6 зависимость от температуры – обратная.

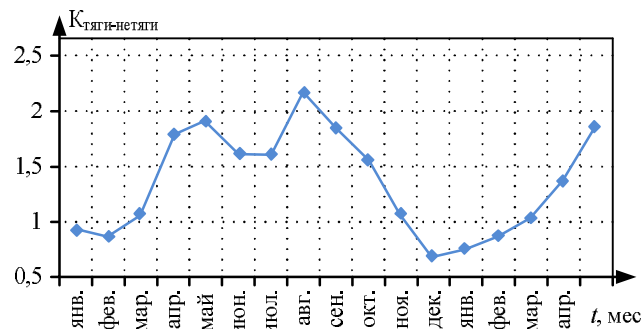


Рис. 4. График распределения $K_{\text{тяги-нетяги}}$ за исследуемый период янв. 2021 г. – май 2022 г.

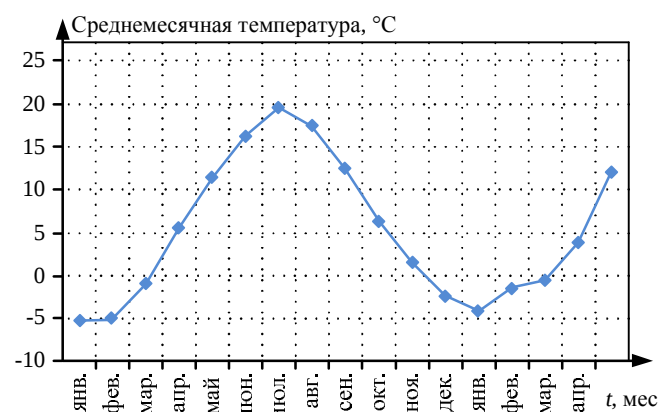


Рис. 5. Среднемесячная температура за период исследования янв. 2021 г. – май 2022 г.

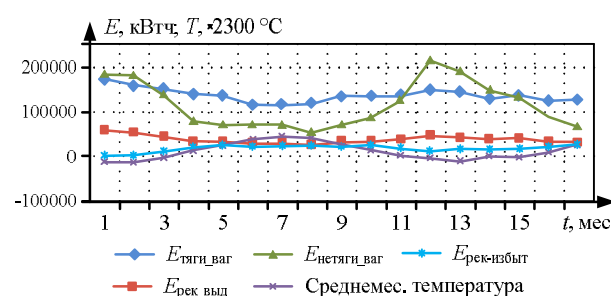


Рис. 6. Сводные данные по источникам энергии и потреблению в КС, а также среднемесячных температур за 17 месяцев наблюдений (Значение среднемесячных температур умножено на 2300 для наглядности графика)

ПОТРЕБЛЕНИЕ ЭНЕРГИИ ПОЛЕЗНОЙ РЕКУПЕРАЦИИ НА ИЗОЛИРОВАННОМ УЧАСТКЕ КС ТП БЕЗ СТАЦИОНАРНОГО НАКОПИТЕЛЯ

Для теоретического рассмотрения процессов, связанных с обращением энергии рекуперативного торможения подвижного состава, была построена элементарная электрическая модель ситуации рекуперации вагона на участке КС тяговой подстанции. На рис. 7 схематично изображена электрическая цепь контактной сети тяговой подстанции в ситуации рекуперативного торможения вагона $Тм_1$. Кроме того, в цепи имеются первичный источник энергии ТП, стационарная нетяговая нагрузка R_3 , могут быть при определённых условиях (ниже они будут описаны) вагон $Тм_2$ на тяге или на стоянке/выбеге (без тяги), а также может иметься подключённый к КС стационарный накопитель энергии (например, маховичного типа НКЭ-3Г). Последний в настоящем исследовании рассматривается только в режиме зарядки или выбега. Вагоны $Тм_1$ и $Тм_2$ имеют бортовую нетяговую нагрузку R_1 и R_2 соответственно (отопление, освещение, компрессоры, кондиционеры, информационная система и др.), а также имеют тормозные резисторы $R_{т1}$ и $R_{т2}$ соответственно. Такая схема отражает наиболее простую конфигурацию явления рекуперативного торможения вагона, которая является элементарной основой для расчёта более сложных случаев рекуперативного торможения и тяги многих вагонов.

В случае отсутствия накопителя и наличия достаточной нагрузки в КС ГЭТ энергия рекуперации $Тм_1$ (на рис. 7 $Тм_1$ – рекуперативно тормозит, $Тм_2$ – идёт на тяге, накопитель НКЭ-3Г – отсутствует) превращается в полезную, то есть уходит в КС на нагрузку: тяговую ($Мт$ – тяговые двигатели вагона $Тм_2$) и нетяговую (R_1 , R_2 – нетяговые системы вагонов, R_3 – нетяговая стационарная нагрузка КС).

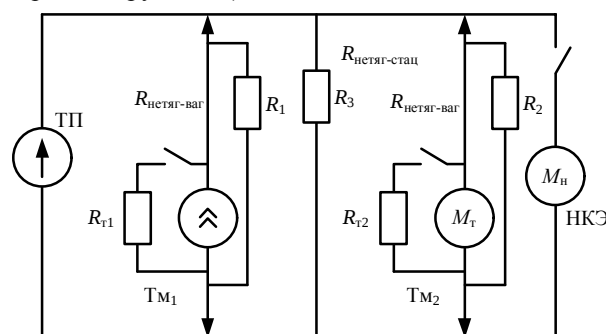


Рис. 7. Схематическое изображение элементарной ситуации в сети при рекуперации вагона $Тм_1$

В этом случае тяговая подстанция «заперта» ($U_{\text{сети}} > U_{\text{ТП}}$), то есть в энергоснабжении нагрузки она участия не принимает.

Формула (1) приобретает вид

$$E_{\text{рек-полезн}} = E_{\text{тяги}} + E_{\text{нетяги}}. \quad (3)$$

В случае отсутствия достаточной полезной нагрузки (например, когда $T_{м2}$ стоит на остановке, $Mт$ – не работает, а имеется только нетяговая нагрузка R_1 , R_2 и R_3) и отсутствия буферного накопителя в сети при достижении напряжением на клеммах тягового инвертора тормозящего вагона $T_{м1}$ уставки максимального напряжения $U_{\text{сети}} \geq U_{\text{чопп}}$ его тормозной прерыватель подключает тормозные резисторы $R_{т1}$ и выдаёт избыточную рекуперацию на них (см. рис. 7).

На рис. 8 показан типовой фрагмент графиков тока и напряжения трамвайного вагона в сети без стационарного накопителя, на котором отражены процессы тяги, полезной рекуперации и отсутствия потребления энергии. Осциллограммы снимались датчиками тока и напряжения, расположенными на входе тяговых инверторов. Описанный случай избыточной рекуперации вагона мы указали на графиках тока и напряжения на этом рисунке как $E_{\text{рек-изб}}$.

Участки повышенного напряжения, которым соответствуют нулевые токи на графике тока, означают, что в этот период данный трамвай тормозит с выдачей избыточной рекуперации на тормозные резисторы ($E_{\text{рек-изб}}$). Участки с повышенным напряжением, которым соответствуют небольшие токи, означают, что в сети рекуперативно тормозит другой трамвай с выдачей части своей рекуперации в КС, а рассматриваемый вагон, где снималась данная осциллограмма, имеет небольшое потребление энергии на тяговые нужды. Тяговая нагрузка $E_{\text{тяги}}$, как видно на рис. 8, длится всего несколько секунд, имеет длительные перерывы, превышающие продолжительность тяги иногда до десяти раз и более. Максимальная мгновенная мощность тяговой нагрузки может превышать мощность нетяговой нагрузки в десятки раз. То есть тяговая нагрузка имеет характер резкопеременный с большим размахом амплитуды мощности.

Поскольку избыточная энергия рекуперации – это та, которая подаётся на тормозные резисторы тормозящего вагона при отсутствии в данной сети достаточной нагрузки, то в моменты выдачи избыточной рекуперации на резисторы полезная энергия рекуперации отсутствует ($E_{\text{рек-полезн}} = 0$), то есть энергия рекуперации превращается только в избыточную энергию рекуперации $E_{\text{рек-изб}}$. При отсутствии тяговой нагрузки ($E_{\text{тяги}} = 0$) при избыточной рекуперации суммарная полезная нетяговая нагрузка сети недостаточна для приёма энергии рекуперации вагона и вызывает повышение напряжения в сети, которое, в свою очередь, при выполнении условия $U_{\text{сети}} \geq U_{\text{чопп}}$ вызывает срабатывание тормозного прерывателя инвертора и выдачу энергии избытка на тормозные резисторы $R_{т1}$. Поскольку нетяговая нагрузка R_1 , R_2 и R_3 остаётся в сети, а энергия рекуперации становится избыточной, то питание этой нетяговой нагрузки осуществляется в это время от тяговой подстанции, то есть баланс энергии в сети в такой ситуации описывается уравнением

$$E_{\text{ТП}} = E_{\text{нетяги}}. \quad (4)$$

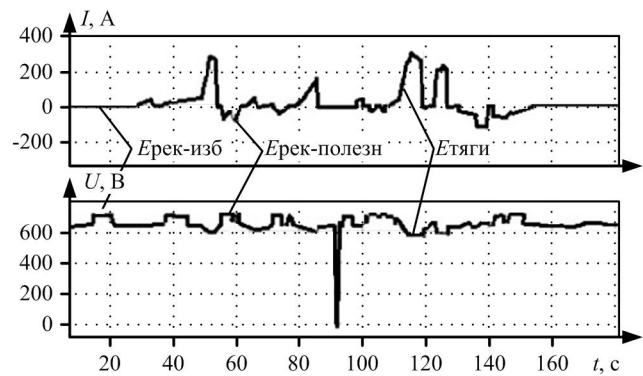


Рис. 8. Фрагмент графиков тока (положительный – приём, отрицательный – выдача) и напряжения тяговой системы трамвая

В процессе потребления энергии нагрузкой, имеющейся в контактной сети, нетяговую нагрузку условно можно считать постоянной в течение значимых промежутков времени – минут и даже часов. Причина этого состоит в том, что освещение, отопление или кондиционирование вагонов, освещение остановочных павильонов, подогрев стрелок, потребление энергии светофорами и т.д. – это длительные процессы на относительно стабильной мощности. При этом суммарная нетяговая мощность в зоне повышенного рекуперацией напряжения, как правило в особенности в тёплое время года, недостаточна для поддержания условия выдачи энергии рекуперации в КС без достижения на тяговом инверторе уставки напряжения $U_{\text{чопп}}$ (720 В), так как в таких условиях мощность рекуперации вагона, особенно в начальный период торможения, значительно превышает нетяговую мощность нагрузки (R_1 , R_2 и R_3) [16-19]. То есть когда в сети нет тяговой нагрузки, то при рекуперативном торможении образуется ситуация $U_{\text{сети}} \geq U_{\text{чопп}}$.

Поскольку мощность рекуперации тормозящего вагона и мощность потребления нетяговой нагрузки объективно заданы (первая – позицией педали управления приводом у водителя в ходе торможения $T_{м1}$, а вторая – мощностью нерегулируемых устройств нетяговой нагрузки в зоне рекуперативного напряжения), то, исходя из баланса мощностей источника и нагрузки, регулирование полезного рекуперативного тока могло бы производиться в этой зоне только нагрузкой тягового типа.

УТИЛИЗАЦИЯ ИЗБЫТОЧНОЙ ЭНЕРГИИ РЕКУПЕРАЦИИ В ПРОЦЕССЕ ЗАРЯДКИ СТАЦИОНАРНОГО НАКОПИТЕЛЯ

При установке в КС буферного стационарного накопителя энергии (см. рис. 7, $T_{м2}$ находится в сети без тяги, а электромашина накопителя подключена) добавляется управляемая нагрузка в виде электромашины маховичного накопителя $M_{нв}$, которая своей мощностью нагрузки способствует мобилизации в контактную сеть избыточной энергии рекуперации $T_{м1}$, ранее рассеиваемой на тормозных резисторах ($E_{\text{рек-изб}}$). При этом требуемая полезной нагрузкой (R_1 , R_2 и R_3) энергия для выполнения транспортной нетяговой работы не изменяется, то есть в ходе рекуперации объём тягового и нетягового энергопотребления полезной сетевой нагрузкой не изменяется сравнительно

с таковыми для ситуации без накопителя энергии, поскольку остаётся таким же объём выполняемой этим видом нагрузки транспортной работы. Изменения происходят в составе источников и взаимном перераспределении генерируемой ими энергии: прекращается выдача от тяговой подстанции $E_{ТП}$ из-за повышенного в сети напряжения и появляется мобилизованная избыточная рекуперация $E'_{изб-мобил}$, которая поступает от $Тм_1$ в КС в период, когда полезная сетевая нагрузка недостаточна для её приёма (есть только R_1 , R_2 и R_3) и имеется способный заряжаться стационарный накопитель энергии, в котором нагрузка – мощная электромашина M_n .

Накопитель потребляет только мобилизованную избыточную энергию рекуперации вагона, о наличии которой сигнализирует превышение в КС уровня напряжения $U_{сети}$ выше верхней уставки зарядки накопителя $U_{верх}$ ($U_{сети} > U_{верх}$).

На **рис. 9** показан типовой фрагмент графика тока и напряжения стационарного накопителя энергии НКЭ-ЗГ. Регулировка мощности, как при зарядке, так и при выдаче энергии, осуществляется в накопителе пропорционально сетевому напряжению в соответствии с алгоритмом управляющего устройства, которое отслеживает уровень напряжения в контактной сети.

При выдаче в КС мобилизованной избыточной рекуперации тормозящим трамваем $Тм_1$ единственное отличие тяговой нагрузки $Тм_2$ от заряжаемого накопителя НКЭ (**рис. 7**) состоит в том, что в случае, когда при тяге потребляющего вагона, заданной установленным водителем положением педали разгона, снижается ток рекуперации тормозящего, то недостающий ток на M_T поступает от основного источника энергии – тяговой подстанции (начинает выполняться условие $U_{сети} < U_{ТП}$). Если в сети нет идущего на тяге $Тм_2$, а вместо этого работает накопитель, то при снижении рекуперативных токов тормозящего вагона $Тм_1$ энергия от ТП двигателем M_n накопителя не принимается, а снижается его мгновенная мощность согласно алгоритму управления с положительной обратной связью по напряжению от вторичного источника питания контактной сети.

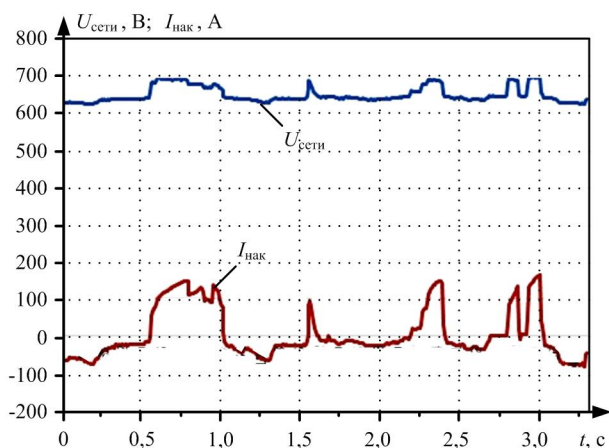


Рис. 9. Фрагмент графика тока $I_{нак}$ и напряжения $U_{сети}$ стационарного накопителя энергии в июне 2022 г. (положительный ток – приём избыточной рекуперации (зарядка), отрицательный – выдача)

Накопитель перестаёт принимать энергию избыточной рекуперации в момент, когда выполняется условие $U_{сети} < U_{верх}$.

Для вышеописанного процесса зарядки накопителя формула баланса энергии (3) приобретает следующий вид (в рассматриваемой ситуации $Тм_1$ тормозит, $Тм_2$ стоит или движется по инерции на выбеге, НКЭ – заряжается):

$$E'_{изб-мобил} = E'_{нетяги} + E'_{заряд}, \quad (5)$$

где $E'_{изб-мобил}$ – перенаправленная в КС мобилизованная избыточная рекуперация $Тм_1$ (бывшая $E_{рек-изб}$), которая без накопителя была бы рассеяна теплом на тормозных резисторах, кВт·ч; $E'_{нетяги}$ – потребление нетяговой нагрузкой части энергии мобилизованной избыточной рекуперации, кВт·ч; $E'_{заряд}$ – энергия зарядки накопителя, являющейся второй частью мобилизованной энергии избыточной рекуперации вагона, кВт·ч.

Когда НКЭ перестаёт заряжаться ($U_{сети} < U_{верх}$), то это означает, что избыточная энергия рекуперативного торможения закончилась в $Тм_1$, мобилизованная избыточная рекуперация ($E'_{изб-мобил}$) им в сеть более не выделяется, а полезная нетяговая нагрузка (R_1 , R_2 и R_3) перестаёт питаться от этой мобилизованной энергии избыточной рекуперации и переходит на питание от тяговой подстанции. То есть полуцикл зарядки накопителя в этот момент завершается. За время работы накопителя на полуцикле зарядки вся мобилизованная энергия избыточной рекуперации вагона была полезно утилизирована: одна часть напрямую была потреблена сетевой нетяговой нагрузкой, а другая часть в это же время была запасена стационарным накопителем.

Поскольку стационарный накопитель энергии, в рассматриваемом случае это агрегат типа НКЭ-ЗГ, оснащён входным счётчиком энергии, то значение $E'_{заряд}$ за период времени инструментально фиксируется, то есть известен этот абсолютный показатель, например за день, месяц, год. Выделить $E_{рек-полезн}$ и $E'_{изб-мобил}$ из суммарного значения выданной в КС энергии рекуперации вагона невозможно при современных средствах учёта, применяемых на подвижном составе. Встаёт задача косвенного определения $E'_{нетяги}$, то есть потребления полезной сетевой нагрузкой энергии мобилизованной избыточной рекуперации в ходе зарядки стационарного накопителя.

До настоящего времени единственной возможностью у любого стационарного накопителя повторно полезно утилизировать избыточную энергию рекуперации вагона считался его базовый конструктивный функционал – выдача ранее запасённой энергии избыточной рекуперации в КС на появившуюся там нагрузку, когда значение напряжения в сети опускается ниже значения нижней уставки напряжения накопителя $U_{сети} < U_{нижн}$ (см. **рис. 3**). Срабатывание этой нижней уставки переключает накопитель на выдачу ранее запасённой энергии избыточной рекуперации в КС на полезную нагрузку. Показатель счетчика выходной энергии накопителя определяет абсолютное значение возврата запасённой им энергии избыточной рекуперации вагонов на повторное выполнение сетевой нагрузкой полезной транспортной работы.

Настоящее исследование позволило выявить вторую составляющую эффекта экономии энергии при работе стационарного накопителя – в ходе его зарядки, когда выполняется условие $U_{\text{сети}} > U_{\text{верх}}$ (см. рис. 3). Этот эффект экономии реализует повторное использование части мобилизованной избыточной энергии рекуперации $E'_{\text{изб-мобил}}$ напрямую нетяговой полезной сетевой нагрузкой ($E'_{\text{нетяги}}$) в ходе зарядки стационарного накопителя.

В научной литературе отсутствует описание эффекта прямой полезной утилизации сетевой нагрузкой мобилизованной избыточной рекуперативной энергии в ходе зарядки стационарного накопителя энергии. Подтверждением неисследованности этого аспекта работы стационарных накопителей служит тот факт, что в отраслевых отчётах, протоколах испытаний, научных обзорах и диссертационных работах, посвящённых стационарным накопителям различных типов (например, см. [9-11, 13, 20]) данный канал экономии энергии не учитывается и даже не упоминается. В существующей литературе в качестве составляющих экономического эффекта от работы стационарного накопителя энергии наиболее часто приводятся следующие моменты [6, 12, 13, 19-24]:

- возврат на питание сетевой нагрузки энергии ($E'_{\text{выдач}}$) избыточной рекуперации вагонов накопителем, принятой в него ранее ($E'_{\text{заряд}}$);
- снижение пиковой мощности тяговой подстанции;
- стабилизация напряжения в КС;
- снижение коэффициента нагрузки выпрямителей тяговой подстанции.

В силу этого открытому явлению присвоено название «эффект прямой полезной утилизации сетевой нагрузкой мобилизованной избыточной рекуперативной энергии вагонов в ходе зарядки стационарного накопителя» ($E'_{\text{нетяги}}$) или, для краткости, «эффект КБК».

Поскольку задача исследования состоит также и в численном определении объёма возвращённой на полезную транспортную работу энергии избыточной рекуперации в ходе зарядки накопителя, то для решения её необходимо вывести способ подсчёта этой экономии, образующейся в результате действия «эффекта КБК», используя доступные инструментально измеряемые данные: объём принятой в накопитель энергии $E'_{\text{заряд}}$, объём потребления вагонами на тягу $E_{\text{тяги}}$, объём выданной вагонами в сеть энергии рекуперации $E_{\text{рек-полезн}}$, суммарный пробег вагонов L , выданную тяговой подстанцией в КС выпрямленную энергию $E_{\text{ТП}}$.

РАСЧЁТ ПРЯМОЙ ЭКОНОМИИ ЭНЕРГИИ ПРИ ЗАРЯДКЕ БУФЕРНОГО НАКОПИТЕЛЯ

Прямая экономия энергии накопителем $E'_{\text{нетяги}}$ за счёт потребления полезной сетевой нагрузкой части перенаправленной в КС мобилизованной энергии избыточной рекуперации вагона, в силу действия «эффекта КБК», происходит во время его зарядки. Подсчёт этой энергии производится на основании формулы (5), полученной в результате замены тяговой нагрузки M_t на одинаковую по нагрузочной характеристике нагрузку заряжаемого накопителя M_n (см.

рис. 7), и формулы (2) – $K_{\text{тяги/нетяги}}$, который является собственной нагрузочной характеристикой электропотребляющей подсистемы в электросистеме выполнения транспортной работы.

Транспортная работа на участках данной подстанции устойчиво воспроизводится за период времени, например за день. Следовательно, для дней с одинаковым пробегом и сходными погодными условиями без наличия накопителя в сети должны быть устойчивы доли потребления энергии нагрузкой от обоих видов источников: от тяговой подстанции и от рекуперирующих вагонов. Подтверждением этого предположения служат результаты замеров на действующей тяговой подстанции (рис. 10) в течение всего 2021 г. За этот год среднемесячная доля полезной рекуперации $E_{\text{рек-полезн}}$ от общего энергопотребления в сети $E_{\text{ТП}} + E_{\text{рек-полезн}}$ данной подстанции составила порядка 15%. Коэффициент корреляции значений потребления энергии от тяговой подстанции и от рекуперации вагонов за 11 месяцев 2021 г. (когда не было стационарного накопителя) принимает значение 0,959, что фактически означает однозначную прямую зависимость объёмов рекуперации от объёмов энергии с ТП. За пять месяцев 2022 г. в период активной работы стационарного накопителя этот коэффициент принимает значение 0,947.

Баланс энергии в системе (энергия, выданная источниками, равна энергии, потреблённой нагрузкой) требует, чтобы при одинаковых пробеге вагонов и внешних условиях (температура, осадки, освещённость и т.д.) устойчиво воспроизводились доли обоих видов энергопотребления – тяги и нетяговой нагрузки. Основанием для выполнения этого требования является случайность одновременности событий. С одной стороны, рекуперативного торможения вагонов, с другой – потребления тяговой и нетяговой нагрузкой. Причём нетяговая нагрузка характеризуется устойчивым характером значения мощности за период одинаковых внешних условий и объёма выполняемой транспортной работы, а тяговая – большим числом импульсных высокомоментных, но коротких, бросков, распределённых в течение дня сообразно интервалам движения ЭПС по маршрутам. Поскольку тяговая и нетяговая нагрузки относительно равномерно (сообразно интенсивности транспортной работы) распределены по дню, то из этого выходит, что поступающая в сеть от обоих источников энергия в одинаковой пропорции распределяется между разными типами нагрузки – тяговой и нетяговой.

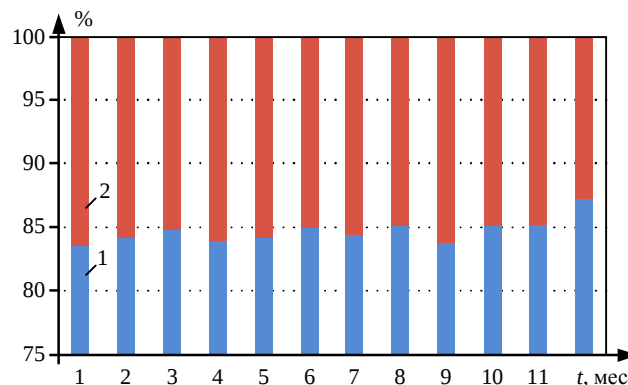


Рис. 10. Соотношение долей энергии, получаемой сетевым потребителем от тяговой подстанции (1 – синяя) и рекуперирующих вагонов (2 – красная) по месяцам 2021 г.

Соотношения объёмов энергозатрат на тягу и нетяговые нужды данной ТП ежемесячно по 2021 году приведены на **рис. 11**.

Соотношение между тяговым и нетяговым энергопотреблением ($K_{\text{тяги-нетяги}}$) измеряется при отключенном стационарном накопителе энергии и будет верно и для ситуации с работающим накопителем, так как за выбранный период работы системы все условия для полезно потребляющего оборудования транспортной системы остаются постоянными. В период работы накопителя на приём энергии мобилизованной избыточной рекуперации питания от ТП нет, так как $U_{\text{сети}} > U_{\text{ТП}}$. Также нет энергии так называемой полезной рекуперации, так как для этого должно выполняться условие достаточности полезной сетевой нагрузки, а оно не выполняется. ТМ₁ выдаёт в этом случае мобилизованную избыточную рекуперацию. Эта энергия поступает на полезную сетевую нетяговую нагрузку ($R1$, $R2$ и $R3$) – $E'_{\text{нетяги}}$ и на двигатель накопителя $M_n - E'_{\text{заряд}}$, имеющий тяговую нагрузочную характеристику. Соотношение тяговой и нетяговой нагрузки в сети описывается в ходе этого процесса уравнением, преобразованным из формулы (2):

$$E'_{\text{нетяги}} = \frac{E'_{\text{заряд}}}{K_{\text{тяги-нетяги}}} \quad (6)$$

Значение $E'_{\text{заряд}}$ известно по входному счётчику НКЭ. $K_{\text{тяги-нетяги}}$ есть собственная характеристика нагрузки сети для текущих условий температуры и расписания движения и рассчитывается по формуле (2).

Поскольку исходя из формулы (1) $E_{\text{нетяги}} = E_{\text{ТП}} + E_{\text{рек-полезн}} - E_{\text{тяги}}$, то $K_{\text{тяги-нетяги}}$ за день определяется по формуле

$$K_{\text{тяги-нетяги}} = \frac{E_{\text{тяги}}}{E_{\text{ТП}} + E_{\text{рек-полезн}} - E_{\text{тяги}}} \quad (7)$$

С учётом этого, искомая формула расчёта значения прямой экономии энергии в ходе зарядки стационарного накопителя («эффекта КБК») принимает вид

$$E'_{\text{нетяги}} = \frac{E'_{\text{заряд}} (E_{\text{ТП}} + E_{\text{рек-полезн}} - E_{\text{тяги}})}{E_{\text{тяги}}} \quad (8)$$

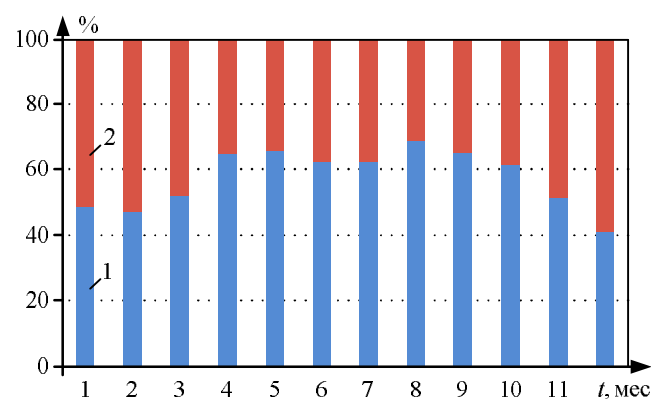


Рис. 11. Соотношение по месяцам 2021 г. расхода энергии на тягу (1 – синяя) и нетяговые нужды (2 – красная) на участках рассматриваемой подстанции

Здесь значение $E_{\text{ТП}}$ за рассматриваемый период берётся по выпрямленной стороне ТП, $E_{\text{рек-полезн}}$ и $E_{\text{тяги}}$ измеряются бортовыми счётчиками вагонов, установленными на входе в тяговый инвертор.

Энергия избыточной рекуперации, которая мобилизуется в ходе зарядки стационарного накопителя и питает нетяговую сетевую нагрузку $E'_{\text{нетяги}}$ замещает ту часть энергии тяговой подстанции, которая питает эту нагрузку при избыточной рекуперации (см. формулу (4)), когда в сети нет тяговой нагрузки (вагона ТМ₂ на тяге или стационарного накопителя). Таким образом, потребление части энергии мобилизованной избыточной рекуперации вагона в ходе зарядки стационарного накопителя снижает сетевое потребление системы от тяговой подстанции.

Полученная формула (8) применима для вычисления эффекта полезной утилизации энергии мобилизованной избыточной рекуперации вагонов для применения стационарных накопителей любого типа – маховичных, суперконденсаторных, емкостных или любых других, так как собственная характеристика стационарных накопителей благодаря гибким алгоритмам их работы с положительной обратной связью по напряжению сети определяется, главным образом, характером токов мобилизованной избыточной рекуперации вагонов, которые имеют собственную характеристику как именно тяговых токов.

Соотношения помесечных объёмов прямой ($E'_{\text{нетяги}}$) экономии мобилизованной избыточной энергии рекуперации при зарядке накопителя НКЭ-3Г и его зарядной энергии за период от включения в работу за 3500 моточасов работы по 17 часов в день приведены на **рис. 12**.

Расчёт $E'_{\text{нетяги}}$ по формуле (8) на основании инструментально замеренных данных за период январь-май 2022 г. представлен в **таблице**.

За весь период работы накопителя НКЭ-3Г в исследуемой сети суммарной продолжительностью ~3500 моточасов значение энергии заряда накопителя составило 25939 кВт·ч, а полезное потребление сетевой нагрузкой мобилизованной энергии избыточной рекуперации вагонов $E'_{\text{нетяги}}$ составило 23816 кВт·ч. Сравнение по **рис. 12** ежемесячных соотношений прямого эффекта утилизации избыточной энергии рекуперации в ходе зарядки накопителя $E'_{\text{нетяги}}$ и запасаемой накопителем энергии $E'_{\text{заряд}}$ показывает, что в тёплый сезон снижается доля прямого эффекта и увеличивается объём запасаемой накопителем избыточной рекуперации, что может быть объяснено только снижением мощности и времени работы нетяговой нагрузки в КС (летом не работает отопление, освещение работает только ранним утром и поздним вечером). В зимний период доля прямой экономии энергии при зарядке накопителя растёт благодаря опережающему росту нетяговой нагрузки в сети над тяговой, при этом абсолютный объём избыточной рекуперации в этот период снижается.

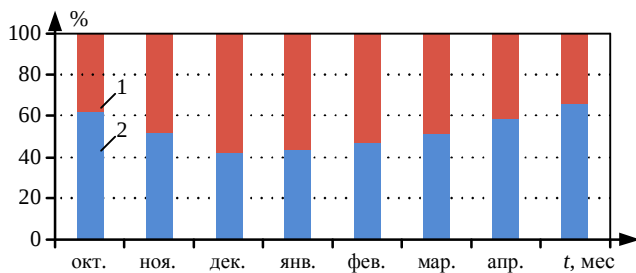


Рис. 12. Распределение полезно утилизируемой мобилизованной энергии избыточной рекуперации вагонов в ходе зарядки накопителя НКЭ-3Г в период октябрь 2021 г. – май 2022 г.:

1 – $E'_{\text{нетяги}}$ прямая утилизация сетевой нагрузкой в ходе зарядки накопителя; 2 – $E'_{\text{заряд}}$ – энергия, принятая накопителем при зарядке

Расчёт объёма полезного потребления нетяговой сетевой нагрузкой мобилизованной избыточной рекуперации при зарядке накопителя НКЭ-3Г за январь-май 2022 г.

Месяца 2022 г.	$E'_{\text{заряд}}$ кВт·ч	$E_{\text{ТП}}$ кВт·ч	$E_{\text{рек-полезн}}$ кВт·ч	$E_{\text{тяги}}$ кВт·ч	$K_{\text{тяги-нетяги}}$	$E'_{\text{нетяги}}$ кВт·ч
январь	2480	296170	41808	145163	0,75	3294
февраль	3154	241808	38153	130194	0,87	3628
март	4756	231627	40294	137435	1,02	4654
апрель	6030	182500	33594	123885	1,34	4488
май	5592	163526	32355	126360	1,82	3077

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Источниками энергоснабжения транспортной работы в КС являются: первичный – тяговая подстанция, вторичный – полезная рекуперация тормозящих вагонов, третичный – буферный накопитель энергии.

Анализ работы систем тягового энергоснабжения с наличием рекуперации следует проводить исходя из полного баланса энергии в сети, то есть учитывать потребление энергии на тягу и на нетяговые нужды.

Соотношение энергопотребления на тягу и нетяговые нужды в КС ГЭТ, отражаемое в показателе $K_{\text{тяги-нетяги}}$ зависит в конечном счёте от внешних погодных условий и расписания движения вагонов.

Выявлен дополнительный канал экономии энергии при работе стационарных накопителей – непосредственное (прямое) потребление мобилизованной избыточной энергии рекуперации маломощной сетевой (нетяговой) нагрузкой в ходе зарядки накопителя. Данному явлению присвоено название «эффект КБК».

Полный эффект по экономии энергии на выполнение транспортной работы стационарным накопителем складывается из описанного прямого эффекта утилизации сетевой нагрузкой мобилизованной избыточной рекуперации в ходе зарядки стационарного накопителя и опосредствованного эффекта (выдачи накопителем ранее запасённой энергии избыточной рекуперации).

Объём полезной утилизации мобилизованной избыточной энергии рекуперации тормозящих вагонов в ходе зарядки накопителя энергии ($E'_{\text{нетяги}}$) зависит от объёма принятой в накопитель энергии и от текущего соотношения энергопотребления тяговой и нетяговой нагрузки в данной КС.

Список источников

- Бирюков В.В. Энергосбережение на электрическом транспорте: монография. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2009. 244 с.

- Розенфельд В.Е., Исаев И.П., Сидоров Н.Н. Теория электрической тяги: учеб. для вузов ж.-д. трансп. М.: Транспорт, 1995. 294 с.
- Ефремов И.С., Косарев Г.В. Теория и расчет электрооборудования подвижного состава городского электрического транспорта: учеб. для вузов. М.: Высш. шк., 1976. 480 с.
- Шаряков В.А. Двадцать лет внедрения асинхронного электропривода на городском электротранспорте // Control Engineering Россия. 2014. №3. С. 69-71.
- ГОСТ 6962-75. Транспорт электрифицированный с питанием от контактной сети. Ряд напряжений. М.: Госстандарт, 1975. 8 с.
- Возможности рационального использования энергии торможения электрического подвижного состава / В.А. Шаряков, О.Л. Шарякова, А.В. Агунов, А.В. Третьяков // Электротехника. 2018. № 10. С. 55-59.
- Показатели работы стационарного накопителя энергии на тяговых подстанциях московского метрополитена / Л.А. Баранов, В.А. Гречишников, А.В. Ершов, М.Д. Родионов, М.В. Шевлюгин // Электротехника. 2014. №8. С. 18-22.
- «Зеленые» технологии: в Россию возвращается рекуперация энергии. URL: <https://www.techinsider.ru/technologies/1533963-zelenye-tehnologii-v-rossiyu-vozvrashchaetsya-rekuperaciya-energii/> (дата обращения 12.10.2022)
- Сулим А.А. Расчет электроэнергии рекуперации электрифицированного городского транспорта при установке накопителя на тяговой подстанции // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. Энергетика. 2014. Вып. 4. Ч. 4. С. 30-41.
- О применении тяговых аккумуляторных батарей на автономных подстанциях городского электротранспорта / Сацук Т.П., Шаряков В.А., Шарякова О.Л., Лебедева В.А., Макарова Е.И. // Электротехника. 2021. № 10. С. 32-36.
- Незевак В.Л. Имитационная модель системы тягового электроснабжения для определения энергетических показателей в условиях работы систем накопления электроэнергии // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2020. № 3(67). С. 70-80. doi: 10.26731/1813-9108.2020.3(67).70-80
- Черемисин В.Т., Незевак В.Л. Перспективы применения систем накопления электроэнергии на Московском центральном кольце // Бюллетень результатов научных исследований. 2020. Вып. 2. С. 33-44. doi: 10.20295/2223-9987-2020-2-33-44
- Шевлюгин М.В. Ресурсо- и энергосберегающие технологии на железнодорожном транспорте и метрополитенах, реализуемые с использованием накопителей энергии : автореф. дис. ... канд. техн. наук. 05.14.02 / Шевлюгин Максим Валерьевич. Москва, 2009.
- Мятеж А.В., Ярославцев М.В., Забелина Д.Д. Исследование сезонных изменений потребления электрической энергии троллейбусом // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2014. № 1-2. С. 282-286.
- Ярославцев М.В., Щуров Н.И. Сезонные колебания потребления электрической энергии троллейбусом // Наука. Технологии. Инновации: материалы всероссийской научной конференции молодых ученых. Новосибирск: НГТУ, 2013. С. 187-191.
- Ярославцев М.В. Определение оптимальной энергоёмкости бортового буферного накопителя энергии // Студент и научно-технический прогресс: материалы 51-й международной научной студенческой конференции. Новосибирск: НГТУ, 2013. С. 46.
- Мазнев А.С., Степанская О.А., Шатнев О.И. Системы рекуперации энергии торможения электроподвижного состава на городском транспорте Санкт-Петербурга // Известия ПГУПС. 2017. Вып. 1. С. 63-72.

18. Исследования энергообменных процессов при штатных условиях эксплуатации подвижного состава метрополитена с системами рекуперации / А.А. Сулим, С.А. Мужичук, П.А. Хозя, А.А. Мельник, В.В. Федоров // Наука та прогрес транспорту. 2017. № 5(71). С. 28-47. doi: 10.15802/stp2017/112934
 19. Щуров Н.И., Щеглов К.В., Штанг А.А. Применение накопителей энергии в системах электрической тяги // Сборник научных трудов НГТУ. 2008. Вып. 1(51). С. 99-104.
 20. Khodaparastan M., Mohamed A. Flywheel vs. Supercapacitor as wayside energy storage for electric rail transit systems // Inventions. 2019. No. 4(4). 62. doi: 10.3390/inventions4040062
 21. Bartłomiejczyk M., Połom M. Multiaspect measurement analysis of breaking energy recovery // Energy Conversion and Management. 2016. Vol. 127. Pp. 35-42. doi: 10.1016/j.enconman.2016.08.089
 22. Energy recovery effectiveness in trolleybus transport / S. Hamacek, M. Bartłomiejczyk, R. Hrbáč, S. Mišák, V. Stýskala // Electric Power Systems Research. 2014. Vol. 112. Pp. 1-11. doi: 10.1016/j.epr.2014.03.001
 23. Чернигов В.М. Электрооборудование трамвайного вагона с емкостным накопителем. URL: https://www.mapget.ru/wp-content/uploads/2021/12/MAPGET_NTS_Chergos.pdf (дата обращения 22.07.2022)
 24. Методические рекомендации по расчету экономически обоснованной стоимости перевозки пассажиров и багажа в городском и пригородном сообщении автомобильным и городским наземным электрическим транспортом общего пользования. Приложение к распоряжению Минтранса России от 18 апреля 2013 г. № НА-37-р.
- Поступила в редакцию 22 ноября 2022 г. Принята к печати 12 декабря 2022 г.

INFORMATION IN ENGLISH

EXCESSIVE RECOVERY DISPOSAL IN THE CONTACT NETWORK OF ELECTRIC VEHICLES WHEN CHARGING A STATIONARY STORAGE DEVICE

Aleksandr V. Katsay

Ph.D. (Philology), CEO, Kinemak LLC, Moscow, Russia, proton764@mail.ru

Maksim V. Shevlyugin

D.Sc. (Engineering), Associate Professor, Head of the Department, Department of Electric Transport Power Engineering, Russian University of Transport, Moscow, Russia, mx_sh@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3300-5193>

The energy recovery flows in the rolling stock of mountain electric transport during braking are considered. The influence of the network load power on the useful recovered energy flow directions during rolling stock braking is determined. The energy consumption coefficient for traction and non-traction needs is derived as an intrinsic characteristic of the system for performing transport work in the GET. The change in the energy recuperation flow patterns during charging of a stationary energy storage device in the contact network is analyzed. The effect of additional energy saving by a stationary storage device, not previously described in the literature, has been revealed in addition to the fact that it supplies previously stored energy of excessive recovery to the load in the contact network. Additional useful utilization of the mobilized excess energy recovery occurs during the drive charging, when part of it is consumed directly, i.e. without staying in the drive, by the network load, which does not occur without the stationary drive presence. This phenomenon has been given the name "BCF effect". The basis is laid for the method for calculating the direct consumption amount by the network load of the mobilized excess recovery during the drive charging at the current level of accounting tools development and application.

Keywords: regenerative braking, recuperative energy flows, useful and excess energy recovery, stationary storage, contact network, traction substation, rolling stock, traction load, non-traction load

REFERENCES

1. Biryukov V.V. *Energoberezhenie na elektricheskoy transporte* [Energy saving in electric transport]. Irkutsk, Publishing House of IrSTU, 2009. 244 p. (In Russian)
2. Rosenfeld V.E., Isaev I.P., Sidorov N.N. *Teoriya elektricheskoy tyagi: uchebnyk dlya vuzov zheleznodorozhnogo transporta* [Theory of electric traction: textbook for railway transport universities]. 3rd edition. Moscow, Transport, 1995. 294 p. (In Russian)
3. Efremov I.S., Kosarev G.V. *Teoriya i raschet elektroob-*
- rudovaniya podvizhnogo sostava gorodskogo elektricheskogo transporta* [Theory and calculation of electrical equipment of rolling stock of urban electric transport]. Moscow, Higher School Publ., 1976. 480 p. (In Russian)
4. Sharyakov V.A. Twenty years of introduction asynchronous electric drive on urban electric transport. *Control Engineering Rossiya* [Control Engineering in Russia], 2014, no. 3, pp. 69-71. (In Russian)
5. GOST 6962-75. Electrified transport with overhead system power supply. Voltage row. Moscow, State standard Publ., 1975. 8 p. (In Russian)
6. Sharyakov V.A., Sharyakova O.L., Agunov A.V., Tretyakov A.V. Possibilities of rational use of electric rolling stock braking energy. *Elektrotehnika* [Electrical engineering], 2018, no. 10, pp. 55-59. (In Russian)
7. Baranov L.A., Grechishnikov V.A., Ershov A.V., Rodionov M.D., Shevlyugin M.V. Performance indicators of a stationary energy storage device at traction substations of the Moscow metro. *Elektrotehnika* [Electrical Engineering], 2014, no. 8, pp. 18-22. (In Russian)
8. Green technologies: energy recovery is returning to Russia. Available at: <https://www.techinsider.ru/technologies/1533963-zelenye-tehnologii-v-rossiyu-vozvrashchaetsya-rekuperaciya-energii/> (accessed 12 October 2022). (In Russian)
9. Sulim A.A. Calculation of electricity recovery of electrified urban transport when installing a storage device at a traction substation. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy i energeticheskikh objedineniy SNG. Energetika*. [Energetika. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations], 2014, issue 4, part 4, pp. 30-41. (In Russian)
10. Satsuk T.P., Sharyakov V.A., Sharyakova O.L., Lebedeva V.A., Makarova E.I. On the use of traction batteries at autonomous substations of urban electric transport. *Elektrotehnika* [Electrical engineering], 2021, no. 10, pp. 32-36. (In Russian)
11. Nezevak V.L. Simulation model of a traction power supply system for determining energy indicators in the conditions of

- operation of electricity storage systems. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie*. [Modern technologies. System analysis. Modeling], 2020, no. 3(67), pp. 70-80. doi: 10.26731/1813-9108.2020.3(67).70-80 (In Russian)
 12. Cheremisin V.T., Nezevak V.L. Prospects for the use of electric power storage systems on the Moscow Central Ring. *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy* [Bulletin of scientific research results], 2020, issue 2, pp. 33-44. doi: 10.20295/2223-9987-2020-2-33-44. (In Russian)
 13. Shevlyugin, M.V. *Resurso- i energosberegayushchie tekhnologii na zheleznodorozhnom transporte i metropolitenakh, realizuemye s ispolzovaniem nakopiteley energii* [Resource- and energy-saving technologies in railway transport and subways implemented using energy storage devices. Kand. Diss.]. Moscow, 2009. 48 p.
 14. Myatezh A.V., Yaroslavtsev M.V., Zabelina D.D. Investigation of seasonal changes in electric energy consumption by trolleybus. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka* [Scientific problems of transport in Siberia and the Far East], 2014, no. 1-2, pp. 282-286. (In Russian)
 15. Yaroslavtsev M.V., Shchurov N.I. Seasonal fluctuations in electric energy consumption by trolleybus. *Nauka. Tekhnologii. Innovatsii: materialy vserossiyskoy konferentsii molodykh uchenykh* [Materials of the All-Russian Scientific Conference of Young Scientists "Science. Technologies. Innovations"]. Novosibirsk, Novosibirsk State Technical University Publ., 2013, pp. 187-191. (In Russian)
 16. Yaroslavtsev M.V. Determination of the optimal energy intensity of an onboard buffer energy storage device. *Student i nauchno-tekhnicheskii progress: materialy 51-y mezhdunarodnoy nauchnoy studencheskoy konferentsii* [Materials of the 51st International Scientific Student Conference "Student and scientific and technological progress"]. Novosibirsk, Novosibirsk State University Publ., 2013, p. 46. (In Russian)
 17. Maznev A.S., Stepanskaya O.A., Shatnev O.I. Systems of energy recovery of braking of electric rolling stock on urban transport of St. Petersburg. *Izvestiya PGUPS* [Proceedings of Petersburg Transport University], 2017, issue 1, pp. 63-72. (In Russian)
 18. Sulim A.A., Muzhichuk S.A., Khozya P.A., Mel'nik A.A., Fedorov V.V. Studies of energy exchange processes under normal operating conditions of metro rolling stock with recovery systems. *Nauka i progress transportu* [Science and Transport Progress], 2017, no. 5(71), pp. 28-47. doi: 10.15802/stp2017/112934. (In Russian)
 19. Shchurov N.I., Shcheglov K.V., Shtang A.A. Application of energy storage devices in electric traction systems. *Sbornik nauchnykh trudov NGTU* [Collection of scientific papers of NSTU], 2008, Issue 1(51), pp. 99-104. (In Russian)
 20. Khodaparastan M., Mohamed A. Flywheel vs. Supercapacitor as wayside energy storage for electric rail transit systems. *Inventions*. 2019, no. 4(4), 62. doi: 10.3390/inventions4040062
 21. Bartlomeychik M., Polom M. Multiaspect measurement analysis of breaking energy recovery. *Energy Conversion and Management*. 2016, vol. 127, pp. 35-42. doi:10.1016/j.enconman.2016.08.089
 22. Khamatsek S., Bartlomeychik M., Grbach R., Mishak S. Energy recovery effectiveness in trolleybus transport. *Electric Power Systems Research*. 2014, vol. 112, pp. 1-11. doi: 10.1016/j.epsr.2014.03.001
 23. Chernigov V.M. Electrical equipment of a tram car with a capacitive storage device. Available at: http://mapget.ru/wp-content/uploads/2021/12/MAPGET_NTS_Chergos.pdf (accessed 22 July 2022). (In Russian)
 24. Methodological recommendations for calculating the economically reasonable cost of transporting passengers and luggage in urban and suburban traffic by road and urban ground electric public transport. Appendix to the Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation No. NA-37-r dated April 18, 2013. (In Russian)
-
- Кацай А.В., Шевлюгин М.В. Утилизация избыточной рекуперации в контактной сети электротранспорта при зарядке стационарного накопителя // *Электротехнические системы и комплексы*. 2023. № 1(58). С. 10-20. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-1\(58\)-10-20](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-1(58)-10-20)
-
- Katsay A.V., Shevlyugin M.V. Excessive Recovery Disposal in the Contact Network of Electric Vehicles When Charging a Stationary Storage Device. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2023, no. 1(58), pp. 10-20. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-1\(58\)-10-20](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-1(58)-10-20)
-

Лыгин М.М.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ ЗА СЧЁТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРИНЦИПА ЧАСТОТНО-КАСКАДНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ГРУППЫ ПРИВодОВ ПИТАТЕЛЬНЫХ НАСОСОВ

В работе рассматривается вопрос повышения энергоэффективности заводских электростанций. Проведён обзор литературы, в котором представлены отечественные научные работы. Представлены результаты анализа текущего состояния энергоэффективности электростанций в стране. Выявлено, что одним из основных факторов, снижающих энергоэффективность электростанций, является потребление электроэнергии на собственные нужды. С целью снижения потребления электроэнергии собственными нуждами предложено использование принципа каскадно-частотного регулирования для управления группой насосов. В качестве объекта исследования выбраны питательные насосы заводской электростанции с поперечными связями по питательной воде. Рассмотрен пример работы четырёх питательных насосов на общий коллектор с условием поддержания необходимого расхода воды при заданном давлении сети. Вместо традиционного дросселирования предлагается осуществить регулирование производительности насосов с помощью изменения скорости вращения привода. За счёт этого снижается потребление электрической энергии. Отличительной особенностью предлагаемой схемы регулирования является то, что часть насосов, необходимых для поддержания заданного расхода питательной воды, подключаются к одному частотному преобразователю. Регулирование происходит с одинаковой частотой вращения. Для вывода насоса в номинальный режим работы предусмотрен обходной путь, позволяющий подключить электропривод напрямую к сети. Разработана блок-схема выбора оптимального режима работы для группы однотипных насосов. Для заданной характеристики сети получены различные варианты подключения насосов через частотные преобразователи и их результирующие характеристики. Рассмотрена целесообразность работы группы насосов с разной частотой и нагрузкой при работе на общую сеть. Разработаны рекомендации по применению частотно-регулируемых насосов с учётом минимальных затрат при заданной производительности.

Ключевые слова: электростанция, повышение эффективности, расход на собственные нужды, дросселирование, регулируемый привод, преобразователь частоты, питательные насосы, экономия мощности

ВВЕДЕНИЕ

Повышение энергоэффективности электростанций является наиболее перспективным и актуальным направлением во всех сферах промышленного производства, поскольку от этого напрямую зависит себестоимость выпускаемой продукции [1-3].

Следует отметить, что сам процесс повышения энергоэффективности есть один из самых трудоёмких и наукоёмких видов работ [4, 5] с точки зрения достижения поставленных целей и организации необходимых мероприятий. Необходимо учитывать множество вторичных факторов, которые могут быть не вовлечены во внимание, и не допустить ухудшения ключевых показателей в сопутствующих сферах, которые тесно связаны с объектом исследования.

На данный момент чаще всего встречаются два типа электростанций: конденсационная (КЭС) и тепловая (ТЭС). Главной особенностью ТЭС является когенерация – возможность выработки тепловой и электрической энергии одновременно. Возможно это благодаря наличию в технологической схеме противодавленческой турбины с отборами на теплофикацию и на собственные нужды. Очевидно, что для реализации электростанции по типу ТЭС требуется больше затрат электроэнергии на собственные нужды, чем для КЭС, что неизбежно влечёт за собой снижение показателей энергоэффективности. Необходимо проанализировать величину снижения этих показателей и предложить путь решения данного вопроса.

Повышению энергоэффективности электростанций посвящено не мало научно-практических работ, каж-

дая из которых предлагает уникальные и практически значимые способы решения поставленной задачи.

Анализируемые работы следует различать по месту применения, а также по глубине проработки и их готовности к практическому внедрению. Исходя из технологической схемы заводских электростанций, интерес представляют резервы электротехнических комплексов станций и их системы управления, а также регенерация теплоносителей. Рассмотрим эти вопросы подробнее.

С целью сокращения энергозатрат на гидропривод вместо классического дроссельного регулирования предлагается использование дискретного объёмного регулирования гидропривода с помощью двухпозиционных клапанов [6]. Для снижения собственных затрат на выработку тепловой и электрической энергии на ТЭС рекомендуют использовать частотные пароконденсационные теплонасосные установки, с помощью которых становится возможным глубокая утилизация низкотемпературного тепла от сбросной технической воды [7]. Для увеличения жизненного цикла оборудования тепловой электростанции, в частности электроизоляции генераторов, предлагается внедрение инновационного управления жизненного цикла оборудования, в основе которого лежит принцип диагностики с учётом измерения параметров фактического состояния контролируемых устройств [8]. С целью повышения энергоэффективности функционирования системы электроснабжения за счёт снижения потерь в электрической сети активной мощности на передачу реактивной разработан алгоритм, с помощью которого возможно определить оптимальный режим работы заводской электростанции по реактивной мощности с учётом запаса статической устойчивости [9].

В соответствии с особенностями технологических схем и условий работы теплоэнергетического оборудования необходимо устанавливать требования по составу и средствам реализации систем контроля параметров и диагностирования эксплуатационного состояния отдельных элементов для всего оборудования в целом [10]. В научной работе [11] рассматривался новый и эффективный метод стохастического поиска, а именно генетический алгоритм, в основе которого лежит принцип естественного отбора В.Р. Дарвина. Экономия топлива на действующих тепловых электростанциях достигается за счёт повышения эффективности конденсационных установок. Достичь желаемого эффекта помогает эксплуатация энергетического разделителя потоков газа, призванного поддерживать постоянное необходимое значение температуры воздуха для воды конденсатора [12]. Реализовать скрытый резерв энергоэффективности можно с помощью регенерации потерь теплоты, в частности используя исходную воду для питания энергетических котлов вместо охлаждающей воды системы технического водоснабжения для охлаждения стали и обмоток турбогенераторов [13].

Использование вторичных энергетических ресурсов (вместо дорогих первичных) в качестве сжигаемого топлива на электростанции может снизить себестоимость производимой энергии. В связи с этим разработана методика, позволяющая рассчитать экономически целесообразную топливную смесь, используемую на заводских электростанциях [14]. Повысить эффективность работы электростанции можно путём организации дополнительных отборов пара от паровой турбины, тем самым произвести замещение редуциционно-охлаждающей установки. Положительным эффектом является дополнительная выработка мощности или экономия топлива в случае отсутствия нужды в этой дополнительной мощности [15].

За счёт использования оригинального программного обеспечения, призванного определять рациональную нагрузку котлоагрегатов, можно оптимизировать работу заводской электростанции. В программу заложен принцип минимума суммарных затрат на выработку пара, необходимого для генерации электрической энергии и покрытия требуемой тепловой нагрузки [16]. Благодаря совершенствованию технологии подогрева потоков питательной воды для энергетических котлов можно достичь значительного повышения тепловой экономичности ТЭЦ [17].

Снижение эксплуатационных расходов на производство энергии, а также оптимизация режимов работы ТЭС возможно с помощью специально разработанной для этого математической модели оптимального распределения нагрузок параллельно работающих котлоагрегатов. Модель основана на методе относительных приростов расхода топлива [18]. С целью снижения потерь в окружающую среду без изменения технологической схемы и снижения надёжности оборудования произведена попытка нахождения такой минимально допустимой температуры уходящих газов, чтобы она не была ниже температуры образования влаги на хвостовых поверхностях нагрева [19].

С целью повышения энергоэффективности тепло-

вых электростанций предполагается внедрение частотно-регулируемых приводов потребителей собственных нужд, что позволит усовершенствовать работу технологического процесса, сократить потребление электрической энергии, а также реализовать более точное соблюдение технологических режимов [20]. Вопросы применения подобных преобразователей для индивидуальных приводов достаточно широко освещены в публикациях. Так, вопросам обеспечения надёжности электроприводов тепловой электростанции при помощи внедрения преобразователей частоты (ПЧ), обладающих повышенной устойчивостью к нарушениям электропитания, посвящён труд [21].

Исследовано изменение энергопотребления нагнетателей основных потребителей электрической энергии кислородно-конвертерного цеха при замене преобразователей частоты, предназначенных для пуска, на полностью регулируемый частотный преобразователь с одновременным перестроением технологической схемы их работы [22]. В качестве способа обеспечения энергоэффективности скалярных систем частотного регулирования асинхронных электроприводов рассматривается метод формирования специальных законов частотного регулирования, рассчитываемых для заданного диапазона нагрузок. Процедура расчета закона частотного управления асинхронным электроприводом выполняется на основе итерационной оптимизации [23].

Для исследования электромеханической совместимости асинхронного электропривода разработана компьютерная модель. На компьютерной модели исследовано влияние частоты ШИМ-инвертора и величины нагрузки на валу асинхронного двигателя на уровень пульсаций электромагнитного момента [24]. Рассмотрена проблема снижения отказоустойчивости частотно-регулируемого электропривода при нарушениях электропитания. Выявлено, что массовое внедрение ЧРП усугубляет проблему аварийных остановок энергоагрегатов тепловых предприятий при нарушениях электропитания – провалах напряжения либо кратковременных отключениях [25]. Определены резервы энергосбережения при частотном регулировании производительности дутьевого вентилятора с двухскоростным асинхронным двигателем водогрейного котла КВГМ-100. Предложен способ регулирования производительности тягодутьевых механизмов путем переключения преобразователя частоты с обмотки высокой скорости на обмотку низкой скорости и дроссельного регулирования в диапазонах скоростей, близких к номинальным значениям скоростей на этих обмотках [26].

Таким образом, можно констатировать факт, что большинство существующих трудов ориентированы на индивидуальное регулирование производительности приводов. Труды, посвященные групповому регулированию, встречаются крайне редко. Поэтому выбранная тема исследования является актуальной.

АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Для подтверждения актуальности выбранной темы исследования был произведен анализ состояния энер-

гоэффициентности существующих электростанций. На начало 2023 года Россия занимает 22-е место в рейтинге энергоэффективности стран согласно Американскому совету по энергоэффективной экономике (American Council for an Energy Efficient Economy) [27], уступив Бразилии, Мексике, Турции, Индонезии, Корее и т.д. К сожалению, из года в год общая картина не сильно меняется в лучшую сторону.

Этому способствуют следующие факторы:

- инертность Российской экономики;
- общее устаревание оборудования на производстве;

- консервативность и неинформированность предприятий о потенциале энергосбережения.

В РФ ведётся целенаправленная политика в области энергосбережения и энергоэффективности в стране, в частности было выпущено распоряжение Правительства РФ от 13.11.2009 №1715-р «Об энергетической стратегии России на период до 2030 года» [28], которое призвано:

- сформировать экономические стимулы для проектов в сфере энергоэффективности;
- внедрить экологическое и технологическое регулирование аспектов;
- внедрить систему энергоменеджмента на уровне государства.

Распоряжением от 19 апреля 2018 года №703-р предусматриваются действия по повышению энергетической эффективности в отношении регулируемых инфраструктурных компаний и предприятий промышленности. Целями плана являются модернизация основных фондов и увеличение вклада технологического фактора в снижение энергоёмкости валового внутреннего продукта не менее чем до 1,5% в год [29].

Одним из важнейших показателей энергоэффективной работы заводской электростанции является расход электрической энергии на эксплуатацию вспомогательного оборудования и обеспечение необходимых условий для работы персонала (затраты на собственные нужды). Представляет интерес анализ расхода вырабатываемой электроэнергии на собственные нужды по годам некоторых Российских электростанций. Информация получена с официальных сайтов энергетических компаний АО «Дальневосточная генерирующая компания» [30] и ОАО «Фортум» [31], которые согласно приложению №3 к приказу ФАС России от 08.10.2014 №631/14 должны выкладывать в общий доступ информацию о расходах электроэнергии на собственные и хозяйственные нужды генерирующего оборудования при выработке электрической и тепловой энергии (раздельно) с указанием наименования и типа станции [32].

В табл. 1 представлена информация за 2019 год о расходах электроэнергии на собственные нужды на выработку электрической и тепловой энергии различных ТЭЦ. На рис. 1 и 2 показана тенденция того, как менялся расход электрической энергии по годам на собственные нужды станций, приведённых в табл. 1.

Таблица 1

Расход электроэнергии на собственные нужды на выработку электрической и тепловой энергии

Станции	Расход электроэнергии на собственные нужды, %	
	На выработку электроэнергии	На выработку тепловой энергии
Хабаровская ТЭЦ-1	9,7	10,5
Хабаровская ТЭЦ-2	8,1	6,2
Амурская ТЭЦ-1	12,5	4,2
Владивостокская ТЭЦ-2	11,8	6,3
Благовещенская ТЭЦ	10,9	7,9
Николаевская ТЭЦ	9,9	3,9
Чульманская ТЭЦ	20,7	12,8
Комсомольская ТЭЦ-2	7	8,4
Комсомольская ТЭЦ-3	6	4,4
Артемовская ТЭЦ	9,7	1,4
Челябинская ТЭЦ-1	5,2	8,9
Челябинская ТЭЦ-2	4,5	7,1
Челябинская ТЭЦ-3	4,7	5,4
Аргаяшская ТЭЦ	7,7	4,6
Тюменская ТЭЦ-2	4,6	2,9
Тюменская ТЭЦ-1	4,4	3,9
Магнитогорская ЦЭС	6,6	3,0



Рис. 1. Расход электрической энергии по годам на выработку электроэнергии



Рис. 2. Расход электрической энергии по годам на выработку тепловой энергии

Исходя из всего вышесказанного, можно сделать вывод, что вопрос повышения энергоэффективности заводских электростанций является актуальным и с каждым годом становится все острее [33], следовательно, перспективным направлением является разработка нового метода оптимизации работы электростанций.

МЕТОДИКА РАЗРАБОТКИ ПРИНЦИПОВ ГРУППОВОГО
ЧАСТОТНО-КАСКАДНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ
ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ПОТРЕБИТЕЛЯМ СОБСТВЕННЫХ
НУЖД ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Одним из наиболее доступных и в то же время эффективных способов повышения энергоэффективности электростанций считается установка преобразователей частоты на электропривод питательных энергетических насосов (ПЭН), которые являются наиболее мощными электрическими приёмниками станции [34].

С целью снижения потребления электроэнергии собственными нуждами предложено использование принципа каскадно-частотного регулирования для управления группой насосов. В классическом варианте частотно-каскадного регулирования один насос является регулировочным, а остальные работают в номинальном режиме, то есть подключены в сети, и дросселирование отсутствует.

В данной работе предлагается регулирование, при котором все имеющиеся нагнетатели включаются от одного частотного преобразователя. При этом в зависимости от необходимого расхода воды часть имеющихся насосов отключают, а оставшиеся становятся регулировочными и настраиваются на одинаковую частоту. Чтобы определить эффективность указанного способа, на графике зависимости расхода воды от напора строятся характеристика сети и суммарные характеристики однотипных нагнетателей, включенных в параллель. Суммарные графики насосов построены в зависимости от их количества (рис. 3).

Место пересечения характеристики сети с характеристикой насоса является значением получаемого расхода воды. Если необходимый расход находится между характеристикой 1 и 2, то используется сумма двух насосов, а остальные отключаются, если между 2 и 3, то сумма трёх и т.д. (см. рис. 3). Далее за счёт поэтапного одновременного снижения частоты вращения насосов происходит плавный спуск выбранной характеристики до необходимой величины расхода воды. В случае, если требуемый расход получается достигнуть без снижения частоты, предусмотрена возможность подключения насосов непосредственно к сети, в обход частотному преобразователю. При необходимости данная особенность также позволяет организовать схему классического частотно-каскадного регулирования. На основании рассматриваемого принципа регулирования была разработана блок-схема выбора оптимального режима работы для группы однотипных насосов (рис. 4).

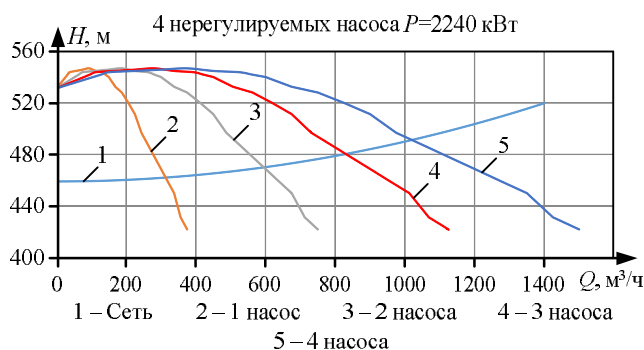


Рис. 3. Совместный график сети и график характеристики насосов

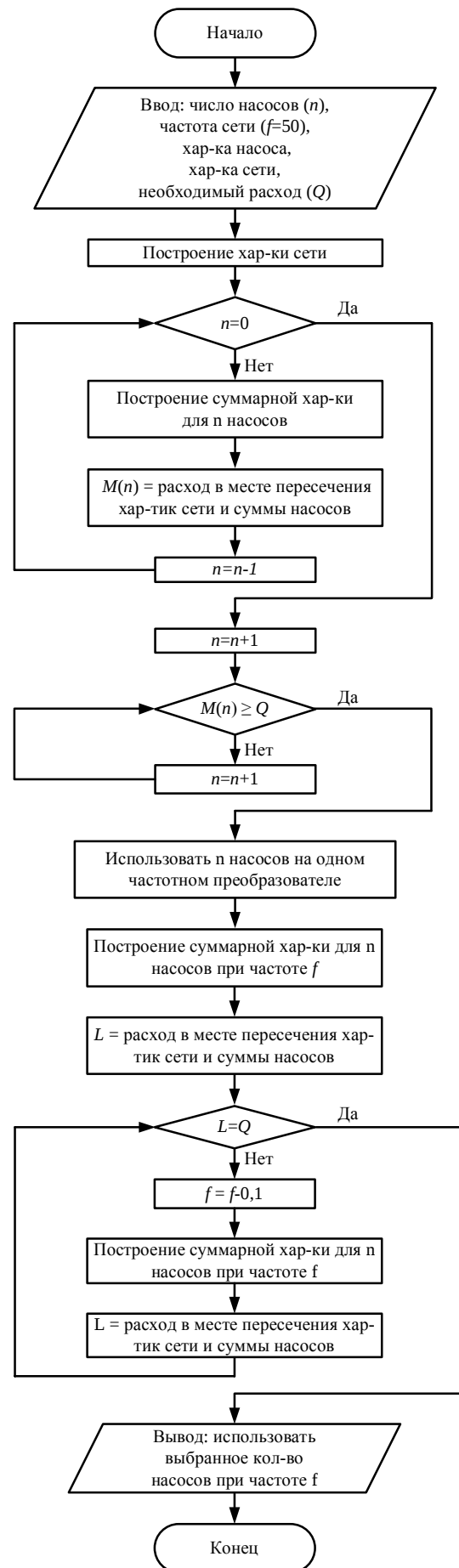


Рис. 4. Блок-схема выбора оптимального режима работы для группы однотипных насосов

С целью подтверждения эффективности разработанной методики произведён математический расчёт, представленный далее.

ПОДТВЕРЖДЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗРАБОТАННОЙ МЕТОДИКИ

Рассмотрим возможность применения принципа частотно-каскадного регулирования на выбранном объекте. Дальнейший расчёт эффективности выполнен для характерной электростанции металлургического предприятия.

Работа питательных насосов осуществляется на общий коллектор [35]. В работе всегда находятся три-четыре насоса типа ЦНСГ-300-480, другие восемь насосов разного типа находятся в резерве. Номинальная производительность ПЭН составляет от 100 до 300 м³/ч. Подача питательной воды в течение года на рассматриваемой электростанции меняется в диапазоне 730-1400 м³/ч. Регулирование производительности осуществляется либо дросселированием на насосе производительностью 250 м³/ч, либо включением или отключением насоса меньшей мощности. ПЭН подают воду из всасывающего коллектора в нагнетательный. Перепад высоты, который необходимо для этого преодолеть, составляет 4 м. Для уверенного преодоления горизонтального участка и данного перепада высоты уставка по давлению составит 5 м.

Для расчётов режимов работы, обеспечивающих различную производительность при статическом напоре 5 м, была взята из справочной литературы естественная характеристика насоса и построено семейство расчётных рабочих характеристик. Для расчёта использованы следующие соотношения:

$$\frac{Q_H}{Q} = \frac{n_H}{n}; \frac{H_H}{H} = \left(\frac{n_H}{n}\right)^2; \frac{P_H}{P} = \left(\frac{n_H}{n}\right)^3, \quad (1)$$

где Q – расход воды, м³/ч; H – напор, м; P – потребляемая мощность, Вт.

Допустим, что в работе находится 4 однотипных питательных насоса с номинальной потребляемой мощностью из сети 560 кВт каждый. Суммарная производительность ПЭН по подаче питательной воды составляет 1200 м³/ч. Согласно производственному процессу, необходимо обеспечить подачу воды в объёме 900 м³/ч. Получить данный расход возможно при помощи установки преобразователя частоты на один из питательных насосов. В таком случае, исходя из соотношений (1), общее потребление электроэнергии всеми ПЭН будет составлять $P=2146,6$ кВт. Совместный график сети и график характеристики насосов представлен на рис. 5, где H – напор воды [м], Q – расход воды [м³/ч].

Достичь необходимую величину расхода питательной воды можно и другим вариантом – установкой преобразователя частоты на два питательных насоса. Но в данном случае встаёт вопрос о наиболее эффективной нагрузке ПЭН, работающих от двух ПЧ. Для этого был проведён расчёт, в котором на разную величину одновременно менялась частота двух насосов. Результаты представлены в табл. 2.

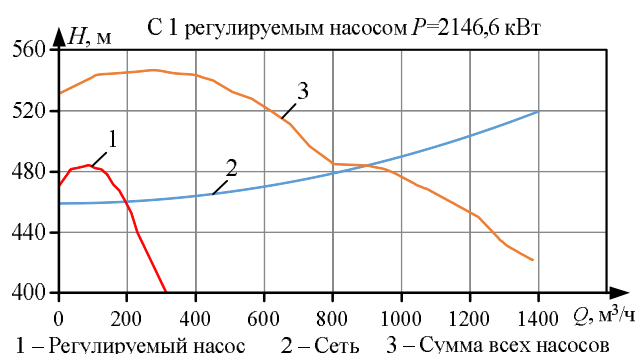


Рис. 5. Совместный график сети и график характеристики насосов при использовании одного ПЧ

Таблица 2
Мощность, потребляемая двумя регулирующими насосами при различных частотах

Частота насоса 3, Гц	Частота насоса 4, Гц	Мощность насоса 3, кВт	Мощность насоса 4, кВт	Суммарная мощность всех насосов, кВт
49,9	47,07	556,647	467,208	2143,86
49,8	47,1	553,307	468,102	2141,4
49,7	47,1	549,98	468,102	2138,08
49,6	47,1	546,667	468,102	2134,77
49,5	47,126	543,367	468,878	2132,25
49,4	47,135	540,081	469,147	2129,23
49,3	47,145	546,807	469,445	2126,25
49,2	47,155	533,548	469,744	2123,29
49,1	47,185	530,301	470,641	2120,94
49	47,185	527,067	470,641	2117,71
48,9	47,24	523,847	472,289	2116,14
48,8	47,24	520,64	472,289	2112,93
48,7	47,3	517,446	474,091	2111,54
48,6	47,4	514,265	477,104	2111,37
48,5	47,5	511,1	480,13	2111,23
48,4	47,6	507,942	483,168	2111,11
48,3	47,6	504,8	483,168	2107,96
48,2	47,75	501,671	487,751	2109,42
48,1	47,86	498,555	490,822	2109,42
48	47,85	495,452	490,822	2106,27
47,9	47,9	492,362	492,362	2104,724

Как видно из результатов, режим с наименьшим потреблением электроэнергии достигается, когда оба регулируемых электропривода насосов настроены на одинаковую частоту работы – 47,9 Гц. В таком случае общее потребление электроэнергии всеми ПЭН будет составлять $P=2104,7$ кВт. Совместный график сети и график характеристики насосов представлен на рис. 6.

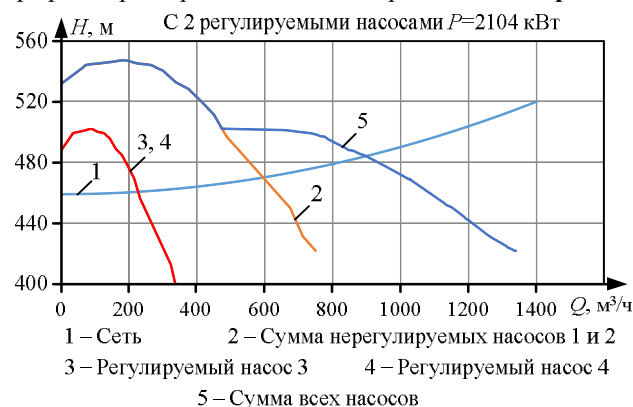


Рис. 6. Совместный график сети и график характеристики насосов при использовании двух ПЧ

Если продолжать увеличивать количество используемых преобразователей частоты, то в конечном итоге получим:

- при использовании 3-х ПЧ на частоте 48,5 Гц общее потребление электроэнергии всех четверых насосов будет составлять $P=2093,3$ кВт (рис. 7),
- при использовании 4-х ПЧ на частоте 48,85 Гц общее потребление электроэнергии всех четверых насосов будет составлять $P=2089$ кВт (рис. 8).

Таким образом, можно сделать вывод, что наибольшая экономия потребляемой из сети мощности имеет место быть, когда все 4 насоса работают на одной частоте. Наиболее эффективно регулировать все ПЭН одним частотным преобразователем, но в таком случае произойдёт снижение надёжности. Расчёт надёжности рассматриваемых схем будет произведён в дальнейших исследованиях. Следует учесть, что установка нескольких ПЧ является крайне затратным мероприятием. В связи с этим предлагается для регулирования производительности подключить только часть насосов на один преобразователь частоты и реализовать возможность переключения источника напряжения. На рис. 9 приведена функциональная схема установки ПЧ.

Также следует отметить, что питание электропривода в номинальном режиме работы от преобразователя частоты может негативно сказываться на его КПД, так как происходит снижение действующего напряжения и увеличение электрических и магнитных потерь из-за влияния коммутационной составляющей тока и высших гармоник поля статора. Возможность переключения питания с преобразователя частоты на источник синусоидального напряжения позволяет этого избежать [36].

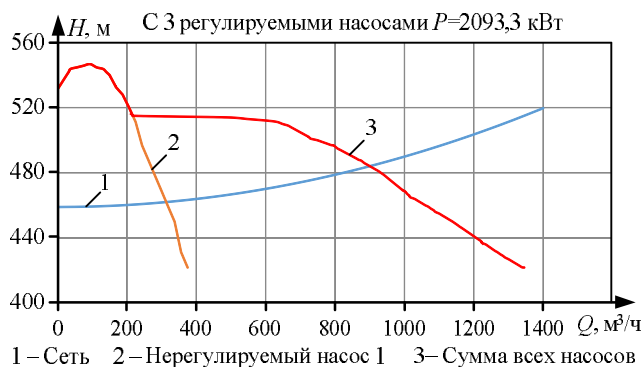


Рис. 7. Совместный график сети и график характеристики насосов при использовании трёх ПЧ

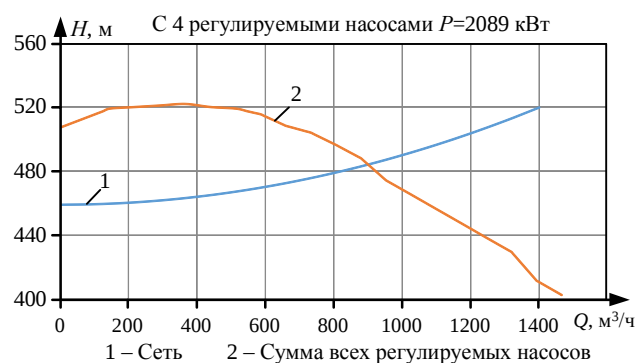


Рис. 8. Совместный график сети и график характеристики насосов при использовании четырёх ПЧ

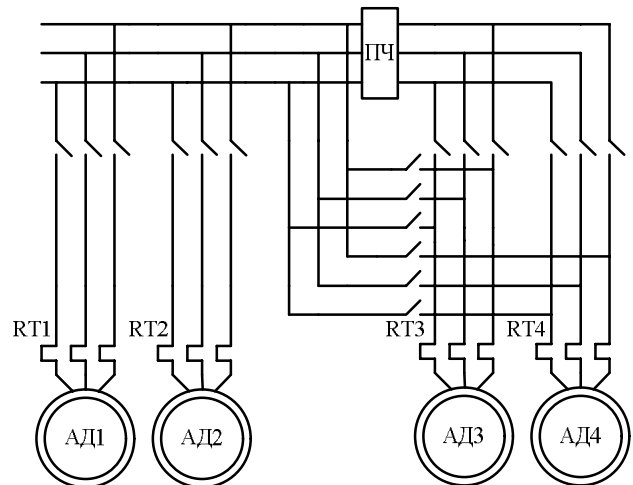


Рис. 9. Схема установки преобразователя частоты

Исходя из полученных результатов, можно констатировать, что разработанный принцип группового регулирования однотипных насосов является эффективным способом оптимизации работы электростанций.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе произведён краткий обзор литературы и анализ нынешней ситуации в области энергоэффективности электростанций. Предложена и обоснована схема регулирования части насосов от одного ПЧ с возможностью работы от сети. Разработана блок-схема выбора оптимального режима работы для группы однотипных насосов. Полученные результаты могут быть использованы при дальнейших исследованиях энергоэффективности электростанций.

Список источников

1. Способы повышения надёжности ответственных электроприводов заводских электростанций металлургических производств / К.Э. Одинцов, М.Ю. Петушков, Е.Ф. Иванов, А.А. Бочкарёв, М.М. Лыгин // Электротехнические системы и комплексы. 2021. №4(53). С. 28-32. doi: 10.18503/2311-8318-2021-4(53)-28-32
2. Повышение энергетической эффективности заводских электростанций металлургических предприятий / Г.П. Корнилов, О.В. Газизова, И.Р. Абдулвелеев, М.М. Лыгин, А.А. Бочкарёв // Электротехнические системы и комплексы. 2022. №2(55). С. 55-61. doi: 10.18503/2311-8318-2022-2(55)-55-61
3. Опыт внедрения энерго- и ресурсосберегающих технологий в системах электроснабжения металлургического предприятия / Г.П. Корнилов, А.Н. Шеметов, В.В. Шохин, Д.Ю. Усатый, М.М. Лыгин // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2022. Т. 22. №1. С. 12-20. doi: 10.14529/power220102
4. Повышение энергоэффективности и ресурсосбережение при капитальном ремонте, модернизации и утилизации двигателей асинхронных электроприводов / Р.Г. Мугалимов, Р.А. Закирова, А.Р. Мугалимова, К.Э. Одинцов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. Т. 16. №3. С. 145-159. doi: 10.18503/1995-2732-2018-16-3-145-159
5. Парсункин Б.Н., Полухина Е.И., Петрова О.В. Производственно-экономические показатели для динамической оптимизации энергосберегающего управления электродвигателями технологическими агрегатами // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2015. №4(52). С. 105-111.

6. Титаренко В.Б., Алейникова Д.В., Устинов С.А. О разработке энергоэффективных методов объёмного регулирования гидравлических приводов // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2020. №1(236). С. 85-88.
7. Скрипник А.Е., Безруков Р.Е. Оптимизация технологии выработки электроэнергии и теплоты на ТЭС // Научный электронный журнал Меридиан. 2020. №6(40). С. 276-278.
8. Оклея П.И. Внедрение в практику управления эксплуатацией тепловых электростанций инструментальных средств контроля состояния оборудования по старению электроизоляционных материалов // Транспортное дело России. 2015. №4. С. 66-71.
9. Учёт статической устойчивости синхронных генераторов в задаче планирования оптимальных режимов собственных электростанций по реактивной мощности / О.В. Газизова, А.В. Варганова, А.В. Малафеев, Н.Т. Патшин, А.Л. Карякин // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2019. Т. 19. №3. С. 23-33. doi: 10.14529/power190303
10. Борисов Г.М. Повышение эффективности работы ТЭС при организации контроля параметров и диагностики эксплуатационного состояния теплоэнергетического оборудования // Энергосбережение и водоподготовка. 2007. №2(46). С. 34-36.
11. Поздников С.Е., Казыева А.И. Применение генетического алгоритма для решения оптимизационных задач в электроэнергетике // Современные технологии: актуальные вопросы, достижения и инновации: сборник статей XII Международной научно-практической конференции. Пенза, 2017. С. 65-67.
12. Повышение эффективности работы тепловой электростанции / О.Н. Попов, П.Н. Никулин, Р.Ю. Чубаров, А.И. Шпаков // Цифровая трансформация в энергетике: материалы Всероссийской научной конференции. Тамбов: Тамбовский государственный технический университет, 2020. С. 77-80.
13. Возможности регенерации бросовой теплоты турбогенераторов ТЭЦ в схеме подготовки подпиточной воды теплосети / М.М. Замалеев, В.И. Шарапов, И.А. Марков, К.С. Нарышкина, И.В. Губин // Энергосбережение и водоподготовка. 2020. №1(123). С. 21-23.
14. Varganova A.V., Lygin M.M., Khramshin V.R. Fuel mix optimization of utility boilers of industrial power stations // Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). IEEE, 2018. 8728625. doi: 10.1109/ICIEAM.2018.8728625
15. Повышение эффективности работы электростанций путём организации дополнительных отборов пара от паровых турбин / В.Б. Новосёлов, Ю.М. Бродов, Е.В. Литвинов, В.В. Лебедев, А.Г. Михайлов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2018. Т. 20. №1-2. С. 90-99.
16. Варганова А.В., Малафеев А.В. Энергоэффективное распределение тепла в котлоагрегатах промышленных электростанций с применением ЭВМ // Электрические станции. 2017. №11(1036). С. 23-27.
17. Шарапов В.И., Кузьмин А.В. Расчёт энергетической эффективности усовершенствованных схем подогрева исходной воды в системах регенерации паровых турбин ТЭЦ // Труды Академэнерго. 2017. №3. С. 53-65.
18. Житаренко В.М. Диаграммы оптимального распределения нагрузок между котлами ТЭЦ // Вестник Приазовского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2014. №28. С. 118-123.
19. Будаков И.В., Буров В.Д. Определение точки росы за котлом-утилизатором с целью оптимизации температуры уходящих газов // Новое в российской электроэнергетике. 2011. №11. С. 35-45.
20. Повышение надёжности электроприводов тепловой электростанции при внедрении преобразователей частоты // О.И. Осипов, А.С. Карандаев, В.Р. Храмшин, Т.Р. Храмшин // Электротехника. 2017. №1. С. 28-34.
21. Технологическая востребованность и оценка эффективности внедрения частотно-регулируемых электроприводов на объектах тепловой электростанции / В.Н. Медведев, А.С. Карандаев, О.И. Карандаева, Ю.И. Мамлеева, Е.А. Храмшина // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2012. №6. С. 109-114.
22. Бунин А.А., Газизова О.В., Тарасов В.М. Анализ статической устойчивости и энергопотребления синхронных двигателей при их подключении к преобразователям частоты с изменением технологических и электрических параметров режима работы // Электротехнические системы и комплексы. 2016. №4(33). С. 49-60. doi: 10.18503/2311-8318-2016-4(33)-49-60
23. Браславский И.Я., Костылёв А.В., Есаулкова Д.В. Применение нейронного кластерного анализа для формирования закона частотного управления в асинхронном электроприводе // Электротехнические системы и комплексы. 2014. № 3(24). С. 4-9.
24. Татаринцев Д.Е., Григорян А.С., Пименова И.А. Обеспечение электромеханической совместимости в частотно-регулируемых асинхронных электроприводах при регулировании частоты ШИМ // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2016. Т. 16, №1. С. 80-86. doi: 10.14529/power160112
25. Анализ интенсивности отказов частотно-регулируемых электроприводов районных тепловых станций при нарушениях электроснабжения / В.Р. Храмшин, К.Э. Одинцов, А.Р. Губайдуллин, О.И. Карандаева, Ю.Н. Кондрашова // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2014. Т. 14, №2. С. 68-79.
26. Оценка ресурса энергосбережения в электроприводе дутьевого вентилятора с двухскоростным асинхронным электродвигателем / А.А. Радионов, А.С. Карандаев, Р.Р. Храмшин, А.Р. Губайдуллин, Е.А. Храмшина // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2014. Т. 14, №3. С. 61-70.
27. The International Energy Efficiency Scorecard. URL: <https://www.aceee.org/portal/national-policy/international-scorecard> (дата обращения 06.12.2022).
28. Энергетическая стратегия России до 2030 года. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/15357> (дата обращения 06.12.2022).
29. Распоряжение Правительства РФ №703-р «Об утверждении комплексного плана по повышению энергетической эффективности экономики России». URL: <http://government.ru/docs/32368/> (дата обращения 06.12.2022).
30. Акционерное общество «Дальневосточная генерирующая компания». Стандарты раскрытия информации субъектами оптового и розничных рынков электроэнергетики. URL: <https://www.dvgk.ru/page/326> (дата обращения 06.12.2022).
31. ОАО «Фортум». Информация субъекта рынка электрической энергии. URL: <https://www.fortum.ru/informaciya-subekta-rynka-elektricheskoy-energii> (дата обращения 06.12.2022).
32. Приказ Федеральной антимонопольной службы от 8 октября 2014 г. №631/14 «Об утверждении форм раскрытия информации субъектами оптового и розничных рынков электрической энергии, не являющимися субъектами естественных монополий». URL: <https://fas.gov.ru> (дата обращения 06.12.2022).
33. Ciontu M., Bratu C. Program for Efficiency Analizing for Variable Speed Drive of Pumps // 3rd International Symposium on Electrical and Electronics Engineering (ISEEE).

- IEEE, 2010. Pp. 298-302. doi: 10.1109/IEEE.2010.5628496
34. Ahmed A., Moharam B., Rashad E. Power Saving of Multi Pump-Motor Systems Using Variable Speed Drives // 20th International Middle East Power Systems Conference (MEPCON). IEEE, 2018. Pp. 839-844. doi: 10.1109/MEPCON.2018.8635157
35. Hoang A.T., Nguyen T.V., Nguyen B.T. The Novel Design

Поступила в редакцию 05 декабря 2022 г.

- of Feed-water Control System for Thermal Power Plant Using Super-critical Start-up Motor-Boiler Feed-water Pump // PES/IAS PowerAfrica. IEEE, 2020. Pp. 1-5. doi: 10.1109/PowerAfrica49420.2020.9219903
36. Шестаков И.В., Сафин Н.Р. Модернизация системы частотно-регулируемого асинхронного электропривода // Вестник концерна ВКО «Алмаз-Антей». 2019. №2(29). С. 62-83.

Принята к печати 20 декабря 2022 г.

INFORMATION IN ENGLISH

IMPROVING THE POWER PLANT ENERGY EFFICIENCY THROUGH THE USE OF FREQUENCY-CASCADE REGULATION PRINCIPLE FOR FEED PUMP DRIVES

Maksim M. Lygin

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

The paper considers the issue of improving the factory power plant energy efficiency. The literature review was carried out, which presents domestic scientific works. The analysis results of the current state of power plant energy efficiency in the country are presented. It is revealed that one of the main factors reducing the power plant energy efficiency is the consumption of electricity for their own needs. In order to reduce the electricity consumption by own needs, it is proposed to use the principle of cascade-frequency regulation to control the pumps group. Feed pumps of a factory power plant with feed water cross-links were selected as the research object. An example of the four feed pump operation on a common collector with the condition of maintaining the necessary water flow at a given network pressure is considered. Instead of traditional throttling, it is proposed to regulate the pump performance by changing the drive rotation speed. This reduces the consumption of electrical energy. A distinctive feature of the proposed control scheme is that part of the pumps necessary to maintain a given feed water flow rate are connected to the single frequency converter. The regulation takes place with the same rotation speed. To bring the pump into nominal operation mode, a workaround is provided that allows you to connect the electric drive directly to the mains. A flowchart for choosing the optimal operating mode for a group of similar pumps has been developed. For a given network characteristic, various options for connecting pumps via frequency converters and their resulting characteristics are obtained. The operation expediency of a pump group with different frequency and load when working on a common network is considered. Recommendations have been developed for the use of frequency-controlled noses, taking into account the minimum costs for the given performance.

Keywords: power plant, efficiency improvement, self-consumption, throttling, adjustable drive, frequency converter, feed pumps, power saving

REFERENCES

- Odintsov K.E., Petushkov M.Yu., Ivanov E.F., Bochkarev A.A., Lygin M.M. Ways to improve the reliability of responsible electric drives of factory power plants of metallurgical industries. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2021, no. 4(53), pp. 28-32. doi: 10.18503/2311-8318-2021-4(53)-28-32 (In Russian)
- Kornilov G.P., Gazizova O.V., Abdulvelev I.R., Lygin M.M., Bochkarev A.A. Improving the energy efficiency of factory power plants of metallurgical enterprises. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2022, no. 2(55), pp. 55-61. doi:10.18503/2311-8318-2022-2(55)-55-61 (In Russian)
- Kornilov G.P., Shemetov A.N., Shokhin V.V., Usaty D.Yu.,

- Lygin M.M. Experience in the implementation of energy- and resource-saving technologies in the power supply systems of a metallurgical enterprise. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of the South Ural State University], 2022, vol. 22, no. 1, pp. 12-20. doi: 10.14529/power220102 (In Russian)
- Mugalimov R.G., Zakirova R.A., Mugalimova A.R., Odintsov K.E. Improving energy efficiency and resource conservation during major repairs, modernization and utilization of asynchronous electric drive motors. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Bulletin of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2018, vol. 16, no. 3, pp. 145-159. doi:10.18503/1995-2732-2018-16-3-145-159. (In Russian)
 - Parsunkin B.N., Polukhina E.I., Petrova O.V. Production and economic indicators for dynamic optimization of energy-saving control of electric arc technological units. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Bulletin of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2015, no. 4(52), pp. 105-111. (In Russian)
 - Titarenko V.B., Aleynikova D.V., Ustinov S.A. Energy-efficient methods of hydraulic drives volumetric regulation. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of the Volgograd State Technical University], 2020, no. 1(236), pp. 85-88. (In Russian)
 - Skipnik A.E., Bezrukov R.E. Optimization of electricity and heat generation technology at thermal power plants. *Nauchnyy elektronnyy zhurnal meridian* [Scientific electronic journal Meridian], 2020, no. 6(40), pp. 276-278. (In Russian)
 - Okley P.I. Introduction into the practice of managing the operation of thermal power plants by instrumental means of monitoring the equipment condition for the aging of electrical insulating materials. *Transportnoe delo Rossii* [Transport business of Russia], 2015, no. 4, pp. 66-71. (In Russian)
 - Gazizova O.V., Varganova A.V., Malafeev A.V., Patshin N.T., Karyakin A.L. Taking into account the static stability of synchronous generators in the task of planning optimal modes of own power plants by reactive power. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of the South Ural State University], 2019, vol. 19, no. 3, pp. 23-33. doi:10.14529/power190303 (In Russian)
 - Borisov G.M. Improving the efficiency of thermal power plants in the organization of parameter monitoring and diagnostics of the thermal power equipment operational condition. *Energobezrezhenie i vodopodgotovka* [Energy saving and water treatment], 2007, no. 2 (46), pp. 34-36. (In Russian)
 - Pozdnikov S.E., Kazyeva A.I. Application of a genetic algorithm for solving optimization problems in the electric power

- industry. *Sovremennyye khnologii: aktualnye voprosy, dostizheniya i innovatsii. Sbornik statey XII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Collection of articles of the XII International Scientific and Practical Conference "Modern technologies: current issues, achievements and innovations"]. Penza, 2017, pp. 65-67. (In Russian)
12. Popov O.N., Nikulin P.N., Chubarov R.Yu., Shpakov A.I. Improving the efficiency of the thermal power plant. *Tsifrovaya transformatsiya v energetike: Materialy Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii* [Materials of the All-Russian Scientific Conference "Digital Transformation in the Energy sector"]. Tambov, Tambov State Technical University Publ., 2020, pp. 77-80. (In Russian)
 13. Zamaleev M.M., Sharapov V.I., Markov I.A., Naryshkina K.S., Gubin I.V. Possibilities of regeneration of waste heat of turbine generators at thermal power plants in the scheme of make-up water preparation in the heating network. *Energoberezhenie i vodopodgotovka* [Energy saving and water treatment], 2020, no. 1(123), pp. 21-23. (In Russian)
 14. Varganova A.V., Lygin M.M., Khrumshin V.R. Fuel mix optimization of utility boilers at industrial power stations. Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). IEEE, 2018. 8728625. doi: 10.1109/ICIEAM.2018.8728625
 15. Novoselov V.B., Brodov Yu.M., Litvinov E.V., Lebedev V.V., Mikhaylov A.G. Improving the efficiency of power plants by organizing additional steam extraction from steam turbines. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki* [Power engineering: research, equipment, technology], 2018, vol. 20, no.1-2, pp. 90-99. (In Russian)
 16. Varganova A.V., Malafeev A.V. Energy-efficient heat distribution in boilers of industrial power plants using computers. *Elektricheskie stantsii* [Electrical stations], 2017, no. 11(1036), pp. 23-27. (In Russian)
 17. Sharapov V.I., Kuzmin A.V. Calculation of the energy efficiency of improved source water heating schemes in thermal power plant steam turbine regeneration systems. *Trudy Akademenergo* [Proceedings of Akademenergo], 2017, no. 3, pp. 53-65. (In Russian)
 18. Zhitarenko V.M. Diagrams of optimal load distribution between CHP boilers. *Vestnik Priazovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki* [Bulletin of the Azov State Technical University. Series: Technical Sciences], 2014, no. 28, pp. 118-123. (In Russian)
 19. Budakov I.V., Burov V.D. Determination of the dew point behind the heat recovery boiler in order to optimize the temperature of the exhaust gases. *Novoe v rossiyskoy elektroenergetike* [New in the Russian electric power industry], 2011, no. 11, pp. 35-45. (In Russian)
 20. Osipov O.I., Karandaev A.S., Khrumshin V.R., Khrumshin T.R. Improving the reliability of electric drives of a thermal power plant with the introduction of frequency converters. *Elektrotehnika* [Electrical engineering], 2017, no. 1, pp. 28-34. (In Russian)
 21. Medvedev V.N., Karandaev A.S., Karandaeva O.I., Mandleeva Yu.I., Khrumshina E.A. Technological relevance and efficiency assessment-news of the introduction of frequency-controlled electric drives at thermal power plant facilities. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta* [Vestnik IGEU], 2012, no. 6, pp. 109-114. (In Russian)
 22. Bunin A.A., Gazizova O.V., Tarasov V.M. Analysis of static stability and power consumption of asynchronous motors when they are connected to frequency converters with changes in technological and electrical parameters of the operating mode. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2016, no. 4(33), pp. 49-60. doi: 10.18503/2311-8318-2016-4(33)-49-60 (In Russian)
 23. Braslavskiy I.Ya., Kostylev A.V., Esaulkova D.V. Application of neural cluster analysis for the formation of the frequency control law in an asynchronous electric drive. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2014, no. 3(24), pp. 4-9. (In Russian)
 24. Tatarinov D.E., Grigoryan A.S., Pimenova I.A. Ensuring electromechanical compatibility in frequency-controlled asynchronous electric drives when adjusting the PWM frequency. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of the South Ural State University], 2016, vol. 16, no. 1, pp. 80-86. doi: 10.14529/power160112 (In Russian)
 25. Khrumshin V.R., Odintsov K.E., Gubaydullin A.R., Karandaeva O. I., Kondrashov Yu.N. Analysis of the failure rate of frequency-controlled electric drives of district heating stations in case of power supply failures. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of the South Ural State University], 2014, vol. 14, no. 2, pp. 68-79. (In Russian)
 26. Radionov A.A., Karandaev A.S., Khrumshin R.R., Gubaydullin A.R., Khrumshina E.A. Evaluation of the energy saving resource in the electric drive of a blow fan with a two-speed asynchronous electric motor. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of the South Ural State University], 2014, vol. 14, no. 3, pp. 61-70. (In Russian)
 27. The International Energy Efficiency Scorecard. Available at: <https://www.aceee.org/portal/national-policy/international-scorecard> (accessed 06 January 2023).
 28. *Energeticheskaya strategiya Rossii do 2030 goda* (Russia Energy Strategy until 2030). Available at: <https://minenergo.gov.ru/node/15357> (accessed 06 December 2022).
 29. *Rasporyazhenie Pravitelstva RF № 703-r «Ob utverzhdenii kompleksnogo plana po povysheniyu energeticheskoy effektivnosti ekonomiki Rossii»* (Decree of the Government of the Russian Federation No. 703-r "On the approval of a comprehensive plan to improve the energy efficiency of the Russian economy"). Available at: <http://government.ru/docs/32368/> (accessed 06 December 2022).
 30. *Aktionernoe obshchestvo «Dalnevostochnaya generiruyushchaya kompaniya»*. Standarty raskrytiya informatsii subektami optovogo i roznichnykh rynkov elektroenergii (Joint Stock Company "Far Eastern Generating Company". Standards of information disclosure by subjects of wholesale and retail electricity markets). Available at: <https://www.dvgk.ru/page/326> (accessed 06 December 2022).
 31. *OAO «Fortum»*. Informatsiya subyektu rynka elektricheskoy energii (Fortum OJSC. Information of the subject of the electric energy market). Available at: <https://www.fortum.ru/informatsiya-subekta-rynka-elektricheskoy-energii> (accessed 06 December 2022).
 32. *Prikaz Federalnoy antimonopolnoy sluzhby ot 8 oktyabrya 2014 g. №631/14 «Ob utverzhdenii form raskrytiya informatsii subyektami optovogo i roznichnykh rynkov elektricheskoyenergii, ne yavlyayushchimisya subyektami estestvennykh monopolii»* (Order of the Federal Antimonopoly Service of October 8, 2014 No. 631/14 "On approval of information disclosure Forms by Subjects of wholesale and retail electric energy markets that are not subjects of Natural monopolies"). Available at: <https://fas.gov.ru> (accessed 06 December 2022).
 33. Ciontu M., Bratu C. Program for Efficiency Analalizing for Variable Speed Drive of Pumps. 3rd International Symposium on Electrical and Electronics Engineering (ISEEE). IEEE, 2010, pp. 298-302. doi: 10.1109/ISEEE.2010.5628496
 34. Ahmed A., Moharam B., Rashad E. Power Saving of Multi Pump-Motor Systems Using Variable Speed Drives. 20th International Middle East Power Systems Conference (MEPCON). IEEE, 2018, pp. 839-844. doi: 10.1109/MEPCON.2018.8635157

- | | |
|--|---|
| <p>35. Hoang A.T., Nguyen T.V., Nguyen B.T. The Novel Design of Feed-water Control System for Thermal Power Plant Using Super-critical Start-up Motor-Boiler Feed-water Pump. PES/IAS PowerAfrica. IEEE, 2020, pp. 1-5. doi: 10.1109/PowerAfrica49420.2020.9219903</p> <hr/> <p>Лыгин М.М. Повышение энергоэффективности электростанций за счёт использования принципа частотно-каскадного регулирования группы приводов питательных насосов // Электротехнические системы и комплексы. 2023. № 1(58). С. 21-30. https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-1(58)-21-30</p> <hr/> | <p>36. Shestakov I.V., Safin N.R. Modernization of the frequency-controlled asynchronous electric drive system. <i>Vestnik kontserna VKO "Almaz-Antey"</i> [Journal of "Almaz – Antey" Air and Space Defence Corporation], 2019, no. 2(29), pp. 62-83. (In Russian)</p> <hr/> <p>Lygin M.M. Improving the Power Plant Energy Efficiency Through the Use of Frequency-Cascade Regulation Principle for Feed Pump Drives. <i>Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы</i> [Electrotechnical Systems and Complexes], 2023, no. 1(58), pp. 21-30. (In Russian). https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-1(58)-21-30</p> <hr/> |
|--|---|

Назирова Х.Б.¹, Абдулкеримов С.А.¹, Ганиев З.С.¹, Джураев Ш.Дж.¹, Ахъев Дж.С.²

¹ Национальный исследовательский университет «МЭИ», филиал в Душанбе, Таджикистан

² Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими, Душанбе, Таджикистан

ОЦЕНКА РЕЖИМА РАБОТЫ ИНВЕРТОРОВ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Оценено влияние инверторной системы, работающей в системе солнечной электростанции (СЭС), на показатели качества электроэнергии и влияния режимных параметров сети на работу инверторов. Измерены показатели качества электроэнергии: отклонение частоты, медленного изменения напряжения и вспомогательных параметров (активной и реактивной мощности, частоты, формы кривой тока и напряжения) в точке присоединения СЭС мощностью 54 кВт к системе электроснабжения напряжением 0,4 кВ (ведущая сеть) медицинского учреждения. Разработан алгоритм анализа влияния работы инверторов (ведомая сеть) с ведущей сетью. Рассмотрены режимы работы системы инверторов солнечной электростанции, где установлены инверторы японского производства марки Omron, на примере СЭС Научно-исследовательского института акушерства, гинекологии и перинатологии в г. Душанбе. Были рассмотрены влияние работы инверторов на качество электроэнергии в распределенных сетях 0,4 кВ. Оценены результаты измерения показателей качества электроэнергии и вспомогательных параметров на рассматриваемом энергообъекте. Проанализированы режимы работы системы инверторов в течение 7 дней. В результате измерений выявлено, что инверторная система потребляет реактивную мощность от сети 0,4 кВ. В режиме холостого хода потребляемая реактивная мощность системы инверторов от сети составляет до 5% от установленной мощности. При полной нагрузке инверторной системы потребляемая реактивная мощность достигает до 15% относительно преобразованной активной мощности. При выходе значений частоты и напряжения сети за пределы установленного коридора ($\pm 0,4$ Гц) ($\pm 10\%$) инверторная система отключает СЭС от сети. Предложена методика выбора компенсирующих устройств в зависимости от нагрузки инверторов.

Ключевые слова: солнечная электростанция, измерения, инвертор, распределительные сети, ведомая сеть, ведущая сеть, отклонение частоты, отклонение напряжения, активная и реактивная мощность

ВВЕДЕНИЕ

Республика Таджикистан географически расположена в благоприятной зоне солнечного сияния. Продолжительность солнечных дней в республике составляет до 280 дней в году [1-4]. Согласно данным «globalsolaratlas» минимальное глобальное горизонтальное солнечное излучение (ГТСИ) составляет 1273 кВт·ч/м² в долинах и максимальное 2084 кВт·ч/м² – в высокогорье [1, 3, 4]. Согласно «Стратегии развития Республики Таджикистан» до 2030 года предусматривается диверсификация источников электрической энергии с применением и развитием возобновляемых источников энергии, преимущественно с использованием солнечной энергии [2, 4].

В последние годы в республике внедряется распределенная генерация солнечных источников энергии в электрические сети. На территории страны функционируют десятки СЭС установленной мощностью от 50 до 100 кВт.

Необходимо отметить, что в солнечных электрических установках мощностью более 5 кВт установка аккумуляторных батарей приводит к удорожанию конструкции в целом за счёт высокой стоимости и относительно короткого срока службы аккумуляторных батарей [5]. Для установок мощностью 5 кВт и выше рекомендуется использовать сетевые инверторы для синхронизации работы СЭС параллельно с электрической сетью. Это позволит оптимизировать работу установок без использования аккумуляторных батарей, при этом возможен реверс электроэнергии от СЭС в сеть и обратно.

В работе [6] приводится общая характеристика и пути преобразования солнечной энергии в другие виды энергии. Определяются проблемы неконкурентоспособности солнечной энергетики относительно суточно-

го графика выработки и предлагаются способы решения этой проблемы.

В статье [5] представлены цели и задачи регулирования напряжения в распределительных сетях 0,4 кВ. Приводятся результаты исследования влияния регулирования напряжения на режим потребления и потерь электроэнергии в распределительных сетях Республики Таджикистан. В работе [3] приводится краткий анализ энергопотребления баз сотовой связи, в том числе автономных, с использованием солнечной энергии. Разработана математическая модель для расчёта баланса мощности между электрической сетью и солнечной установкой. Показана экономическая эффективность применения плоского голографического концентратора для электроснабжения сотовой базовой станции.

Работа [7] посвящена разработке технологии оптимального управления гибридной энергосистемой независимого типа с ветровой и солнечной генерацией, обеспечивающей стабильное электроснабжение потребителей. Данная система включает инверторы от ветровой и солнечной электроустановок, аккумуляторные батареи и генератор. Для повышения надёжности каждый инвертор соединен параллельно с генератором, который работает в резервном режиме.

В работе [4] рассмотрены режимы работы магистральной линии электропередачи 0,4 кВ в г. Душанбе Республики Таджикистан совместно с распределенной солнечной генерацией. Исследованы вариации месторасположения распределенной солнечной генерации в начале, середине и конце линии электропередачи. Установлено, что при размещении солнечной генерации в начале линии потери мощности и отклонение напряжения будут больше в конце линии. При равномерном распределении нагрузки и солнечной генерации по линии потери мощности и напряжения будут распределяться равномерно.

В работе [8] была проанализирована работа солнечной фотоэлектрической системы (СФС) на основе мик-

росети мощностью 200 кВт. Для анализа системы была смоделирована микросеть в программном комплексе Matlab/Simulink. Система состоит из двух установок СФС, подключенных к сети, мощность каждой установки составляет 100 кВт. Полученные результаты показывают отслеживание пиковой мощности СФС для каждого значения освещенности и температуры окружающей среды. При управлении режимом работы СФС можно контролировать активную мощность, подаваемую в сеть, и изменять ее до любого эталонного значения.

Обычно при параллельной работе с сетью, инверторы работают без компенсирующих устройств. При этом такие устройства потребляют из сети реактивную мощность. Поэтому этот процесс приводит к перегрузке сетей по реактивной мощности и к увеличению коэффициента реактивной мощности, что в конечном итоге приводит к увеличению температуры токоведущих частей и, соответственно, потере активной мощности. С этой точки зрения появляется интерес к оценке режимов работы инверторов и электромагнитной совместимости с сетью при параллельной работе. Для этого произведены измерения параметров электрической сети, в том числе показателей качества электроэнергии в точке подключения [7, 8]. Обзор отечественных и зарубежных исследований показал, что к данной проблеме в рассмотренных источниках не придано особого внимания [1, 4-6, 9-14].

Работы [10, 11] посвящены солнечным батареям и инверторам, подключенным к сети, и их характеристикам. Солнечное излучение доступно только в дневное время. При отсутствии солнечной радиации фотоэлектрическая система и инвертор, подключенный к сети, будут простаивать. Можно увеличить использование сетевого инвертора в течение суток, так как он может работать в режиме подачи реактивной мощности, когда фотоэлектрическая мощность недоступна.

Рассматриваются характеристики управления напряжением и реактивной мощностью, подключенной к сети солнечной фотоэлектрической установки на основе моделирования [11]. В работе [12] рассматривается применение СФС на крыше, подключенная к сети, спроектированная с использованием модели System Advisor и программного обеспечения Solar Edge. При моделировании учитывались условия эксплуатации, такие как погодные условия, эффект тени, угол наклона и т.д. Используя данное программное обеспечение, для моделирования, можно оптимизировать размеры фотогальванических модулей, спроектировать цепочки сети с инверторами, выполнить технико-экономический анализ и сократить время расчета при проектировании без посещения объекта. В работе [13] рассмотрены методы регулирования активной и реактивной мощности СФС при параллельной работе её с сетью. Регулирование активной мощности от солнечного инвертора осуществляется путем модификации алгоритма отслеживания точки максимальной мощности СФС.

В приведённых источниках не придано должное внимание оценке режима работы СФС, на режимные параметры сети и показатели качества электрической энергии при её параллельной работе с сетью. Поэтому оценка режимов работы инверторов солнечных электростанций с точки зрения обеспечения качества электроэнергии при параллельной работе СФС с сетью является своевременной. В соответствии с этим разработан алгоритм анализа влияния режима работы инверторов солнечной электростанции с ведущей сетью (рис. 1).



Рис. 1. Алгоритм анализа влияния режима работы инверторов солнечной электростанции с ведущей сетью

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В качестве объекта исследования рассматривается действующая солнечная электростанция мощностью 54 кВт, которая установлена в Научно-исследовательском институте акушерства, гинекологии и перинатологии в г. Душанбе.

Для описания эксперимента используем разработанный алгоритм, который представлен на рис. 1. Измерительные анализаторы (рис. 2) подключены в точке 1 на участке от инвертора к распределительному устройству (РУ) системы электроснабжения здания роддома и в точке 2 на участке РУ и резервная дизель-генераторная установка.

В качестве средства измерения использовались анализаторы показателей качества электроэнергии «Ресурс UF2M», которые имеют свидетельство о регистрации в реестре Госстандарта РФ. Продолжительность измерений составляла 7 дней [14].

Измерялись следующие параметры:

1. Отклонение частоты.
2. Медленное изменение напряжения в фазах.
3. Активная и реактивная мощности.
4. Коэффициент мощности.
5. Коэффициенты несимметрии напряжения.
6. Коэффициенты, характеризующие несинусоидальность формы кривой напряжения.
7. Доза фликера.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Частота как электромеханический параметр является общесистемным параметром и зависит от степени регулирования на электростанциях [14]:

– отклонение частоты в электрических сетях должно находиться в интервале: нормально допустимой $\pm 0,2$ Гц в течение 95% и предельно допустимой $\pm 0,4$ Гц в течение 100 % времени периода измерения, не менее 7 дней;

– значение отклонения частоты в автономных (несинхронизированных) сетях не должно превышать: нормально допустимое значение ± 1 Гц в течение 95% времени и предельно допустимое значение ± 5 Гц в течение 100 % времени периода измерения не менее 7 дней.

На **рис. 3** и **4** соответственно приведены результаты измерений частоты и активной мощности на зажимах инвертора (см. **рис. 2**, точка 1).

Судя по графику, отклонение частоты в рассматриваемой сети не соответствует требованию нормативного документа (ГОСТ 32144 – 2013). Значения частоты находятся за границей предельно допустимого коридора ($50 \pm 0,4$) Гц, что приводит к нарушению требований нормативного документа.

Согласно многочисленным наблюдениям за работой инверторов с ведущей сетью, при превышении частоты за границы предельно допустимого коридора инвертор, согласно условиям параллельной работы генераторов, отключается от сети для сохранения устойчивости работы самого инвертора.

При совмещении графиков на **рис. 3** и **4** видно, что при выходе из зоны допустимого предела значения отклонения частоты инвертор отключается от сети, при этом генерация на зажимах инвертора будет нулевой. При нулевой генерации снижается эффективность работы солнечной станции в целом. Ухудшенное качество электроэнергии по отклонению частоты и напряжению приводит к снижению коэффициента полезного действия станции, в некоторых случаях от 90 до 30% [10-13].

Для повышения эффективности солнечных станций без аккумуляторных батарей в случае отклонения напряжения свыше норматива в точке подключения станции необходимо устанавливать стабилизаторы для поддержания уровня напряжения.

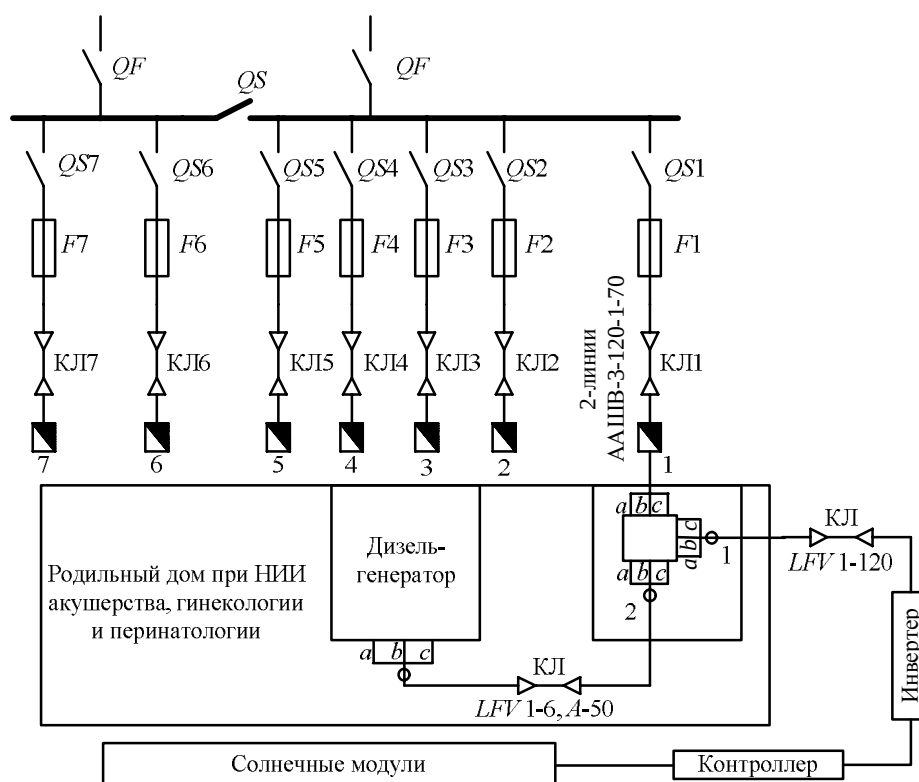


Рис. 2. Электрическая схема рассматриваемого объекта с указанием мест подключения анализаторов показателей качества электроэнергии

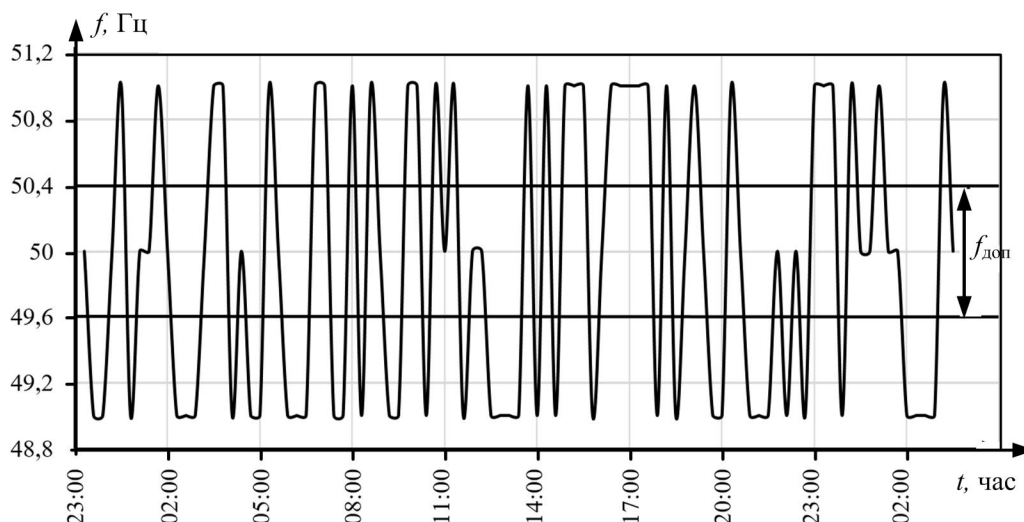


Рис. 3. График изменения частоты в точке 1

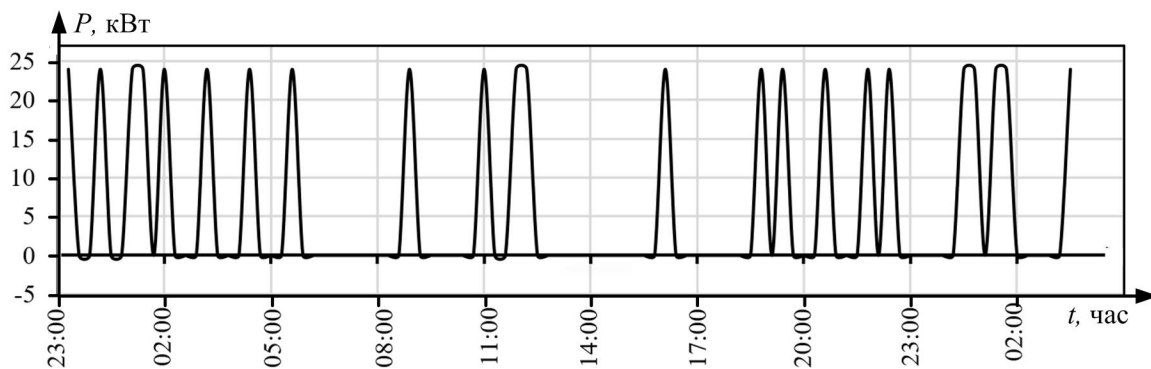


Рис. 4. График изменения активной мощности в точке 1

Отклонение напряжения, согласно ГОСТ 32144–2013, не должно превышать $\pm 10\%$ от номинального напряжения в течение 100 % интервала времени в одну неделю в точке передачи электроэнергии. Судя по представленному графику на рис. 5, отклонение напряжения находится в допустимых пределах. Работа инвертора на отклонение напряжения практически не влияет. Необходимо отметить, что режим работы ведущей сети влияет на работу инвертора.

По результатам измерения трехфазной активной и реактивной мощности на выходе инвертора, представленных на рис. 6 и 7, видно, что рассматриваемый инвертор при генерации активной мощности одновременно получает из сети реактивную мощность, которую можно определить по следующему выражению:

$$Q_{\text{ген}}^{\text{инвер}} = P_{\text{ген}}^{\text{инвер}} k_{Q_{\text{ген}}} \quad (1)$$

где $P_{\text{ген}}^{\text{инвер}}$ – активная мощность, генерируемая инвертором на выходе; $k_{Q_{\text{ген}}}$ – коэффициент генерации реактивной мощности, зависящий от типа инвертора.

При работе инверторов ток первой гармоники фазы трансформатора инвертора будет отставать от напряжения электрической сети на угол управления вентилем. Соответственно, трансформатор в режиме холостого хода (рис. 8) будет потреблять помимо активной также и реактивную мощность из сети. В режиме загрузки трансформатор инвертора потребляет от

сети только реактивную мощность, передавая активную мощность к электроприемникам [7, 8, 10].

Потребление реактивной мощности трансформатором инвертора связано с тем что, если учитывать из полного тока каждой фазы трансформатора ток основной гармоники, то он будет сдвинут в сторону отставания на некоторый угол, близкий к углу управления (угол α) вентилями, по отношению к напряжению ведущей сети (см. рис. 8). Это говорит о том, что выпрямитель потребляет из сети не только активную мощность, которая идет на поддержание работы инвертора в режиме ожидания, но и реактивную. Инвертор же генерирует в сеть активную и потребляет из сети реактивную мощность.

Современные инверторы, в отличие от прежних, потребляют малое количество реактивной мощности – порядка 10% от активной мощности, генерируемой в сеть (рис. 6 и 7).

Как отмечено выше, для поддержания режимов работы инверторов при отсутствии солнечной генерации сетевые инверторы потребляют как активную, так и реактивную мощность от ведущей сети. При холостом ходе инверторы мощностью 54 кВт (3×18 кВт) потребляют из ведущей сети порядка 500 Вт активной и 1500 ВАр реактивной мощности. Для подробного анализа значений коэффициента мощности на рис. 9 приводятся результаты измерений.

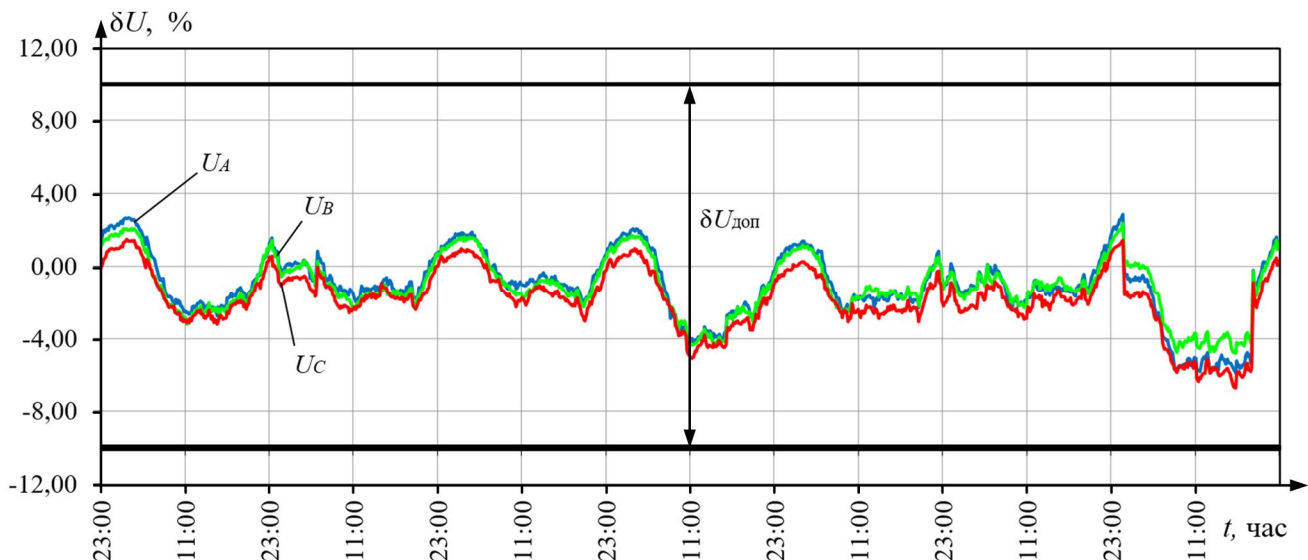


Рис. 5. Результаты измерений пофазного отклонения напряжения на зажимах инвертора

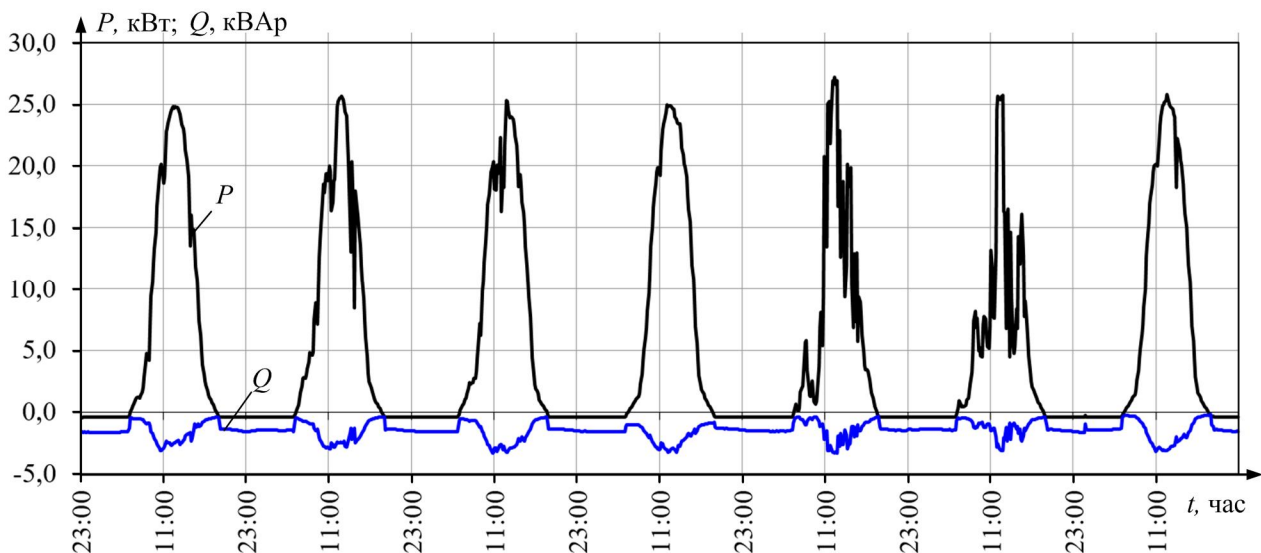


Рис. 6. Результаты измерений трехфазной активной и реактивной мощности на зажимах инвертора

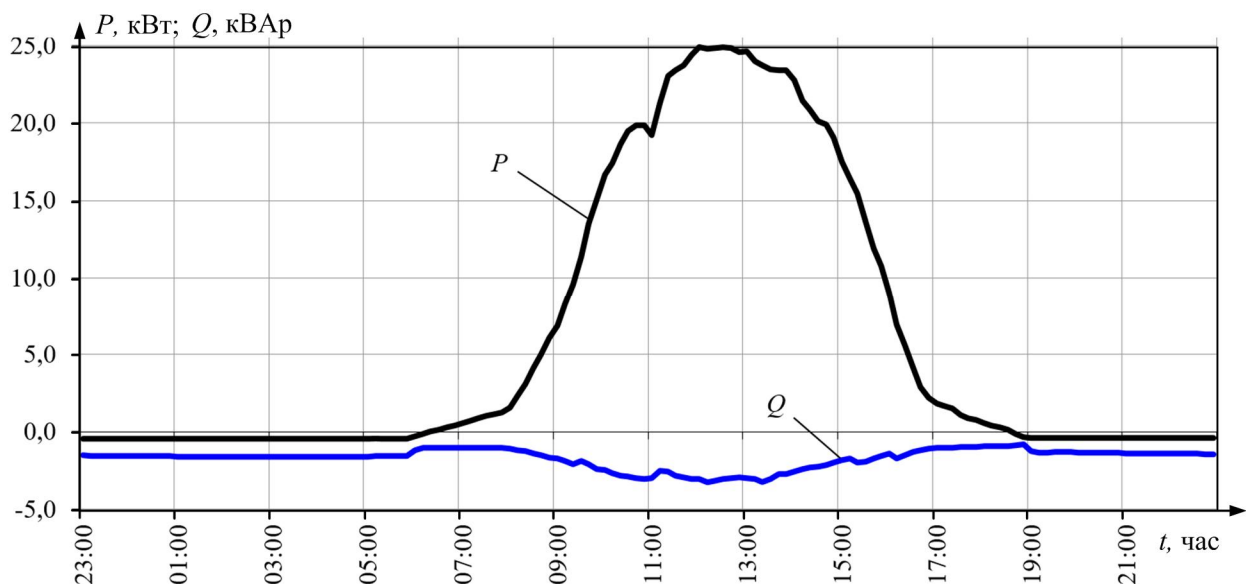


Рис. 7. Результаты измерений трехфазной активной и реактивной мощности на зажимах инвертора в течение одних суток

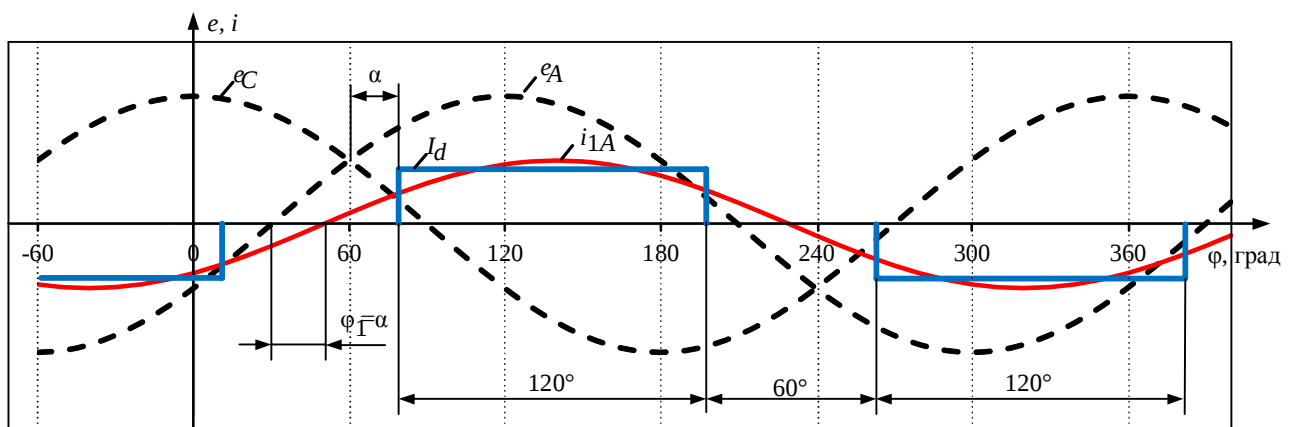


Рис. 8. Синусоида токов и напряжения инверторов ведомой сети

Как видно из суточного графика изменения коэффициента мощности (см. рис. 9), возникает необходимость компенсации реактивной мощности и поднятия коэффициента мощности в точке общего подключения инвертора к ведущей сети путём установки компенси-

рующих устройств (КУ), например батарей статических конденсаторов.

Для правильного выбора КУ выполняется расчёт компенсированной мощности конденсаторных батарей, сопоставляя их с экспериментальными данными.

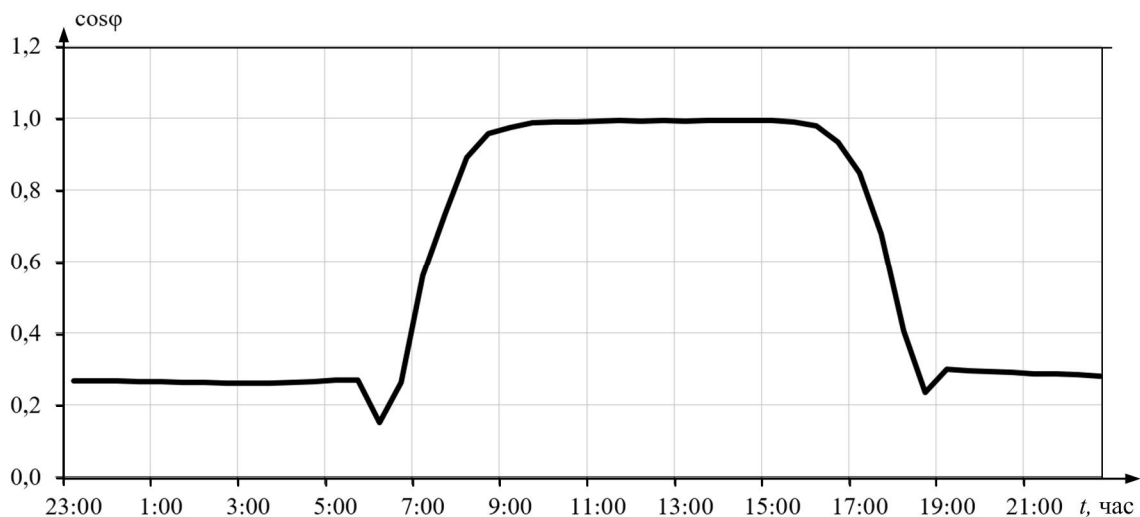


Рис. 9. Суточный график изменения коэффициента мощности солнечной установки

Определяется значение коэффициента реактивной мощности $\operatorname{tg} \varphi = \operatorname{tg}(\arccos \varphi) = \operatorname{tg}(\arccos 0,268) = 3,598$:

$$Q_{\text{комп}}^{\text{инвер}} = P_{\text{ген}}^{\text{инвер}} \operatorname{tg} \varphi = 431,930 \cdot 3,598 = 1553,982 \text{ ВАр.}$$

Как видно из сравнения результатов расчета (см. таблицу), с потребляемой мощностью инвертора выбор мощности компенсирующих устройств практически идентичен.

Для потребности сети определяется дополнительная мощность конденсаторных батарей.

В минимальном режиме

$$Q_{\text{комп}}^{\text{сет. мин}} = P_{\text{ген}}^{\text{инвер. мин}} (\operatorname{tg} \varphi + \operatorname{tg} \varphi_{\text{сет}}) = 431,930 \cdot (3,598 + 0,4) = 1726,856 \text{ ВАр.}$$

Экспериментальные данные активной, реактивной мощности и расчетные параметры компенсации реактивной мощности

Экспериментальные данные			Расчетные параметры	
Q , ВАр	$\cos \varphi$	$P_{+/-}$, Вт	$\operatorname{tg} \varphi$	$Q_{\text{комп}}^{\text{инвер}}$, ВАр
1553,982	0,268	-431,930	3,598	1553,982
1576,770	0,266	-435,029	3,625	1576,77
1564,424	0,268	-434,849	3,598	1564,424
1593,696	0,265	-438,207	3,637	1593,696
1607,354	0,265	-441,244	3,643	1607,354
1613,402	0,264	-440,753	3,661	1613,402
1627,690	0,262	-442,358	3,680	1627,69
1634,374	0,261	-442,102	3,697	1634,374
1632,241	0,261	-441,973	3,693	1632,241
1632,155	0,262	-442,290	3,690	1632,155
1627,294	0,263	-443,287	3,671	1627,294
1615,930	0,265	-443,296	3,645	1615,93
1591,704	0,270	-446,290	3,567	1591,704
1575,654	0,269	-439,548	3,585	1575,654
1084,437	0,152	8,594	3,688	1028,383
1031,821	0,262	279,743	1,480	1031,821
1037,930	0,560	701,436	0,926	1037,93
1050,311	0,734	1134,810	0,514	1050,311
1187,335	0,889	2308,634	0,303	1187,335
1535,775	0,957	5067,460	0,103	1535,44

В максимальном режиме

$$Q_{\text{комп}}^{\text{сет. макс}} = P_{\text{ген}}^{\text{инвер. макс}} (\operatorname{tg} \varphi + \operatorname{tg} \varphi_{\text{сет}}) = 5067,46 \cdot (0,103 + 0,4) = 1535,44 \text{ ВАр.}$$

Для остальных интервалов времени, расчёт осуществляется аналогичным образом (см. таблицу, обозначения: «+» – от ведущей сети к инвертору; «-» – от инвертора к ведущей сети).

Измеренные показатели качества электроэнергии, такие как коэффициенты, характеризующие несимметрию (коэффициенты несимметрии напряжения по обратной (K_{2U}) и нулевой (K_{0U}) последовательностям) и несинусоидальности формы кривой напряжения (коэффициент n -й гармонической составляющей напряжения ($K_{U(n)}$) и суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения (K_U)), а также кратковременная (P_{st}) и длительная (P_{lt}) доза фликера, были в пределах нормы (ГОСТ 32144 – 2013).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработан алгоритм анализа влияния режима работы инверторов солнечной электростанции с ведущей сетью.

2. Произведены измерения параметров электроэнергии на зажимах инверторов с помощью анализаторов показателей качества электроэнергии.

3. Установлено, что инверторы ведомой сети потребляют от ведущей сети реактивную мощность при передаче активной мощности в сеть. В режиме холостого хода потребляемая реактивная мощность составляет 5% от установленной мощности, а при полной нагрузке инвертора потребляемая реактивная мощность достигает 15% относительно преобразованной активной мощности.

4. При выходе значений частоты и напряжения сети за пределы установленных коридоров: $\pm 0,4$ Гц для частоты и ± 10 % для отклонения напряжения, солнечная электростанция отключается от сети, работая автономно в режиме холостого хода, потребляя активную и реактивную мощность от солнечных панелей.

5. Для эффективности работы инверторов ведомой сети необходимо в точке подключения к ведущей сети устанавливать в случае необходимости стабилизаторы

напряжения, а также КУ (конденсаторные батареи).

6. Предложена методика выбора компенсирующих устройств в зависимости от режима работы инверторов ведомой сети.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Шохзода Б.Т., Джураев Ш.Дж. Исследование потенциала солнечной энергии в Таджикистане // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. 2019. №1(45). С. 27-35.
2. Экспресс-оценка и анализ пробелов. Краткое резюме 2011 г. Официальный сайт Министерства энергетики и водных ресурсов Таджикистана. URL: <https://www.mewr.tj> (дата обращения 14.11.2022)
3. Энергоснабжение сотовой базовой станции за счет солнечной энергии / Б.Т. Шохзода, Х.Б. Назиров, Д.Х. Каримов, А.Ш. Маджидов // Вестник Таджикского технического университета. 2015. №4 (32). С. 57-61.
4. Study of the operating modes of the 0.4 kV main distribution network, in Dushanbe city of the Republic of Tajikistan, with distributed solar generation for power losses and power quality estimation / K.B. Nazirov, G.V. Shvedov, S.R. Chorshanbiev, S.D. Dzuraev // Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). IEEE, 2018. Pp. 737-742. doi: 10.1109/EIConRus.2018.8317197
5. Тульский В.Н., Назиров Х.Б. Исследования влияния регулирования напряжения на потребление и потери электроэнергии в распределительных сетях 10-0,4 кВ // Вестник Таджикского технического университета. 2012. №3(19). С. 57-61.
6. Солнечная энергия как источник электрической энергии / А.А. Бубенчиков, Е.Е. Нурахмет, В.О. Молодых, А.И. Руденок // Международный научно-исследовательский журнал. 2016. №5(47). С. 51-53. doi: 10.18454/IRJ.2016.47.288
7. Toshiro H., Hirofumi M., Yoichi I. Development of an independent type of hybrid power generation system // 31st International Telecommunications Energy Conference (INTELEC). IEEE, 2009. Pp. 1-5. doi: 10.1109/INTELEC.2009.5351763
8. Active Power Control of Grid Connected SPV Plant Based Microgrid Using Active Power Regulating Schem / N.U. Islam Wani, F.I. Bakhsh, P. Choudekar, Ruchira // Emerging Trends in Industry 4.0 (ETI 4.0). IEEE, 2021. Pp. 1-6. doi: 10.1109/ETI4.051663.2021.9619213
9. Дашеев С.С., Малышев Е.А. Солнечная энергетика: состояние и перспективы // Вестник науки и образования. 2018. №17(53). С. 51-53.
10. Performance Analysis of Grid-Tie Inverter for Reactive Power Injection Mode in Hybrid Wind Solar Energy System / B. Venkatasamy, Dr.L. Kalaivani, P.R. Prakash, S. Prabhu, B. Mathana Gopal // 2nd International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICOEI). IEEE, 2018. Pp. 652-656. doi: 10.1109/ICOEI.2018.8553869
11. Study on Control Characteristic of Grid-connected Solar Photovoltaic Plant Based on Simulation / Y. Liu, L. Zhang, D. Zhao, D. Wang, H. Zhang // 5th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT). IEEE, 2015. Pp. 1-6. doi: 10.1109/DRPT.2015.7432558
12. Mohanty B.P., Srivalli M. Optimization and Design of Grid Connected Rooftop Solar Power Plant under Various Operating Conditions // International Conference on Computational Intelligence for Smart Power System and Sustainable Energy (CISPSSSE). IEEE, 2015. Pp. 1954-1958. doi: 10.1109/CISPSSSE49931.2020.9212254
13. Pal D., Bajpai P. Active and Reactive Power Control in Three Phase Solar PV Inverter using Modified IC Method // 21st Century Energy Needs - Materials, Systems and Applications (ICTFCEN). IEEE, 2016. Pp. 1-6. doi: 10.1109/ICTFCEN.2016.8052727
14. ГОСТ 32144–2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Стандартинформ, 2014. 16 с.

Поступила в редакцию 12 ноября 2022 г.

Принята к печати 12 января 2023 г.

INFORMATION IN ENGLISH

INVERTER OPERATING MODE EVALUATION OF SOLAR POWER PLANTS FROM THE POWER QUALITY VIEWPOINT

Khurshed B. Nazirov

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Head of Department, Electric Power Industry Department, National Research University «MPEI» Branch, Dushanbe, Tajikistan, hurshed84@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4347-5239>

Sagid A. Abdulkirimov

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Director, National Research University «MPEI» Branch, Dushanbe, Tajikistan, top.df.mpei@ya.ru

Zokirjon S. Ganiev

Assistant Professor, Department of Electric Power Industry, National Research University «MPEI» Branch, Dushanbe, Tajikistan, zoko1981@mail.ru

Shokhin D. Juraev

Ph.D. (Engineering), Assistant Professor, Electric Power Industry Department, National Research University «MPEI» Branch, Dushanbe, Tajikistan, dzhuraevsh@mpei.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4092-2758>

Javod S. Akheev

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Electric Power Station Department, Tajik Technical University named after academician M.S. Osimi, Dushanbe, Tajikistan, javod@ttu.tj, <https://orcid.org/0000-0002-9869-288X>

The influence of the inverter system operating in the system of a solar power station (SPS) on the power quality indicators and the influence of the regime parameters of the network on the inverter operation is estimated. The following power quality indicators were measured: frequency deviation, slow voltage change and auxiliary parameters (active and reactive power, frequency, current and voltage waveforms) at the point of connection of a 54 kW solar power station to a 0.4 kV (the supply line) power supply system of a medical institution. An algorithm for analyzing the impact of inverter operation with a driven network has been developed. The operating modes of the inverter system of solar power stations, where Japanese-made inverters of the Omron brand are installed, are considered using the example of the SPS of the Research Institute of Obstetrics, Gynecology and Perinatology in Dushanbe. The influence of the inverter operation on the power quality in distributed networks of 0.4 kV was considered. The results of measuring the indicators of the power quality and auxiliary parameters at the considered power factory are evaluated. The operating modes of the inverter system were analyzed for 7 days. In idle mode, the reactive power consumption of the inverter system from the grid is up to 5% of the installed power. When the inverter system is fully loaded, the reactive power consumed increase up to 15%, relative to the converted active power. When the value of the frequency and voltage of the network goes beyond the established corridor (± 0.4 Hz) for frequency and voltage ($\pm 10\%$), the inverter system disconnects the SPS from the network. A method for choosing compensating devices, depending on the load of inverters, is proposed.

Keywords: solar power station, measurements, inverter, distribution networks, controlled network, supply line, frequency deviation, voltage deviation, active and reactive power

REFERENCES

- Shohzoda B.T., Dzhuraev Sh.Dj. Solar Energy Potential Study in Tajikistan. *Politekhicheskiy vestnik. Seriya: Inzhenernye issledovaniya* [Polytechnic bulletin. Series: Engineering studies], 2019, no. 1(45), pp. 27-35. (In Russian)
- Rapid Assessment and Gap Analysis brief summary 2011. Ministry of Energy and Water Resources of Tajikistan. 35 p. Available at: <https://www.mewr.tj> (accessed 14 November 2022)
- Shohzoda B.T., Nazirov Kh.B., Karimov D.Kh., Majidov A.Sh. Cellular base station powered by solar energy. *Vestnik Tajikskogo tekhnicheskogo universiteta* [Tajik Technical University bulletin], 2015, no. 4 (32), pp. 57-61. (In Russian)
- Nazirov K.B., Shvedov G.V., Chorshanbiev S.R., Dzhuraev S.D. Study of the operating modes of the 0.4 kV main distribution network, in Dushanbe city of the Republic of Tajikistan, with distributed solar generation for power losses and power quality estimation. Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). IEEE, 2018, pp. 737-742. doi: 10.1109/EIConRus.2018.8317197
- Tulsky V.N., Nazirov Kh.B. Studies of the influence of voltage regulation on consumption and losses of electricity in distribution networks of 10-0.4 kV. *Vestnik Tajikskogo tekhnicheskogo universiteta* [Tajik Technical University bulletin], 2012, no. 3(19), pp. 57-61. (In Russian)
- Bubenchikov A.A., Nurakhmet E.E., Molodykh V.O., Rudenok A.I. Solar energy as a source of electrical energy. *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skiy zhurnal* [International research journal], 2016, no. 5 (47), pp. 51-53. doi: 10.18454/IRJ.2016.47.288 (In Russian)
- Toshiro H., Hirofumi M., Yoichi I. Development of an independent type of hybrid power generation system. 31st International Telecommunications Energy Conference (INTELEC). IEEE, 2009, pp. 1-5. doi: 10.1109/INTLEC.2009.5351763
- Islam Wani N.U., Bakhsh F.I., Choudhary P., Ruchira. Active Power Control of Grid Connected SPV Plant Based Microgrid Using Active Power Regulating Schem. *Emerging Trends in Industry 4.0 (ETI 4.0)*. IEEE, 2021, pp. 1-6. doi: 10.1109/ETI4.051663.2021.9619213
- Dashev S.S., Malyshev E.A. Solar energy: state and prospects. *Vestnik nauki i obrazovaniya* [Bulletin of science and education], 2018, no. 17 (53), pp. 51-53. (In Russian)
- Venkatasamy B., Kalaivani Dr.L., Prakash P.R., Prabhu S., Mathana B. Gopal Performance Analysis of Grid-Tie Inverter for Reactive Power Injection Mode in Hybrid Wind Solar Energy System. 2nd International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICOEI). IEEE, 2018, pp. 652-656. doi: 10.1109/ICOEI.2018.8553869.
- Liu Y., Zhang L., Zhao D., Wang D., Zhang H. Study on Control Characteristic of Grid-connected Solar Photovoltaic Plant Based on Simulation. 5th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT). IEEE, 2015, pp. 1-6. doi: 10.1109/DRPT.2015.7432558
- Mohanty B.P., Srivalli M. Optimization and Design of Grid Connected Rooftop Solar Power Plant under Various Operating Conditions. International Conference on Computational Intelligence for Smart Power System and Sustainable Energy (CISPSSSE). IEEE, 2015, pp. 1954-1958. doi: 10.1109/CISPSSSE49931.2020.9212254
- Pal D., Bajpai P. Active and Reactive Power Control in Three Phase Solar PV Inverter using Modified IC Method. 21st Century Energy Needs – Materials, Systems and Applications (ICTFCEN). IEEE, 2016, pp. 1-6. doi: 10.1109/ICTFCEN.2016.8052727
- State Standard 32144-2013. Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality limits in the public power supply systems. Moscow, STANDARTIN-FORM Publ., 2014. 16 p. (In Russian).
- Nazirov Kh.B., Abdulkarimov S.A., Ganiev Z.S., Juraev Sh. D., Akheev J.S. Inverter Operating Mode Evaluation of Solar Power Plants from the Power Quality Viewpoint. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2023, no. 1(58), pp. 31-38. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-1\(58\)-31-38](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-1(58)-31-38)

Оценка режима работы инверторов солнечных электростанций с точки зрения обеспечения качества электроэнергии / Х.Б. Назиров, С.А. Абдулкеримов, З.С. Ганиев, Ш.Дж. Джурсаев, Дж.С. Ахъев // Электротехнические системы и комплексы. 2023. № 1(58). С. 31-38. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-1\(58\)-31-38](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-1(58)-31-38)

Nazirov Kh.B., Abdulkarimov S.A., Ganiev Z.S., Juraev Sh. D., Akheev J.S. Inverter Operating Mode Evaluation of Solar Power Plants from the Power Quality Viewpoint. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2023, no. 1(58), pp. 31-38. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-1\(58\)-31-38](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-1(58)-31-38)

Кондрашова Ю.Н., Шалимов А.В., Третьяков А.М., Снигур А.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

ОЦЕНКА ВАРИАНТОВ РЕКОНСТРУКЦИИ СХЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ДЛЯ ШЛАМОВОЙ НАСОСНОЙ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ РЕЗЕРВИРОВАНИЯ ОТВЕТСТВЕННЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ КИСЛОРОДНО-КОНВЕРТЕРНОГО ЦЕХА

Актуальность статьи обоснована ситуациями, возникающими в процессе эксплуатации шламовой насосной станции, сопровождающиеся участвовавшими затоплениями электрооборудования, что служит основанием для проведения реконструкции. Необходимо отметить, что причиной необходимости разработки решений для повышения степени резервирования являются аварии, при которых шламовая насосная остается полностью без питания или при длительном переключении на резервный ввод из-за задержки, созданной персоналом. Такие причины приводят к значительным убыткам, связанным с затоплением электрооборудования вследствие отключения питания и нахождения насосной под землей, а также приводят к остановке технологического процесса непрерывного производства крупного цеха на несколько суток. Целью данного исследования является нахождение оптимального схемного решения для шламовой насосной в конкретных промышленных условиях с учетом их расположения и особенностей режимов работы в процессе эксплуатации. Для решения проблемы затопления насосной предлагается выбор схем электроснабжения, в которых будет повышена надежность и резервируемость. В основе выбора схемы заложен комплексный подход, учитывающий параметры надежности, сокращение времени простоев и убытков, оценку параметров установившихся, аварийных и послеаварийных режимов, а также безопасность, перспективы на расширение насосной и приблизительную экономическую оценку для предложенных решений. Некоторые схемные решения реализуются в программном комплексе «Катран», основанном на сочетании методов модифицированного эквивалентирования и последовательных интервалов, для определения значения установившихся параметров системы, а также расчета аварийных замыканий на секциях 10 кВ и оценки послеаварийных параметров при дальнейшей реализации. В данной работе была выполнена разработка схем электроснабжения для реконструкции шламовой насосной станции с целью повышения надежности бесперебойного питания ответственных потребителей для повышения степени резервирования объекта. Авторами предложены варианты схем и выполнена оценка возможности их реализации в условиях действующего объекта, при этом представлена ориентировочная оценка надежности и безопасности представленных схем электроснабжения применительно к условиям кислородно-конвертерного цеха. Произведено их сравнение и описано, какие из схемных решений можно принимать к исполнению в условиях действующего объекта. Выполнена оценка технико-экономических расчетов и удобства использования.

Ключевые слова: схема электроснабжения, надежность, шламовая насосная, категории надежности, качество электроснабжения, расчет уровня напряжения, резервируемость, затопление насосной, убытки, дополнительный резервный ввод

ВВЕДЕНИЕ

Объектом исследования является шламовая насосная станция (ШНС) промышленного предприятия. ШНС включает в себя насосы, предназначенные для перекачки жидкостей с содержанием твердых примесей. Она является неотъемлемой частью технологического процесса металлургических предприятий. Шламом в данном случае являются крупные обрезки металла и шлак после установок газорезки.

Работа ШНС обычно делится на чистый и грязный циклы. Грязный цикл: вода вместе со шламом поступает на насосную. Приходящая с любого смыва, например, в цехе непрерывного литья заготовок, транспортно-отделочной линии, агрегата продольной резки и т.д., попадает в отстойник – большой резервуар, где шлак оседает, а вода далее переливается в камеры, откуда выкачивается и идет для дальнейшей очистки в радиальные отстойники. Чистый цикл: вода с небольшими примесями поступает на насосную и передается для дальнейшей очистки на фильтрующие устройства.

Источниками питания подстанции (ПС) ШНС являются ПС А и ПС Б, которые обеспечивают три ввода (рис. 1). Электроснабжение с ПС А выполнено двумя секциями 10 кВ (1СШ и 2СШ), резерв осуществляется

вводом с ПС Б, где выполнено разделение силового кабеля к секциям на два ввода.

К подстанции ШНС подключены девять двигателей мощностью 500 кВт типа ДАЗО4-85/43-4У1 и два двигателя по 400 кВт типа ДАЗО4-85/62-8У1. Питание двигателей осуществляется от двух секций 10 кВ (1СШ и 2СШ). Кроме того, на каждой секции имеется по одному генератору мощностью 7,47 МВА, работающих от пароперегревательной установки [1]. Необходимо отметить, что находится насосная на глубине – 18 м под землей и имеет несколько уровней, на которых непосредственно находятся насосы.

Данный объект ранее относился ко второй категории надежности, спустя некоторый период времени эксплуатации был приведен к условиям 1-й категории. Несмотря на то, что объект обладает должными параметрами резервирования для 1-й категории, но он не имеет достаточной степени надежности и возникает проблема его реконструкции под создавшиеся условия работы.

В процессе эксплуатации ШНС было выяснено, что крупные аварии, происходящие по различным причинам, часто приводят к полной потере напряжения на питающей ШНС подстанции. Резервный ввод не имеет АВР и не успевает отработать, вследствие этого насосная остается полностью без питания. При этом в момент погасания секций насосная начинает затопливаться приходящей водой, так как на ней присутствуют открытые резервуары с водой, такие как

отстойники и желоба, по которым приходит вода, а также открытые камеры с отстоявшейся водой. При этом необходимо отметить, что полное затопление насосной может занять около 20 минут. Времени для ликвидации аварии и запуска систем электроснабжения бывает недостаточно, что требует быстрого принятия правильного решения. Последствия подобных аварий приводят к износу двигателей и возможному выходу их из строя, также силовые кабели и их изоляция пропитываются водой и становятся непригодными для использования. Помимо очевидных проблем на самой насосной станции, останавливается цикл металлургического предприятия, при этом всё отделение может остановить работу на 4 дня, что приводит к проблемам повторного самозапуска или перегреву электрооборудования, которое не функционирует вследствие аварии, и к значительным материальным убыткам.

Важность такого объекта обуславливается тесной связью с процессом основного производства кислородно-конвертерного цеха, на территории которого производится сталь из доменного чугуна и металлического лома с применением комбинированной продувки и разливки в слябы на машинах непрерывного литья.

Область применения насосных станций достаточно широка, например для горнодобывающей, нефтегазовой, перерабатывающей, энергетической отрасли промышленности, что создает определенные трудности при проектировании и эксплуатации. Поэтому актуальность темы охватывает не только металлургическую отрасль, но и другие [2-5]. В статье Мызникова И.Л. [2] отмечено отсутствие связи между проектными институтами и производителями шламовых насосов в России, что играет негативную роль. При этом возникающие проблемы со шламовыми насосными связаны не только с процессом эксплуатации, осмотрами, а начинаются с проекта. Автором [2] предлагается разработать документ, регламентирующий расчет гидравлики насосов с учетом всех коэффициентов, подбор насоса под сеть с учетом данных пульпы, тип выбираемого насоса, материальное исполнение насоса, конструкцию и тип узлов насоса для дальнейшей длительной и надежной эксплуатации, которые будут направлены на продление сроков службы и качества эксплуатации.

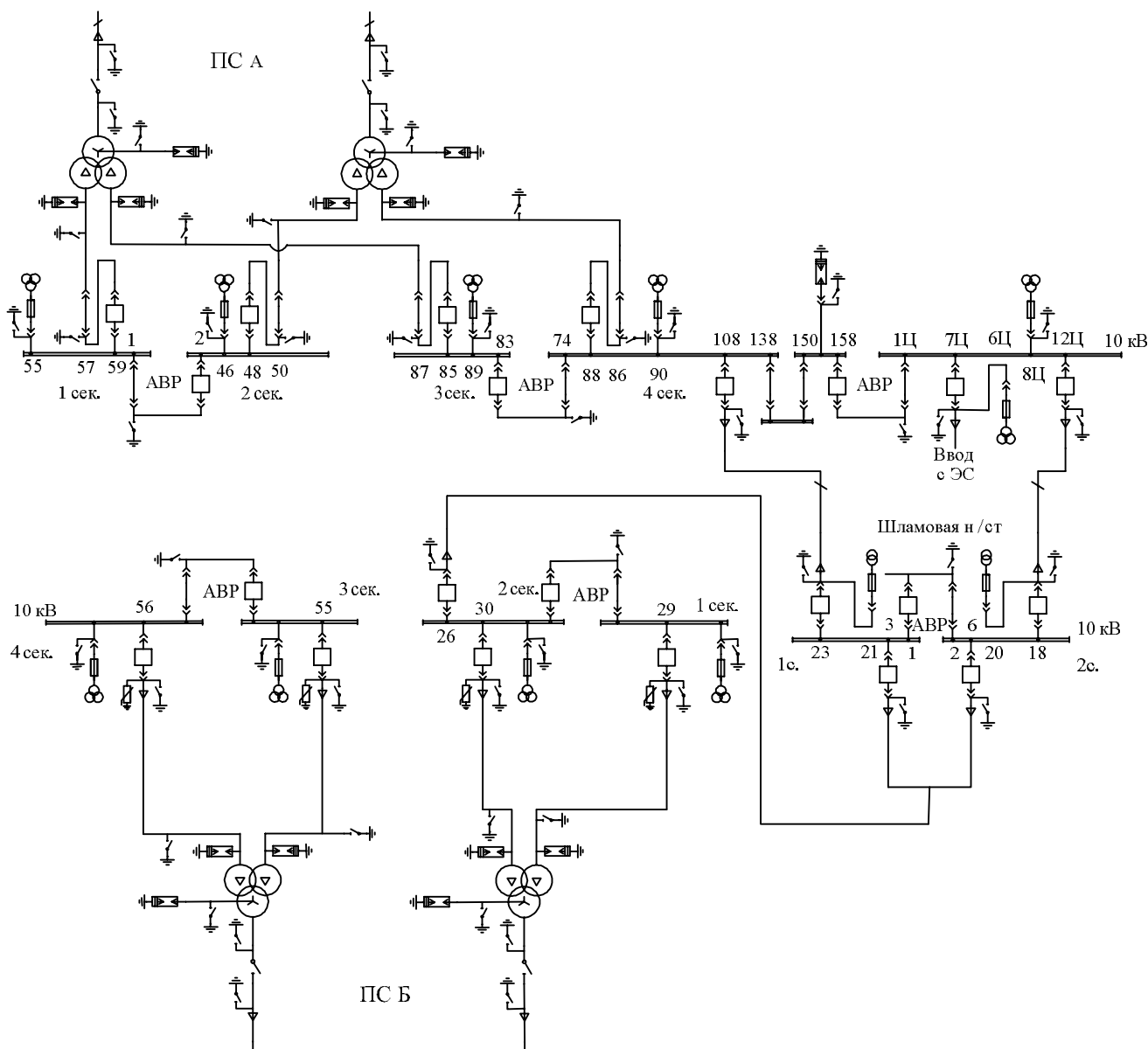


Рис. 1. Схема питания подстанции ШНС

Как было отмечено ранее, шламовые насосы широко используются и в нефтегазовой промышленности. Данные насосы являются одной из составляющих буровой установки, которые влияют на работоспособность, от них зависит бесперебойная работа и производительность циркуляционного комплекса. Авторами [3] была предложена полезная модель, решающая задачу повышения надежности работы насоса в подземных выработках при значительных колебаниях концентрации и крупности шлама, поступающего к насосу, а также надежного запуска его в условиях завала. При этом основными факторами, которые снижают долговечность шламовых насосов, считают: влияние содержимого в растворе твердых абразивных примесей; неоднородность раствора по фракционному составу; режим работы шламовых насосов; характер нагрузок шламовых насосов.

При рассмотрении вопросов, связанных с затоплением технологических объектов, коллективом авторов [4] было рассмотрено множество техногенных аварий, при этом необходимо указать наличие законодательной базы, регламентирующей подобные происшествия, рекомендации по профилактике затопления и других техногенных аварий, которые в основном должны закладываться на стадии проектирования объекта. В случае ШНС для устранения возможности затопления придется полностью изменять технологический процесс и переносить насосы на поверхность, что приведёт к дополнительным убыткам, не считая самой насосной, на насосы подкачки и дополнительные меры для перенесения труб на нулевую отметку.

Соответственно, возникает необходимость установления основных причин риска затопления насосных станций и нахождения способов их снижения, что и является основной целью работы. В связи с присутствием человеческого фактора существует вероятность аварийного затопления насосных станций в случаях переполнения сборников. Частыми причинами в последнее время имеют место случаи перегорания обмоток двигателей насосов, влекущие за собой материальные затраты на замену двигателей, а также простои оборудования, которые в отсутствие оперативных действий персонала тоже могут привести к затоплению. Для минимизации этих рисков рассмотрен ряд способов решения, которое в работе [5] направлено на создание автоматизированной системы управления на базе взрывозащищенного контроллерного оборудования.

В статье [6] рассмотрены многофункциональные терминалы, обеспечивающие безопасность для систем электроснабжения. Эти терминалы созданы для различных функций защиты, одна из них — это отключение кабелей при их затоплении, что может быть очень актуально для ШНС при затоплении. Определение затопленного кабеля поможет вовремя отключить оборудование, чтобы не произошло короткое замыкание, которое может привести к полной утрате оборудования.

Семкиным А. В. и Султановым Н. З. были рассмотрены классификации затопления промышленных объектов в статье [7]. В ней разработан новый метод для классификации объектов, которые подвергаются затоплению. Эти классы позволяют наиболее полно

оценить объекты по возможности затопления, а также процессу и причинам затопления. Это служит основой для прогнозирования и возможности дифференцирования ситуаций по опасности зон затопления. Эта статья будет актуальна для ШНС, так как алгоритм позволит оценить класс этого объекта и получить более полное представление о происходящих затоплениях.

В рамках данной работы авторы предлагают варианты схемных решений с учетом условий эксплуатации и экономических факторов. В целом необходимо отметить, что обзор источников показал, что огромное влияние на повышение надежности и улучшение условий эксплуатации оказывают не только проектные характеристики и правильный выбор электрооборудования, но и учёт специфики области эксплуатации и её особенностей. Хотя принцип действия насосов аналогичен и достаточно прост, но именно для решения поставленной цели требуется решение нескольких задач: учет специфики предшествующего технологического процесса, системы обеспечения резерва и категорийности потребителей, время простоев и нанесенный материальный ущерб, который в разы больше в промышленных условиях применительно к металлургической промышленности.

ВАРИАНТЫ СХЕМНЫХ РЕШЕНИЙ

Проблему затопления ШНС, к которой приводит полное отключение питающей насосную подстанции, предлагается решить путем реконструкции самой подстанции. Для этого выполнена разработка вариантов схем, отвечающих достаточной резервируемости электроснабжения объекта, то есть наличие трех источников питания, из которых два представлены как в исходной схеме с ПС А, а один резервный ввод с ПС Б — как дополнительный независимый источник. Помимо этого, нужно учесть скорость переключения секции на другой ввод при отключении питающего, с учётом того, что затопление насосной при отключении двигателей насосов происходит очень быстро (при полном отключении питания за 20 минут).

На **рис. 2** приведена действующая схема для шламовой насосной. На схеме видно трансформаторы напряжения на фидере ШНС-19 и ШНС-22 подключения, 11 насосов ШНС-07÷17 подключения, питание по 0,4 кВ через фидер ШНС-04, секционный выключатель с АВР и секционный разъединитель подключения ШНС-01, ШНС-02, один резервный ввод ШНС-05 и подключение 3-го резервного ввода ШНС-03, ШНС-06.

На данной схеме можно заметить, как она была реконструирована под I категорию электроснабжения, был добавлен ввод №3 и подключен к ШНС-03- и ШНС-06-присоединению. Это обеспечивает категорию, однако, как показала эксплуатация, не является надежным решением для данной насосной. Тем не менее отключения приводят к затоплению, так как не успевает отрабатывать оперативный персонал и переключить питание на ввод №3 при погасании первых двух. Для этой проблемы разработаны три схемных решения для ШНС, которые будут обеспечивать достаточное резервирование.

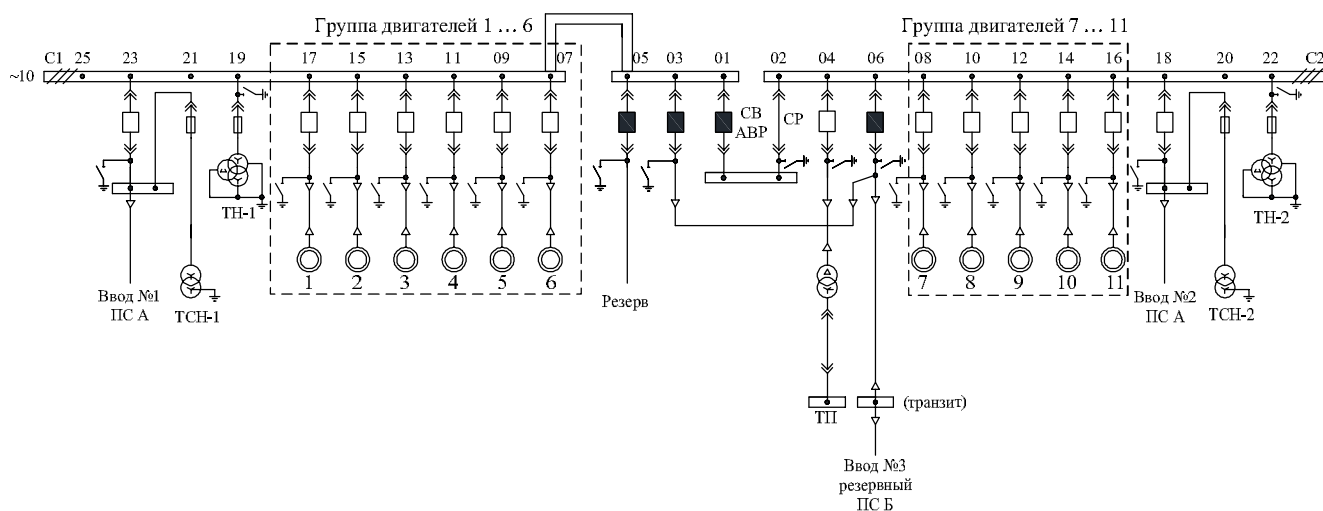


Рис. 2. Схема ПС ШНС: СВ, РЗ – секционный выключатель и разъединитель; ТН – трансформатор напряжения; ТСН – трансформатор собственных нужд; ТП – трансформаторная подстанция, 1–11 – двигательная нагрузка

Схемный вариант решения №1

Для решения проблемы предлагается подключение ввода №3, как на рис. 3. Это не требует внесения изменений в конструкцию секций и подключения новых вводов или выключателей, однако схема усложняется ещё одним устройством АВР, которое подключается на фидеры выключателей ШНС-03 и ШНС-06.

Помимо этого, данная система АВР должна быть соединена с изначальной системой на межсекционном выключателе, чтобы обеспечить правильность переключения в случае аварии. Иначе можно допустить включение секции на два источника.

АВР в данной схеме должно работать следую-

щим образом: АВР на СВ проверяет наличие напряжения на ближайшей секции, если оно отсутствует, устройство АВР включается и тем самым резервирует эту секцию. АВР на вводе №3 должно проверять наличие напряжения на 1-й или 2-й шине, если отсутствует, необходимо проверить состояние секционного выключателя, если он включен принудительно, его отключить и включить выключатели питания для ввода №3 на фидере 03 и 06.

Схемный вариант решения №2

На рис. 4 предложен вариант схемного решения, в котором осуществлено подключение ввода №3 через шину и выключатели на секции 1СШ и 2СШ.

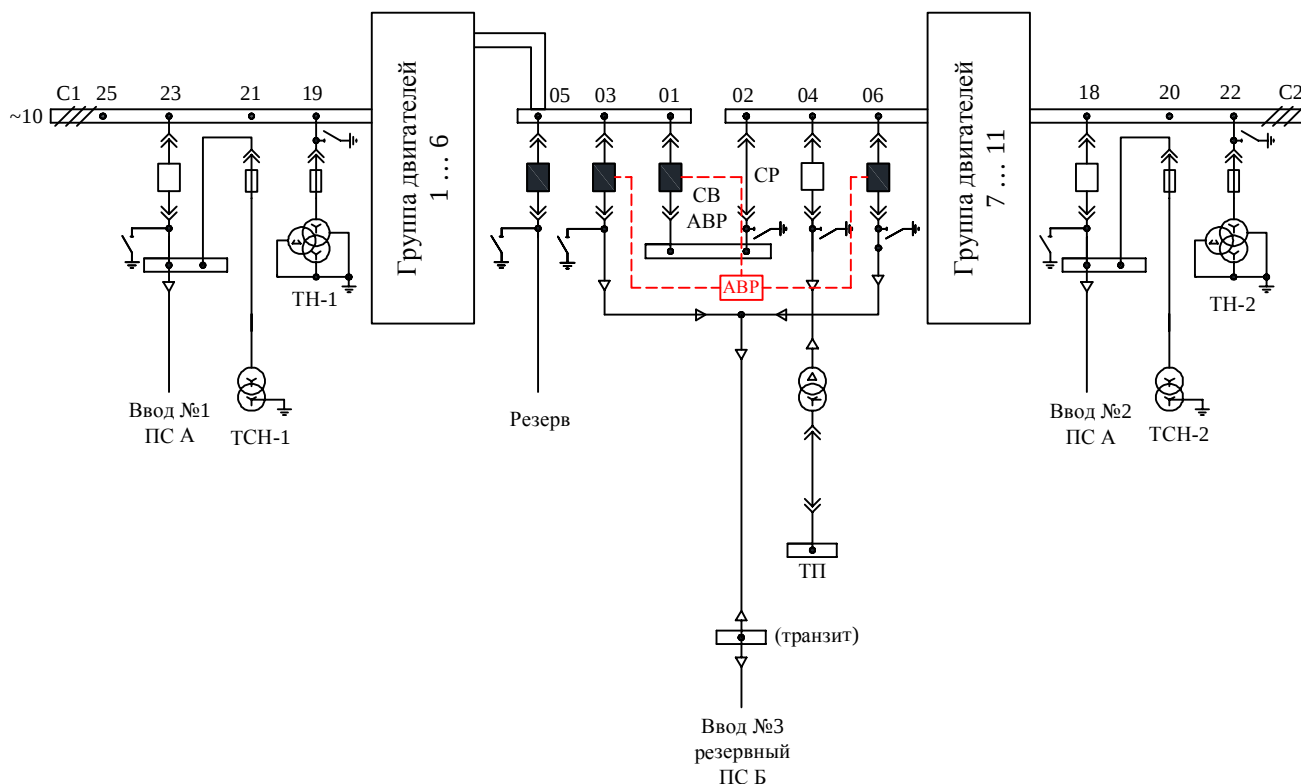


Рис. 3. Схемное решение №1 реконструкции подстанции ШНС

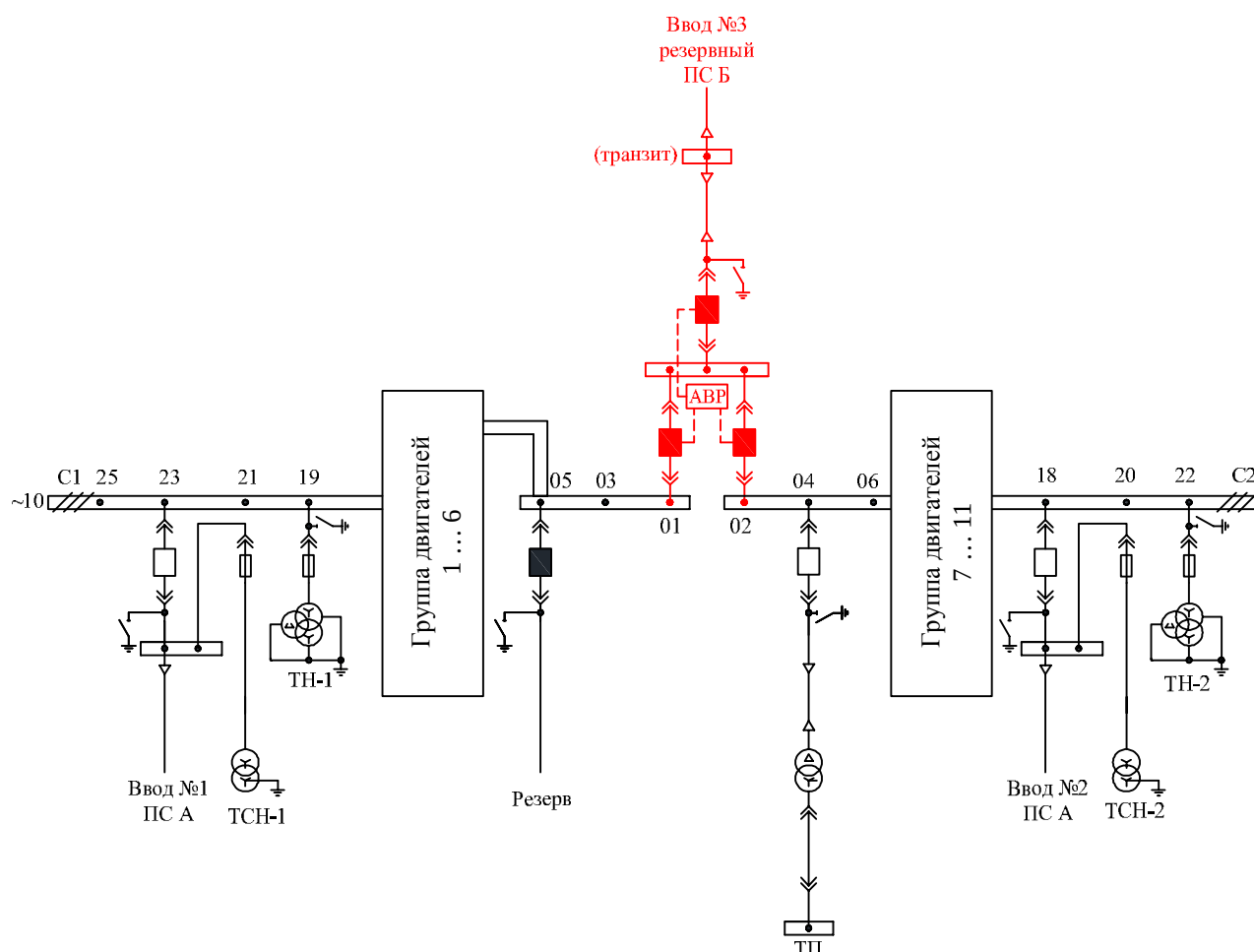


Рис. 4. Схемное решение №2 реконструкции подстанции ШНС

Реализация такой схемы возможна теоретически, при этом она обеспечивает должное резервирование и достаточно проста в исполнении, также имеет сравнительно небольшую стоимость. Для этой схемы существуют некоторые проблемы при её реализации на производстве, одной из самых явных можно назвать безопасность. В схеме нет секционного разъединителя, следовательно, обслуживающий персонал не может создать видимый разрыв при отключении питания, это может стать причиной поражения электрическим током. Также вследствие того, что секционирование происходит двумя выключателями, высока вероятность

увеличения времени переключения, что может привести к проблемам с работой двигателей на одной из секций при переключении. Это можно считать достаточным основанием, чтобы не использовать данную схему на производстве.

Схемный вариант решения №3

Рассмотрим ещё один вариант схемы – с включением 3-х секций шин (рис. 5), где также можно расширить технологические возможности ШНС и добавить к ней дополнительные насосы или другие электроприемники.

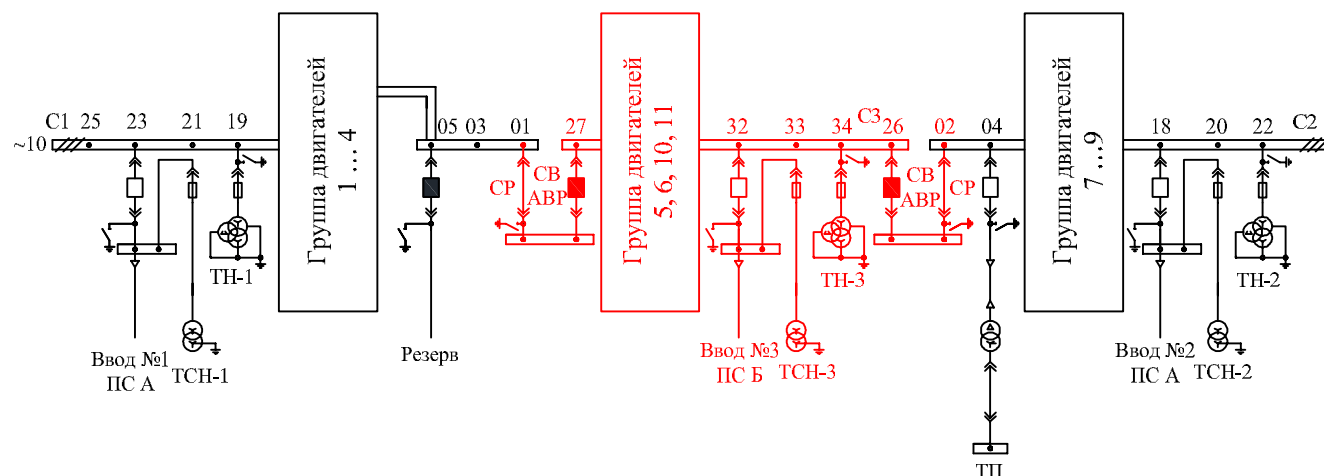


Рис. 5. Схемное решение №3 подстанции ШНС

В данной схеме необходимо реконструировать ЗРУ, добавить новую секцию и дополнительные ячейки КРУ. Данная схема перспективна при условии расширения состава приемников ШНС, помимо этого обладает высокой степенью надежности и имеет несложные связи для устройств АВР. При этом используется одно устройство АВР двустороннего действия, а другое одностороннего, чтобы добиться правильного согласования секционных выключателей и не включить одновременно СВ на две секции, находящиеся под напряжением.

Для данной схемы требуется более подробный расчет, так как 3-я секция должна выдерживать нагрузку двух других. Вследствие того, что ПС Б независимый источник и при погасании ПС А, ШНС может быть полностью обесточена, в таком случае ПС Б должна принять всю нагрузку с двух других секций. Выполним выбор и расчет 3-й секции шин при известных токах короткого замыкания (КЗ) на ШНС, вводных трансформаторах, а также известных ячейках КРУ, установленных на ПС ШНС, и их параметрах. Шина должна выдерживать всю нагрузку на 3-ю секцию при отключении двух других, тем самым обеспечивая должное резервирование и независимость 3-го источника питания.

Учитывая, что на данный момент не разработан проект по расширению ШНС, секции рассчитаны без учета дополнительной двигательной нагрузки. На схеме была произведена разгрузка двух старых секций, без учета возможного расширения насосной, в обратном случае, возможно, понадобится шина с большей пропускной способностью, а также большее количество выключателей, что приведет к увеличению стоимости.

Для принятия решения и обоснования был выполнен выбор токоведущих частей. При этом следует принимать рабочие токи присоединений нормального режима и максимальные длительные токи. Расчетные токи присоединений принимаются равными наибольшим значениям токов. В этом случае рассчитаем наибольший ток ремонтного и послеаварийного режима по формуле

$$I_{нб} = 1,4 \frac{S_{ном.тр}}{\sqrt{3}U_{ном}}, \quad (1)$$

где $S_{ном.тр}$ – номинальная мощность трансформатора ПС Б (80 МВА); $U_{ном}$ – номинальное напряжение на шинах (10 кВ).

При условии, что допустимый ток для шины должен быть больше расчетного наибольшего тока, рассчитанного по формуле (1), $I_{нб} = 3079,21$ А.

Исходя из этого, для реализации схемного решения на подстанции ШНС следует установить двухполюсные алюминиевые шины 120×10 ($h=120$ мм, $b=10$ мм), так как $3200 \text{ А} > 3079,21 \text{ А}$.

Далее произведем проверку шин на термическую стойкость:

$$S > S_{тер.мин}, \quad (2)$$

где S – сечение выбранной шины, мм^2 ; $S_{тер.мин}$ – минимальное сечение шины по термической стойкости, мм^2 .

$$S_{тер.мин} = \frac{I_{нб} \sqrt{t_{откл}}}{C_{тер}}, \quad (3)$$

где $I_{нб}$ – начальное состояние периодической составляющей тока КЗ; $t_{откл}$ – время отключения КЗ; $C_{тер}$ – термический коэффициент, $\text{А} \cdot \text{с}^{1/2} / \text{мм}^2$.

Для выбранной шины получаем $S = 1200 \text{ мм}^2$, $S_{тер.мин} = 68,12 \text{ мм}^2$, следовательно, $S > S_{тер.мин}$, шины подходят.

Для КРУ расстояние между осями проводников $a = 0,250$ м, длина пролёта, равная ширине шкафа, $l = 0,75$ м.

Коэффициент формы шин прямоугольного сечения $k_{\phi} = 0,92$. Для шин, расположенных вертикально, коэффициент расположения $k_{расп} = 1$. Ударный ток $i_{уд} = 74,79$ кА.

Наибольшее значение электродинамической силы:

$$F_{max} = \sqrt{3} \frac{i_{уд}^2}{a} l k_{\phi} k_{расп} 10^{-7}; \quad (4)$$

$$F_{max} = 2673,973 \text{ Н.}$$

Для двухполюсных шин прямоугольного сечения момент инерции

$$J = \frac{bh^3}{6}; \quad (5)$$

$$J = 2 \text{ см}^4.$$

Определим частоты собственных колебаний для алюминиевых шин по формуле

$$f_0 = \frac{173,2}{l^2} \sqrt{\frac{J}{S}}; \quad (6)$$

$$f_0 = 1257,042 \text{ Гц.}$$

где J – момент инерции поперечного сечения шины относительно оси, перпендикулярной направлению изгибающей силы, см^4 ; S – поперечное сечение шины, см^2 .

Так как $f_0 > 200$ Гц, то механический резонанс исключен.

Момент сопротивления шины относительно оси, перпендикулярной действию усилия:

$$W = \frac{bh^2}{3}; \quad (7)$$

$$W = 48 \text{ см}^3.$$

При использовании двух полюсов шин возникают усилия между полюсами и фазами, для его уменьшения используют прокладки, пролет между прокладками $l_{п}$ выбирается таким образом, чтобы силы не вызывали соприкосновение полюсов.

$$l_{п} \leq 0,00133 \sqrt[4]{\frac{EJ}{m}}; \quad (8)$$

$$l_{п} \leq 0,606 \text{ см.}$$

где E – модуль упругости материала шин ($7 \cdot 10^{10}$ Па, для выбранного материала), Па; m – масса полосы на единицу длины (3,24 кг/м, для выбранного материала), кг/м.

Сила взаимодействия между полосами:

$$f_n = \frac{k_{\phi} i_{уд}^2}{4b} 10^{-7}; \quad (9)$$

$$f_n = 12,86 \text{ Н.}$$

Изгибающий момент определяется по выражению

$$M = \frac{F_{\max} 0,75}{10}; \quad (10)$$

$$M = 200,55 \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

Напряжение в материале от взаимодействия полюсов для двухполосных шин:

$$\sigma_n = \frac{f_n l_n^2}{12,44 b^2 h}; \quad (11)$$

$$\sigma_n = 0,0228 \text{ МПа.}$$

Напряжение в материале от взаимодействия полюсов для двухполосных шин:

$$\sigma_{\phi} = \sqrt{3} \frac{i_{уд}^2 l^2}{aW} 10^{-8}; \quad (12)$$

$$\sigma_{\phi} = 62,755 \text{ МПа.}$$

Максимальное напряжение

$$\sigma_{\max} = \sigma_{\phi} + \sigma_n = 62,783 \text{ МПа.} \quad (13)$$

Минимальное допустимое напряжение алюминиевых (АО) шин составляет $\sigma_{\text{доп}} = 82 \text{ МПа}$.

Так как $\sigma_{\text{доп}} > \sigma_{\max}$, то шина выбранного профиля проходит по условиям нормального и утяжеленного режимов и рекомендуется на ПС ШНС.

Для варианта схемы №3 на третью секцию принимается к установке двухполюсная алюминиевая шина марки АО 120×10. Подводя итоги, такая схема считается одной из самых надежных, безопасных и простых в эксплуатации, ведь она не имеет сложных связей АВР, а также поддается достаточно простой логике при переключениях, что снижает вероятность ошибочных действий персонала подстанции.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Сопоставление вариантов схем представим в табл. 1, в которой отразим основные параметры, влияющие на выбор. В таблице знак «+» означает, что данный параметр обеспечивается или хорош и удобен для эксплуатации.

Стоимость реализации схем рассчитывалась на основании цен, полученных в общем доступе в сети интернет. Цены указаны в процентах от наибольшей суммы для общего понимания отличия стоимостей для реализации разных схем. Для схем она составила:

– 1-я схема: включает в себя затраты на покупку, установку и настройку системы АВР, в данном случае она будет состоять из сложных связей, что увеличивает

её цену. Цена составляет примерно 30% от наибольшей;

– 2-я схема: требует закупки дополнительных ячеек КРУ с выключателями, а также шины для ввода с ПС Б, помимо этого требуется наладка АВР и покупка дополнительных аппаратов для АВР. Цена составляет примерно 50% от наибольшей;

– 3-я схема: в этом случае требуются шины, дополнительная схема АВР с учётом всех аппаратов, требуемых для её функционирования, а также дополнительный секционный выключатель и ячейка КРУ для него.

Цена составляет примерно 100% от наибольшей.

В рамках данной работы было решено реализовать исходный вариант действующей схемы и вариант схемы №3 в программном комплексе «Катран» [11], основанном на сочетании методов модифицированного эквивалентирования и последовательных интервалов [12], который позволил выполнить расчеты установившихся режимов и симметричного короткого замыкания на шинах 10 кВ. Результаты расчетов в установившемся режиме для схемы №3 следующие: напряжение на 1 с – 10,36 кВ, 2 с – 10,66 кВ, 3 с – 10,52 кВ, для действующего 1 с – 10,65 кВ, 2 с – 10,67 кВ. При этом значения токов периодической составляющей в начальный момент времени при симметричном коротком замыкании (СКЗ) на секции представлены в табл. 2.

Необходимо отметить, что полученные расчеты совпадают с действующими значениями напряжений и нагрузок на эксплуатируемом объекте для установившегося режима. Как показывают расчеты, при возникновении СКЗ величины отличаются и просадкой напряжения, и величиной тока. Также необходимо сделать вывод, что вариант схемы №3 способствует сохранению устойчивости системы и более надежной работе всего электрооборудования узла [13].

Таблица 1

Сравнение вариантов схем

Параметр	Схема №1	Схема №2	Схема №3
Надежность	+	+	+
Безопасность	+	-	+
Время переключений	+	-	+
Время простоя от аварии	+	+	+
Перспектива на расширение насосной	-	-	+
Сложность схем РЗиА	-	-	+
Число источников питания ПС	3 (2 активных, 1 резерв)	3 (2 активных, 1 резерв)	3 (3 активных)
Стоимость реализации, %	30%	50%	100%
Итого	Приносит наименьшие переделки и меньшую стоимость	Опасна для реализации	Самая надежная, но самая дорогая, также имеет возможность расширения

Таблица 2
Результаты расчетов токов при СКЗ
в начальный момент времени и остаточных
напряжениях на секциях ШНС

Точка короткого замыкания	Схема №3		
	Ток СКЗ в начальный момент времени, кА	Остаточное напряжение на шинах, кВ на 1 секции	Остаточное напряжение на шинах, кВ на 2 секции
КЗ на 1 с. 10 кВ	9,71	9,93	9,92
КЗ на 2 с. 10 кВ	10,88	0	9,96
КЗ на 3 с. 10 кВ	14,3	9,98	0
Точка короткого замыкания	Действующая схема		
	Ток СКЗ в начальный момент времени, кА	Остаточное напряжение на шинах, кВ на 1 секции	Остаточное напряжение на шинах, кВ на 2 секции
КЗ на 1 с. 10 кВ	11,36	0	9,96
КЗ на 2 с. 10 кВ	14,42	9,98	0

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные выше схемные решения должны избежать возможных остановок насосной в случае аварии, а также предотвратить остановку производственного цикла кислородно-конвертерного цеха вследствие отключения ШНС и безусловно выхода из строя оборудования самой насосной из-за полного затопления.

Проведя анализ ситуации, происходящей на ШНС, были предложены варианты для улучшения надежности насосной станции. Среди предложенных вариантов есть один неблагоприятный вариант схемы №2 для реализации, так как он может принести угрозу жизни людей. Другие же два варианта могут быть реализованы на реальном объекте, также они имеют нужную для данного объекта категорию надежности, помимо этого создают условия, в которых полное отключение ШНС от питания практически невозможно.

Использование комплексного подхода к оценке вариантов предложенных схемных решений в условиях действующего объекта с учетом его особенностей и моделирования в программном комплексе позволяет выполнить оценку по параметрам надежности, устойчивости, экономичности и возможности реализации схемы на действующем объекте, а также резервируемости, безопасности и перспектив развития.

На основании проведенных расчетов и исследований вариант в виде схемного решения №3 был рекомендован для внедрения на подстанцию ШНС.

Список источников

- Медведев Н.М., Бунин А.А., Лыгин М.М. Энергосберегающие технологии на примере шламовой насосной станции // Энергетические и электротехнические систе-

мы: международный сборник научных трудов. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2019. С. 27-32.

- Мызников И.Л. К вопросу о разработке госта на центробежные шламовые насосы // Гидротехника. 2021. №1(62). С. 67-68.
- Селезнев А. В. Модернизация шламового насоса поверхностной циркуляционной системы очистки бурового насоса // Проблемы разработки месторождений углеводородных и рудных полезных ископаемых. 2014. №1. С. 148-151.
- Воробьев Ю.Л., Акимов В.А., Соколов Ю.И. Системные аварии и катастрофы в техносфере России. Москва: Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России, 2012. 308 с.
- Загороднов В.В., Беккер В.Ф. Снижение риска затопления насосных станций в соляных рудниках средствами автоматизации // Вестник КИГИТ. 2014. №2(44). С. 31-36.
- Развитие защиты электросетей – интеллектуальные приборы нового поколения / Материал подготовлен пресс-службой АО «ОЭК» // Электроэнергия. Передача и распределение. 2020. № 2(59). С. 34-35.
- Семькин А.В., Султанов Н.З. Система прогнозирования затоплений. Классификация затоплений промышленных объектов // Оренбургские горизонты: прошлое, настоящее, будущее: сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 275-летию Оренбургской губернии и 85-летию Оренбургской области, Оренбург, 21–22 ноября 2019 года. Оренбург: ООО «Фронтир», 2019. С. 174-177.
- Оценка остаточного ресурса электрооборудования по физическим характеристикам / А.И. Некрасов, А.А. Некрасов, П.Н. Подобедов, И.М. Довлатов // Вестник аграрной науки Дона. 2018. № 1 (41). С. 5-11.
- Щербатов И.А., Гурьянова В.В., Цуриков Г.Н. Определение технического состояния оборудования электроэнергетики // Информационные технологии. Проблемы и решения: материалы междунар. науч.-практ. конф. 2018. №1(5). С. 341-345.
- Исследование эффективности работы делительной автоматики в системе электроснабжения промышленного предприятия черной металлургии / Газизова О.В., Малафеев А.В., Тарасов В.М., Извольский М.А. // Промышленная энергетика. 2012. №10. С. 12-17.
- Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013616847 Российская Федерация. Комплекс автоматизированного режимного анализа КАТРАН 7.0 : № 2013610067 ; заявл. 09.01.2013 / Игуменцев В.А, Малафеев А.В., Газизова О.В., Кондрашова Ю.Н., Панова Е.А., Кочкина А.В., Зиновьев В.В.; заявитель ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат».
- Модифицированный метод последовательного эквивалентирования для расчета режимов сложных систем электроснабжения / В.А. Игуменцев, Б.И. Заславец, А.В. Малафеев, О.В. Буланова, Ю.Н. Роганова // Промышленная энергетика. 2008. № 6. С. 16-22.
- Анализ допустимости режима потери возбуждения синхронного генератора в условиях промышленной системы электроснабжения сложной конфигурации / О.В. Газизова, А.П. Соколов, Н.Т. Пагшин, Ю.Н. Кондрашова // Электротехнические системы и комплексы. 2019. №2(43). С. 12-18. doi: 10.18503/2311-8318-2019-2(43)-12-18

Поступила в редакцию 14 декабря 2022 г.

Принята к печати 28 января 2023 г.

INFORMATION IN ENGLISH

OPTION EVALUATION FOR POWER SUPPLY SCHEME RECONSTRUCTION FOR SLURRY PUMPING STATION IN ORDER TO INCREASE THE REDUNDANCY OF CRITICAL CONSUMERS AT OXYGEN CONVERTER SHOP

Yuliya N. Kondrashova

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Industrial Power Supply Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, rotjuil720@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5280-5666>

Aleksey V. Shalimov

Undergraduate student, Industrial Power Supply Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, Shalimov-alexey@mail.ru

Andrey M. Tretyakov

Undergraduate student, Industrial Power Supply Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, andreym2001@yandex.ru

Artem Snigur

Undergraduate student, Industrial Power Supply Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, artem_snigur@mail.ru

The theme of the article is justified by the situations arising in the process of slurry pumping station operation accompanied by the increasing frequency of electrical equipment flooding, which is the reason for the reconstruction. It should be noted that it is necessary to find the solution for the increase in the redundancy level are the accidents when the slurry pump station is completely without power supply or the long-time switching to the reserve input due to the delay made by the personnel. Such causes result in significant losses due to flooded electrical equipment due to power failure and the pump house being underground as well as stopping the technological process of continuous production of a large shop for several days. The purpose of this investigation is to find the optimum design solution for a slurry pumping station under specific industrial conditions considering its location and operating conditions in the process of operation. To solve the problem of the pumping station flooding, the choice of electric power supply schemes, in which reliability and redundancy will be increased, is offered. The scheme choice is based on a complex approach considering the reliability parameters, reduction of downtime and losses, estimate of steady-state parameters, emergency and post-emergency modes, as well as no-risk, prospect for expansion of the pump house and approximate economic evaluation of the suggested solutions. Some circuit solutions are implemented in Katran software package based on a combination of modified equivalence and sequential intervals methods to determine the values of steady-state parameters of the system as well as to calculate the emergency closing at 10 kV sections to estimate post-emergency parameters and to further implement them. The design of power supply schemes for reconstruction of a slurry pumping station with the purpose of increasing the reliability of uninterrupted power supply to responsible consumers to increase the degree of object reservation was carried out in this work. The authors suggest scheme variants and estimate the possibility to realize them in the conditions of the present object. Besides, a tentative evaluation of reliability and safety of the presented power supply schemes with reference to conditions of the oxygen-converter plant is given. Their comparison is made, and it is described, which of the schemes may be used in practice. Their economic component and convenience are also evaluated. In addition, steady-state, emergency, and post-emergency mode have been calculated in order to study the reliability of the optimal scheme.

Keywords: power supply scheme, reliability, slurry pump house, reliability categories, power supply quality, voltage level

calculation, redundancy, pump house flooding, losses, additional backup input

REFERENCES

1. Medvedev N.M., Bunin A.A., Lygin M.M. Energy-saving technologies on the example of a slurry pumping station. *Energeticheskie i elektrotekhnicheskie sistemy: Mezhdunarodnyy sbornik nauchnykh trudov* [International collection of scientific papers "Power and electrical systems"]. Magnitogorsk, NMSTU Publ., 2019, pp. 27-32. (In Russian)
2. Myznikov I.L. Developing a state standard for centrifugal slurry pumps. *Gidrotekhnika* [Hydrotechnika], 2021, no. 1(62), pp. 67-68. (In Russian)
3. Seleznev A.V. Modernization of the slurry pump of the surface circulation system of drilling pump cleaning. *Problemy razrabotki mestorozhdeniy uglevodorodnykh i rudnykh poleznykh iskopaemykh*. [Problems of Hydrocarbon and Ore Mineral Fields Development.], 2014, no. 1, pp. 148-151. (In Russian)
4. Vorob'ev Yu.L., Akimov V.A., Sokolov Yu.I. *Sistemnye avarii i katastrofy v tekhnosfere Rossii* [Systemic accidents and disasters in the technosphere of Russia]. Moscow, All-Russian Research Institute for Civil Defense and Emergencies of Russia Publ., 2012. 308 p. (In Russian)
5. Zagorodnov V.V., Bekker V.F. Reduction of pump station flooding risk in salt mines using automation equipment. *Vestnik KIGIT* [Bulletin of KIGIT], 2014, no. 2(44), pp. 31-36. (In Russian)
6. Development of power grid protection – intelligent devices of new generation. The material was prepared by the press service of JSC "OEK". *Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie*. [Electricity. Transmission and Distribution], 2020, no. 2(59), pp. 34-35. (In Russian)
7. Semykin A.V., Sultanov N.Z. The system of flood forecasting. Classification of flooding of industrial objects. *Orenburgskie gorizonty: proshloe, nastoyashchee, budushchee: Sbornik materialov Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy 275-letiyu Orenburgskoy gubernii 85-letiyu Orenburgskoy oblasti*. [Proceedings of the All-Russian scientific and practical conference dedicated to the 275th anniversary of the Orenburg province and the 85th anniversary of the Orenburg region "Orenburg horizons: past, present, future"]. Orenburg, LLC "Frontir", 2019, pp. 174-177. (In Russian)
8. Nekrasov A.I., Nekrasov A.A., Podobedov P.N., Dovlatov I.M. Evaluation of the residual resource of electrical

- equipment by physical characteristics. *Vestnik agrarnoy nauki Dona*. [Bulletin of Agrarian Science of the Don], 2018, no. 1(41), pp. 5-11. (In Russian)
9. Shcherbatov I.A., Guryanova V.V., Tsurikov G.N. Determination of electric power equipment technical condition. *Informatsionnye tekhnologii. Problemy i resheniya: materialy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Materials of the International scientific-practical conference "Information Technology. Problems and solutions"]. 2018, no. 1 (5), pp. 341-345. (In Russian)
 10. Gazizova O.V., Malafeev A.V., Tarasov V.M., Izvol'skiy M.A. Study of dividing automatics effectiveness in the power supply system of a ferrous metallurgy industrial enterprise. *Promyshlennaya energetika*. [Industrial Power Engineering], 2012, no. 10, pp. 12-17. (In Russian)
 11. Igumenshchev V.A., Malafeev A.V., Gazizova O.V., Kondrashova Yu.N., Panova E.A., Kochkina A.V., Zinovyev V.V. *Kompleks avtomatizirovannogo rezhimnogo analiza KATRAN 7.0* [Complex of automated regime analysis of KATRAN 7.0]. Computer program RF, no. 2013616847, 2013.
 12. Igumenshchev V.A., Zaslavets B.I., Malafeev A.V., Bulanova O.V., Rotanova Yu.N. The modified method of sequential equivalence for calculating the modes of complex power supply systems. *Promyshlennaya energetika* [Industrial power engineering], 2008, no. 6, pp. 16-22. (In Russian)
 13. Gazizova O.V., Sokolov A.P., Patshin N.T., Kondrashova Yu. N. Excitation loss mode in synchronous generator in terms of complicated configuration industrial power supply system. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2019, no. 2(43), pp. 12-18. doi: 10.18503/2311-8318-2019-2(43)-12-18 (In Russian)

Оценка вариантов реконструкции схемы электроснабжения для шламовой насосной с целью повышения резервирования ответственных потребителей кислородно-конвертерного цеха / Ю.Н. Кондрашова, А.В. Шалимов, А.М. Третьяков, А. Снигур // *Электротехнические системы и комплексы*. 2023. № 1(58). С. 39-48. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-1\(58\)-39-48](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-1(58)-39-48)

Kondrashova Yu.N., Shalimov A.V., Tretyakov A.M., Snigur A. Option Evaluation for Power Supply Scheme Reconstruction for Slurry Pumping Station in Order to Increase the Redundancy of Critical Consumers at Oxygen Converter Shop. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2023, no. 1(58), pp. 39-48. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-1\(58\)-39-48](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-1(58)-39-48)

МОДЕЛИРОВАНИЕ БЕЗДАТЧИКОВОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПЕЧНОГО РОЛЬГАНГА С ПРИМЕНЕНИЕМ НЕЙРОСЕТЕВЫХ ОБЪЕКТОВ

В работе рассматривается вопрос моделирования системы управления общепромышленного транспортного оборудования – транспортных рольгангов. Приводится описание технологического оборудования, приведены структурные и кинематические схемы рассматриваемого промышленного механизма. Рассмотрены ключевые особенности механизмов такого типа, отдельно упомянуты требования к системе управления электроприводами данного оборудования. Подъемно-транспортные механизмы, к которым относится рассматриваемый промышленный узел, обладают широкой распространенностью в структуре металлургических предприятий. Печные рольганги, являющиеся частным случаем транспортных рольгангов, характеризуются безостановочной работой в линии технологических агрегатов, где предъявляются особые требования к точности и перегрузочной способности работы привода. Для электроприводов такого типа характерно применение асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором и систем бездатчикового управления. Система управления должна поддерживать постоянство скорости групп рольгангов, обеспечивать необходимый темп ускорения и замедления по условиям механического коэффициента трения металла по роликам. Также для таких систем характерно функционирование в диапазоне от 10 до 60-70 Гц. В настоящее время в связи с существенным распространением и качественным улучшением показателей микропроцессорной техники отчетливо прослеживаются тенденции в развитии концепций применения нейросетей в электротехнике. Одним из методов, позволяющим нивелировать недостатки вышеупомянутых особенностей работы объекта, можно рассматривать методы, связанные с интеграцией нейросетевых математических функций в структуру системы управления. Нейросетевые технологии существенно расширяют возможности автоматизированного электропривода, увеличивают общую робастность систем управления. В работе приведены различные механизмы адаптации нейросетевых структур, описаны их преимущества и недостатки. Также в статье упоминаются вопросы динамической стабильности вышеупомянутых систем электропривода, проводится исследовательское моделирование структур с различными подходами к архитектуре системы управления.

Ключевые слова: моделирование, регулируемый электропривод, система управления, печной рольганг, векторное управление, асинхронный двигатель, наблюдатели, бездатчиковое векторное управление, обучение, нейронные сети, механизм адаптации

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день при разработке и проектировании сложных технических механизмов учитываются следующие основные требования: экологичность, энергоэффективность, экономичность.

Одним из наиболее распространенных способов увеличения энергоэффективности является внедрение систем автоматизированного электропривода. Такие системы имеют большой ареал применения в общепромышленных механизмах, среди которых весомую часть составляют входящие в группу транспортных и подъемно-транспортных механизмов механизмы перемещения – рольганги.

Рольганги как класс механизмов осуществляют перемещение металла вращающимися роликами. По назначению они обычно классифицируются как пакетировочные, передвижные, транспортные, рабочие и т.д. Транспортные рольганги предназначены для передачи металлической полосы (проката) между различными технологическими механизмами. В зависимости от направления движения роликов рольгангов по отношению к промышленным узлам выделяют отводящие и подводящие транспортные рольганги. Одним из подразделов транспортных рольгангов являются рольганги печные, осуществляющие перемещение металла в промежуточных нагревательных печах [1, 2].

ПРИМЕНЯЕМЫЕ МЕТОДЫ

Ключевыми исследовательскими методами, применяемыми в данной работе, являются математический расчет параметров электрических машин, аналитический разбор особенностей технологического процесса, синтез структуры отдельных элементов, а также математическое моделирование в программной среде Matlab Simulink.

При подборе диаметра ролика отдельного рольганга, с целью снижения совокупной массы механизма, его выбирают с учетом требований механической прочности, при этом стремясь к наименьшему значению [3-5].

В зависимости от назначения конкретного рольганга и агрегата, в котором применяется данный узел, характеризуется режим работы механизма. Для печных рольгангов режим работы продолжительный (S1). Структурная схема типового участка линии технологического агрегата с группами печных рольгангов приведена на **рис. 1**. Рольганги как промышленные механизмы могут иметь как групповой, так и индивидуальный привод, однако для печных рольгангов применяется только индивидуальный привод. Причиной такого технического решения является прежде всего сам технологический процесс – данный тип рольгангов имеет функционал для перемещения проката большой протяженности, при этом металл распределяется между большим количеством роликов (30-70 шт.). Кинематическая схема участка рольгангов с индивидуальным приводом приведена на **рис. 2**, где двигатель 1 через редуктор 2 и муфту 3 соединен с роликом 4.

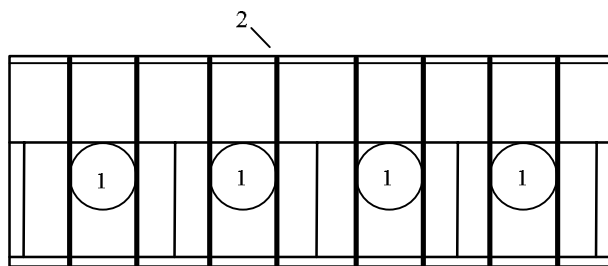


Рис. 1. Структурная схема участка печных рольгангов: 1 – печные рольганги; 2 – печная часть агрегата (проходная печь)

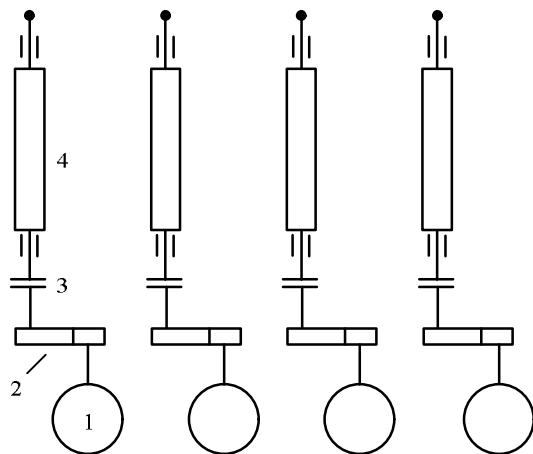


Рис. 2. Кинематическая схема участка печных рольгангов с индивидуальным электроприводом

Индивидуальный привод, несмотря на увеличение стоимости привода по сравнению с групповым приводом, обладает рядом преимуществ, компенсирующих издержки, в том числе возможность продолжения работы при выходе из строя одного или нескольких роликов (в групповом необходимо останавливать узел целиком), простота ремонтных работ (типовая замена электродвигателя или редуктора не представляет сложности при отсутствии протяженных трансмиссионных валов и конических передач группового привода), эксплуатационная надежность, удобство разработки и проектирования (индивидуальный привод – это типовое, широко распространенное решение), возможность замены отдельных компонентов на ходу.

Для приводов рольгангов применяются асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором, с большой перегрузочной способностью. Выбор таких двигателей также обусловлен тем, что исполнительные механизмы вынуждены функционировать в тяжелых производственных условиях, где присутствует существенная запыленность воздуха, чрезмерно высокая или низкая температура, экстремальная влажность, присутствуют серьезные вибрации и даже тряски. Однако такой привод обладает регулировочными характеристиками лишь в диапазоне от 10 до 60-70 Гц.

В рабочем цикле электропривода печного рольганга имеет место такое явление, как проскальзывание металла по роликам. Оно возникает, когда при перемещении полосы сила трения между полосой и роликом меньше, чем сила инерции металла.

Максимальное ускорение, при котором не происходит буксование (критическое ускорение):

– для холодного металла

$$a_{кр} = 0,98...1,47 \text{ м/с}^2; \quad (1)$$

– для горячего металла

$$a_{кр} = 1,47...2,94 \text{ м/с}^2 \quad (2)$$

При перемещении транспортируемого металла его ускорение либо замедление не должны превышать $a_{кр}$. Если же это происходит, такой режим работы ведет лишь к чрезмерному нагреванию электродвигателя и способствует ускоренному износу роликов рольганга, при этом не оказывая ровным счетом никакого положительного эффекта в области прироста производительности электропривода.

К системе управления предъявляются требования по диапазону регулирования (4:1), поддержанию корректного темпа интенсивности ускорения/замедления.

С целью снижения стоимости электропривода (с учетом большого количества электродвигателей) от применения датчиков скорости отказываются.

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ РОЛЬГАНГА

Для подавляющего большинства существующих на сегодняшний день систем регулируемого электропривода применяются различные датчики скорости, имеющие связь с валом двигателя и представляющие собой устройство, преобразующее показания скорости вращения вала в дискретный либо аналоговый сигнал, регистрируемый в системе управления [6-9].

Однако отказ от датчика скорости для электропривода печных рольгангов является устоявшимся техническим решением и несет в себе целый ряд преимуществ. Прежде всего, обеспечение каждого электродвигателя энкодером ведет к существенному удорожанию электропривода. Дополнительными трудностями является необходимость прокладывания трассы кабельных массивов для сбора данных с датчиков. Все это ведет к падению совокупной надежности системы управления, поскольку степень износа датчика скорости, его сигнального кабеля, функционирующих непосредственно рядом с высокотемпературной печной зоной, в тяжелых производственных условиях, существенно возрастает.

Тем не менее для нормальной работы системы управления необходимо иметь данные о текущей скорости электропривода. Инструментом для решения данной проблемы служит семейство методов бездатчикового определения скорости.

Необходимо отметить, что при создании таких бездатчиковых систем требуется применение специализированных математических объектов, которые называют наблюдателями состояния (наблюдателями). Показатели функционирования наблюдателей зависят от качества задания параметров модели двигателя, точности осуществляемого измерения напряжений и токов, принципа организации самого наблюдателя и многих иных параметров [10-13].

Подробный анализ групп наблюдателей, их преимущества и недостатки рассмотрены ранее [6, 14].

В системах бездатчикового управления традиционно применяются наблюдатели, основанные на классическом математическом аппарате. Основное отличие лежит в количестве внешних надстроек, адаптацион-

ных механизмов, корректирующих контуров. Различные варианты наблюдателей, основанные на классическом матаппарате, их сравнительное моделирование в Matlab Simulink, достоинства и недостатки были рассмотрены в [6].

По результатам, проведенным ранее, делается вывод о недостаточной степени коррекции особенностей электропривода рольгангов.

В данной работе рассматривается применение нейронных сетей как инструмента, способного компенсировать основные недостатки существующей системы бездатчикового управления рольгангов: неполный регулировочный частотный диапазон, точность переходных характеристик и динамическую стабильность всей системы управления.

Важнейшей особенностью, отличающей её от структур с использованием традиционного математического аппарата, является способность нейронной сети к обучению. Это позволяет применять нейронные структуры различной архитектуры и сложности для анализа данных больших объемов, задач, связанных с машинным зрением и определением корректности визуальной составляющей, предиктивного управления сложными динамическими объектами, регуляторов систем подтверждения алгоритмов выбора решений и фильтрации структурных массивов параметров.

В основу работы нейронных сетей положен принцип организации связей между её единичными узлами, структурированными в слои нейронами. Для каждой связи, существующей как между отдельными элементами, так и между слоями и элементами, имеются свои параметрические характеристики, называемые весами.

АНАЛИЗ ПОВЕДЕНИЯ НЕЙРОРЕГУЛЯТОРА НАБЛЮДАТЕЛЯ СКОРОСТИ В СОВМЕЩЕННОЙ СИСТЕМЕ

Для синтеза нейросетевого наблюдателя скорости в работе используется программный пакет Matlab Simulink с надстройкой Deep Learning Toolbox.

В системе наблюдателя используется нейрорегулятор NARMA-L2, поскольку использование этой структуры требует наименьших аппаратных ресурсов при достаточной точности исследований [15-17]. Внешний вид данного нейрообъекта приведен на **рис. 3**.

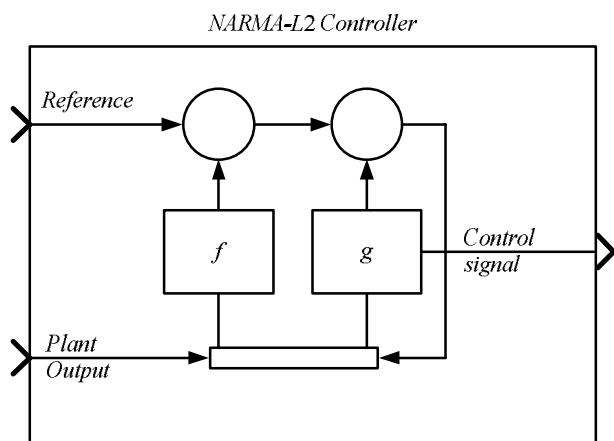


Рис. 3. Внешний вид регулятора библиотеки Deep Learning Toolbox

На **рис. 3** обозначено: *Reference* – сигнал задания на регулятор, *Plant Output* – выходной сигнал блока управляемого процесса (*Plant*), *Control signal* – выходное управляющее воздействие регулятора, *g* и *f* – части нелинейного уравнения аппроксимированной модели регулятора.

Описание различных архитектур нейронных сетей, применяемых для управления сложными динамическими объектами, их преимущества и недостатки были исследованы ранее в [9]. Подробный процесс создания структуры нейронной сети, синтез эталонной обучающей модели, техника процесса обучения и анализа параметров, позволяющих убедиться в корректном функционировании полученной нейронной сети, приведены в [6, 14].

Поскольку требования к системе управления электроприводом рольгангов не отличаются высокими показателями, встает вопрос о необходимости непрерывного (в течение всего рабочего периода) функционирования нейронной сети.

Определенный интерес вызывает вопрос комбинаторики рабочего функционала наблюдателей на основе классического математического аппарата и нейросетевых структур. Совмещение этих архетипов позволит, с одной стороны, разгрузить аппаратные мощности процессоров, не обладающих программно-ориентированными архитектурами, приспособленными под нейронные сети, с другой – компенсировать за счет тех же нейросетей проблемы наблюдателя на основе классического аппарата.

Логичным представляется эпизодически отдавать предпочтение работе наблюдателя на основе нейросети, преимущественно при пуске и переходных процессах, а в остальное время использовать данные наблюдателя на основе классического математического аппарата.

Структурная схема предполагаемой системы приведена на **рис. 4**. Эпизодическая работа нейросетевого объекта и классического наблюдателя достигается с помощью механизма адаптации (**рис. 5**). Механизм функционирует следующим образом: на начальном этапе блок *Relay* пропускает сигнал с нейросетевого наблюдателя. Затем при достижении скорости, соответствующей 10 Гц, блок *Relay* срабатывает, что приводит к переключению блока *Switch* на сигнал классического наблюдателя. Аналогично функционирует нижняя часть механизма системы, осуществляя переключение с классического наблюдателя на нейросетевую при выходе на верхний сегмент скоростной характеристики.

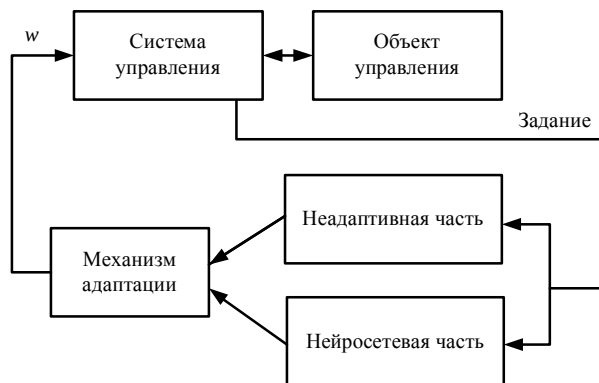


Рис. 4. Структурная схема системы с механизмом адаптации

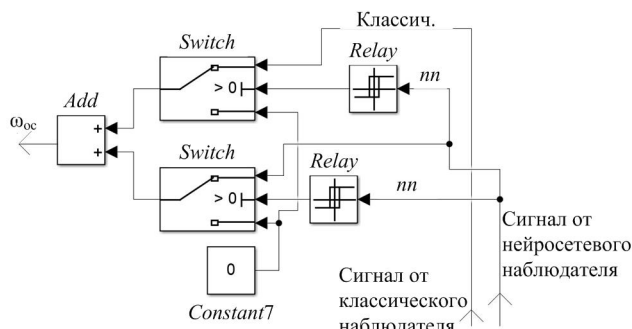


Рис. 5. Механизм адаптации в Matlab Simulink

Предварительно проведено моделирование режима пуска и наброса нагрузки для полученной системы. Полученные характеристики для системы с совмещенными алгоритмами, системы с полностью нейросетевым наблюдателем и системы с классическим наблюдателем приведены на рис. 6. Затем необходимо провести исследование рассматриваемой системы управления в рамках динамической стабильности при отклонении параметров. Для этого применяются имитационные модели режимов отклонения верхней границы температуры двигателя и режима межвитковых замыканий обмотки статора. Данные для режима с изменением температуры приведены на рис. 7.

Описанные выше имитационные режимы достигаются так же, как и в предыдущих исследованиях – путём изменения соответствующих параметров в математической модели электродвигателя [18-20]. Для имитационного режима нагрева это показатели активного сопротивления обмоток статора и ротора, для имитационного режима межвитковых замыканий – индуктивность статора и взаимная индуктивность. Характеристики имитационных режимов для полностью нейросетевого наблюдателя не приводятся, поскольку были подробно рассмотрены ранее [21-29].

Проведем анализ полученных данных. Механизм адаптации функционирует корректно, осуществляя переключение сигнала показаний с канала классического наблюдателя на канал нейросетевого, и обратно. Однако совокупная работа системы не может быть охарактеризована как удовлетворительная. На графиках характеристик присутствует существенная колебательность, что не позволяет системе управления функционировать надлежащим образом. Обобщая, даже эпизодическая работа неадаптивного наблюдателя при внесении неустойчивости в систему управления (посредством динамического изменения параметров двигателя) определяет работу совокупной системы наблюдателя скорости как неприемлемую для использования в качестве сигнала обратной связи.

Аналогично проведем испытания в имитационном режиме межвитковых замыканий (рис. 8). Из полученных данных также можно сделать вывод о неудовлетворительной работе системы. Обобщая, рассмотренный вариант системы управления с совмещением различных архетипов функций наблюдателя не представляется достойным вариантом для дальнейших исследований.

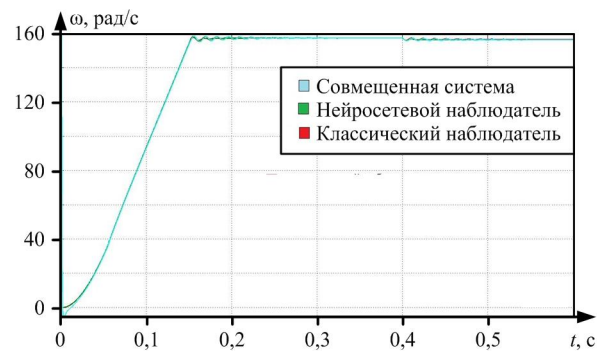


Рис. 6. Полученные характеристики для системы с эпизодической работой наблюдателей

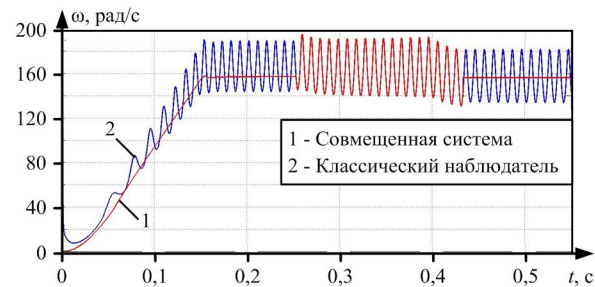


Рис. 7. Полученные сравнительные характеристики имитационного режима нагрева

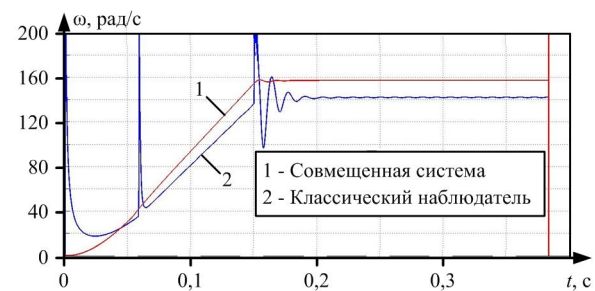


Рис. 8. Динамика скорости при имитационном режиме межвитковых замыканий

АНАЛИЗ ПОВЕДЕНИЯ НАБЛЮДАТЕЛЯ НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСА НЕЙРОСЕТЕВЫХ СТРУКТУР

Иным вариантом структуры системы управления может служить система с дополнительными контурами, отвечающими за коррекцию данных. Структурная схема предполагаемой системы приведена на рис. 9. Используемый ряд нейроструктур был заранее обучен с использованием различных данных, таким образом каждый регулятор имеет свою задачу. Рассмотрим полученную систему подробнее. Первый нейрорегулятор выполняет задачу вычисления текущей скорости асинхронного двигателя. Функционал данного объекта аналогичен рассмотренным ранее нейросетевым наблюдателям с добавлением механизма адаптации, отвечающего за переключение между различными регуляторами.

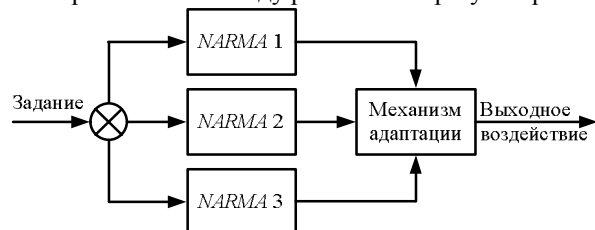


Рис. 9. Структура базовой системы с набором нейрорегуляторов

На базе данной структуры формируются необходимые электрические данные для остальных нейросетевых объектов. Второй нейрорегулятор обучен с помощью данных, учитывающих отклонения температуры обмоток статора электродвигателя. Этот объект функционирует при отклонениях параметров двигателя, связанных с нагревом обмоток, что осуществляется за счет механизма адаптации. Третий нейрорегулятор обучен с использованием данных об отклонениях индуктивных параметров двигателя. Специальный общий механизм адаптации обеспечивает включение регулятора, необходимого для текущего состояния асинхронного двигателя, в соответствии с данными обучения и изменениями параметров двигателя в процессе работы. Он осуществляет переключение между выходными сигналами нейроструктур в зависимости от необходимости корректировки.

Реализация данной структуры выполнена в оболочке Matlab Simulink. Механизм адаптации, осуществляющий выбор объектов функционирования системы, представлен на **рис. 10**. Здесь (выделено фоном) L_s – индуктивность статора, L_m – взаимная индуктивность, R_s – сопротивление статора, R_r – сопротивление ротора.

Для определения качества функционирования полученной модели проводится исследование поведения системы в имитационных режимах, аналогично проводимым ранее. Сведем полученные данные по динамике изменения скорости двигателя в смоделированном испытательном режиме нагрева на **рис. 11**, а данные, полученные в испытательном режиме межвитковых замыканий, на **рис. 12**.

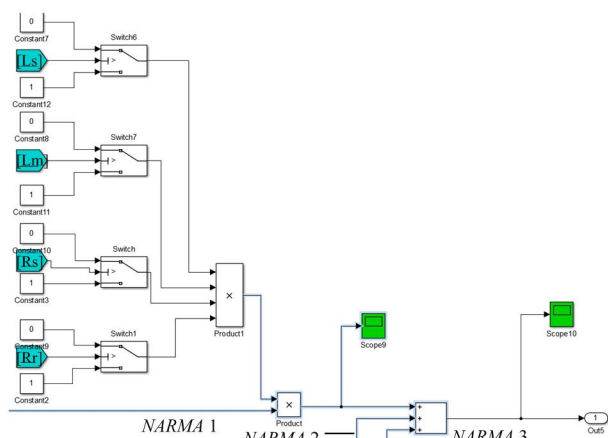


Рис. 10. Механизм адаптации

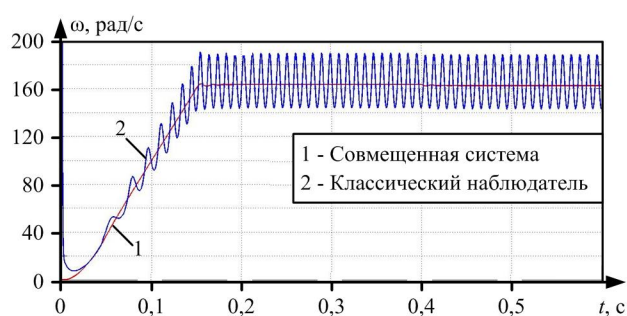


Рис. 11. Динамика изменения скорости в испытательном режиме нагрева

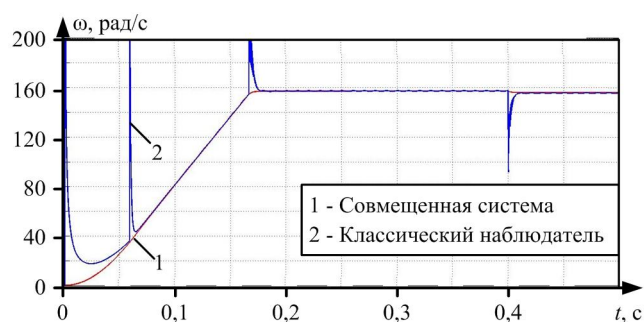


Рис. 12. Динамика изменения скорости в испытательном режиме межвитковых замыканий

Имитационные режимы, применяемые для исследования поведения наблюдателей, предполагают статическое изменение необходимых параметров, что является несколько упрощенным вариантом реального развития событий, тем не менее достаточным для исследовательских целей. Однако представляется интересным провести опыт наиболее опасного для электродвигателя режима межвитковых замыканий, наиболее приближенного к реальному развитию событий. Для этого в соответствующей модели осуществим внезапное и существенное изменение взаимной индуктивности и индуктивности статора. Сегмент структуры, осуществляющий изменение параметров индуктивности асинхронного двигателя, приведен на **рис. 13**. Полученные графики в ходе проведения исследовательского моделирования представлены на **рис. 14**.

Анализируя полученные графики в трёх имитационных режимах, можно сделать вывод о корректной работе системы управления с наблюдателем, обладающим совмещенной структурой. По итогу применение подхода, связанного с применением адаптационных механизмов и выбора сигналов, имеет дальнейшие перспективы к развитию.

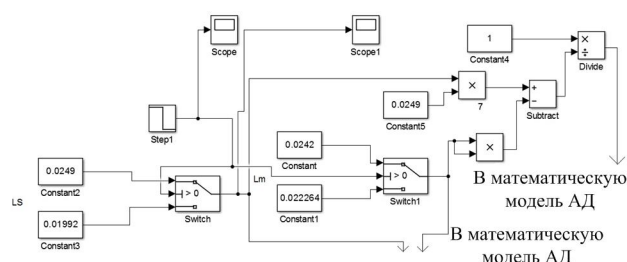


Рис. 13. Сегмент системы, осуществляющий изменение данных АД

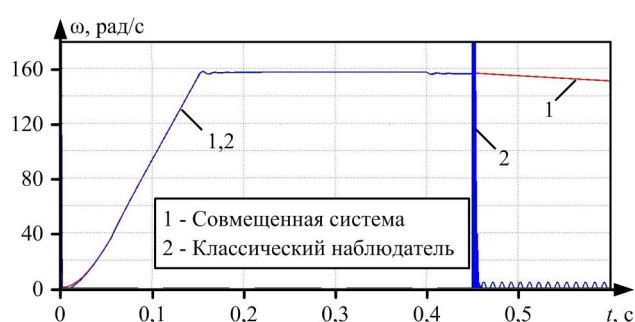


Рис. 14. Динамика скорости в режиме динамических межвитковых замыканий

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведя анализ данных, полученных в ходе исследовательских изысканий, четко видна тенденция к улучшению параметров работы наблюдателей (а отсюда и самой системы управления) при применении нейросетевого подхода. Это свидетельствует о больших возможностях в области качественного улучшения автоматизированного бездатчикового электропривода, связанных с развитием концепций интеграции нейронных сетей в структуры систем управления.

При анализе характеристик полученных систем, отчетливо наблюдается преимущество такого типа наблюдателей для системы управления печным рольгангом. Наблюдатель, основанный на совмещении нескольких различных нейроструктур, позволил практически полностью компенсировать недостатки, присущие исследуемому электроприводу: неудовлетворительную работу в регулировочном диапазоне низких частот, определенную длительность и колебательность характеристик динамических процессов.

Дальнейшим развитием работы служит разработка уточненной модели исследуемого промышленного объекта с целью более детального представления процессов, происходящих на различных этапах функционирования оборудования, и, соответственно, разработка качественно более точных и стабильных систем бездатчикового определения скорости.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Белов М.П., Новиков В.А., Рассудов Л.Н. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов: учебник для вузов. М.: Academia, 2004. 575 с.
- Терехов В.М. Элементы автоматизированного электропривода: учебник для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1987. 221 с.
- Сенцов Е.В., Мещеряков В.Н. Разработка адаптивного наблюдателя скорости векторного управления // Применение и развитие нейросетевого моделирования для решения фундаментальных задач в науке и технике: материалы Международной молодежной научно-практической конференции. Новочеркасск: ООО «Лик», 2018. С. 36-47.
- Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным управлением. М.: Академия, 2006. 256 с.
- Новиков В.А., Савва С.В., Татаринцев Н.И. Электропривод в современных технологиях: учебник для студентов вузов. М.: Академия, 2014. 400 с.
- Сенцов Е.В., Мещеряков В.Н. Создание нейросетевого наблюдателя скорости для повышения динамической стабильности системы векторного бездатчикового управления // Электротехнические системы и комплексы. 2022. № 2(55). С. 18-24. doi: 10.18503/2311-8318-2022-2(55)-18-24
- Калачев Ю.Н. Векторное регулирование (заметки практика). М.: ЭФО, 2013. 63 с.
- Сенцов Е.В. Нейросетевые наблюдатели скорости асинхронного двигателя // Тенденции развития современной науки: сборник трудов Научно-практической конференции студентов и аспирантов Липецкого государственного технического университета. Липецк: ЛГТУ, 2021. С. 109-113.
- Sinyukova T.V., Sentsov E.V., Sinyukov A.V. Neural Network Speed Observers // 1st International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA). IEEE, 2019. Pp. 320-324. doi: 10.1109/SUMMA48161.2019.8947484
- Калачев Ю.Н. Наблюдатели состояния в векторном электроприводe (записки дилетанта). М., 2015. 60 с.
- Мещеряков В.Н. Системы асинхронного электропривода с управляемыми координатами моментобразующих векторов. Липецк: ЛГТУ, 2008. 120 с.
- Виноградов А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока. Иваново: ИГЭУ им. В.И. Ленина, 2008. 98 с.
- Shihabudheen K.V., Pillai G.N. Recent Advances in Neuro-Fuzzy System: A Survey // Knowledge-Based Systems. 2018. Vol. 152. Pp. 136-162. doi: 10.1016/j.knsys.2018.04.014
- Sentsov E.V., Mesherekov V.N. Synthesis of a neuroregulator with predictive control of the electric drive of the actuators of technological units of metallurgical production // 18th International Scientific Technical Conference Alternating Current Electric Drives (ACED). IEEE, 2021. 9462259. doi: 10.1109/ACED50605.2021.9462259
- On Replacing PID Controller with Deep Learning Controller for DC Motor System / K. Cheon, J. Kim, M. Hamadache, D. Lee // J. Autom. Control Eng. 2015. No. 6(3). Pp. 452-456. doi: 10.12720/joace.3.6.452-456
- Каширских В.Г. Динамическая идентификация асинхронных электродвигателей. Кемерово: КузГТУ, 2005. 139 с.
- Усольцев А.А. Частотное управление асинхронными двигателями: учеб. пособие. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2006. 94 с.
- Исаков А.С., Ушаков А.В. Реализация наблюдателя состояний асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором в бездатчиковой системе векторного управления // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. 2007. № 38. С. 280-286.
- Синюкова Т.В., Сенцов Е.В. Синтез идентификаторов частоты вращения ротора асинхронного двигателя, основанных на концепции NN // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2019. № 9. С. 13-20. doi: 10.25791/pribor.09.2019.870
- Панкратов В.В., Котин Д.А. Адаптивные алгоритмы бездатчикового векторного управления асинхронными электроприводами подъемно-транспортных механизмов: учебное пособие. Новосибирск: НГТУ, 2012. 143 с.
- Москаленко В.В. Электрический привод: учеб. пособие для сред. проф. образования. М.: Издательский центр «Академия», 2004. 368 с.
- Исследование параметрической робастности бездатчикового векторного асинхронного электропривода с идентификатором Калмана / С.В. Ланграф, А.С. Глазырин, Т.А. Глазырина, А.С. Афанасьев, В.В. Тимошкин // Известия Томского политехнического университета. 2010. № 4(317). С. 120-123.
- Глазырин А.С. Бездатчиковое управление асинхронным электроприводом с синергетическим регулятором // Известия Томского политехнического университета. 2012. №4(321). С. 107-111.
- Афанасьев К.С. Разработка наблюдателя состояния для асинхронного электропривода с повышенной параметрической робастностью: дис. ... канд. тех. наук: 05.09.03 / Афанасьев Кирилл Сергеевич. Томск, 2015. 106 с.
- Aizenberg I. Complex-Valued Neural Networks with Multi-Valued Neurons. Berlin: Springer, 2011. 264 p.
- Вейнмейстер А.В. Косвенное измерение скорости вращения в электроприводe с асинхронным двигателем на основе идентификатора состояния: автореф. дис. ... канд. тех. наук: 05.09.03 / Вейнмейстер Андрей Викторович. СПб., 2013. 17 с.
- Литвиненко А.М., Баранов Д.С. Адаптивная система управления электроприводом намоточного станка // Электротехника. 2020. №10. С. 31-36.
- Schmidhuber J. Deep Learning in neural networks: An over-

view // Neural Networks. 2015. Vol. 61. Pp. 85-117. doi: 10.1016/j.neunet.2014.09.003

29. A Model for Predicting Wind Speed and the Probability of a Wind Gust / V.V. Dotsenko, E.V. Sentsov, A.M. Litvinenko,

V.N. Meshcheryakov, S. Valtchev // 3rd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA). IEEE, 2021. Pp. 576-579. doi: 10.1109/SUMMA53307.2021.9632142

Поступила в редакцию 3 декабря 2022 г.

Принята к печати 27 декабря 2022 г.

INFORMATION IN ENGLISH

SIMULATION OF ELECTRIC DRIVE SENSORLESS CONTROL SYSTEM FOR THE FURNACE ROLLER TABLE USING NEURAL NETWORK OBJECTS

Evgeny V. Sentsov

Postgraduate Student, Electric Drive Department, Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia, evgenysentsov@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8383-5139>

Victor N. Meshcheryakov

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

The paper considers the issue of modeling the control system of general industrial transport equipment such as transport roller tables. The description of technological equipment is given, structural and kinematic schemes of the considered industrial mechanism are given. The key features of mechanisms of this type are considered, the requirements for the control system of electric drives of this equipment are separately mentioned. Lifting and transport mechanisms, which include the considered industrial unit, are widespread in the structure of industrial enterprises. Furnace roller tables, which are a special case of transport roller tables, are characterized by non-stop operation in the line of technological units, where special requirements are placed on the accuracy and overload capacity of the drive. For electric drives of this type, the use of asynchronous motors with a squirrel-cage rotor and sensorless control systems is typical. The control system must maintain the constancy of the speed of roller tables group, provide the necessary rate of acceleration and deceleration according to the mechanical coefficient of friction of the metal on the rollers. Also, such systems are characterized by functioning in the range from 10 to 60-70 Hz. A tool that allows leveling the shortcomings of such features of the object operation can be considered as the method related to the integration of neural network mathematical functions into the structure of the control system. The paper presents various adaptation mechanisms of neural network structures, describes their advantages and disadvantages. The article also mentions the issues of dynamic stability of the above-mentioned electric drive systems, research modeling of structures with different approaches to the architecture of the control system is carried out.

Keywords: simulation, variable speed drive, control system, vector control, asynchronous motor, Predictive controller, observers, sensorless vector control, learning, neural networks

REFERENCES

1. Belov M.P., Novikov V.A., Rassudov L.N. *Avtomatizirovanny elektropriwod tipovykh proizvodstvennykh mekhanizmov i tekhnologicheskikh kompleksov* [Automated electric drive of typical production mechanisms and technological complexes]. Moscow, Akademiya Publ., 2004. 575 p. (In Russian)
2. Terekhov V.M. *Elementy avtomatizirovannogo elektropriroda* [Elements of an automated electric drive]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1987. 221 p. (in Russian)
3. Sentsov E.V., Meshcheryakov V.N. Development of an adaptive vector control velocity observer. *Primenenie i razvitie neyrosetevogo modelirovaniya dlya resheniya fundamentalnykh zadach v nauke i tekhnike: Materialy Mezhdunarodnoy molodezhnoy nauchno-prakticheskoy kon-*

ferentsii [Proceedings of the International Youth Scientific and Practical Conference "Application and development of neural network modeling for solving fundamental problems in science and technology"]. Novocherkassk, Lik LLC, 2018, pp. 36-47. (In Russian)

4. Sokolovsky G.G. *Elektroprirody peremennogo toka s chastotnym regulirovaniem* [AC drives with frequency regulation]. Moscow, Akademiya Publ., 2006. 272 p. (In Russian)
5. Novikov V.A., Savva S.V., Tatarintsev N.I. *Elektropriwod v sovremennykh tekhnologiyakh* [Electric drive in modern technologies]. Moscow, Academy Publ., 2014. 400 p. (In Russian)
6. Sentsov E.V., Meshcheryakov V.N. Neural Network Speed Observer Development to Improve the Dynamic Stability of a Sensorless Vector Control System. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2022, no. 2(55), pp. 18-24. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-2\(55\)-18-24](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-2(55)-18-24) (In Russian)
7. Kalachev Ju.N. *Vektornoe regulirovanie (zametki praktika)* [Vector regulation (practice notes)]. Moscow, JeFO, 2013. 63 p. (in Russian)
8. Sentsov E.V. Neural network observers of the speed of an asynchronous motor. *Tendentsii razvitiya sovremennoy nauki*: [collection of proceedings of the scientific and practical conference of students and graduate students of the Lipetsk State Technical University "Trends in the development of modern science"]. Lipetsk, Lipetsk State Technical University Publ., 2021, pp. 109-113. (in Russian)
9. Sinyukova T.V., Sentsov E.V., Sinyukov A.V. Neural Network Speed Observers. 1st International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA). IEEE, 2019, pp. 320-324. doi: 10.1109/SUMMA48161.2019.8947484
10. Kalachev Ju.N. *Nabljudateli sostojaniya v vektornom jelektroprirode (zapiski diletanta)* [State observers in a vector electric drive (dilettante notes)]. Moscow, 2015. 60 p. (in Russian)
11. Meshcheryakov V.N. *Sistemy asinhronnogo elektropriroda s upravlyaemyimi koordinatami momentobrazuyushchih vektorov* [Systems of asynchronous electric drive with controlled coordinates of moment-generating vectors]. Lipetsk, LGTU Publ., 2008. 120 p. (in Russian)
12. Vinogradov A.B. *Vektornoe upravlenie jelektroprirodami peremennogo toka* [Vector control of AC drives]. Ivanovo, ISPU Pul., 2008. 98 p. (in Russian)
13. Shihabudheen K.V., Pillai G.N. Recent Advances in Neuro-Fuzzy System: A Survey. *Knowledge-Based Systems*. 2018, vol. 152, pp. 136-162. doi:10.1016/j.knosys.2018.04.014

14. Sentsov E.V., Mesherekov V.N. Synthesis of a neuroregulator with predictive control of the electric drive of the actuators of technological units of metallurgical production. 18th International Scientific Technical Conference Alternating Current Electric Drives (ACED). IEEE, 2021. 9462259. doi: 10.1109/ACED50605.2021.9462259
15. Cheon K., Kim J., Hamadache M., Lee D. On Replacing PID Controller with Deep Learning Controller for DC Motor System. *J. Autom. Control Eng.* 2015, no. 6(3), pp. 452-456. doi: 10.12720/joace.3.6.452-456
16. Kashirskikh V.G. *Dinamicheskaya identifikatsiya asinkhronnykh elektrodvigateley* [Dynamic identification of induction motors]. Kemerovo, GU KuzGTU Publ., 2005. 139 p. (in Russian)
17. Usoltsev A.A. *Chastotnoe upravlenie asinhronnymi dvigatel'nyimi* [Frequency control of asynchronous motors]. St. Petersburg, St. Petersburg State University ITMO Publ., 2006. 94 p. (in Russian)
18. Isakov A.S., Ushakov A.V. *Realizatsiya nabljudatelja sostojanij asinhronnogo dvigatelja s korotkozamknutym rotorom v bezdatchikovej sisteme vektornogo upravlenija* [Implementation of the state observer of an induction motor with a squirrel-cage rotor in a sensorless vector control system]. Scientific and technical bulletin. St. Petersburg State University ITMO, 2007, no. 38, pp. 280-286. (in Russian)
19. Sinjukova T.V., Sentsov E.V. Synthesis of the rotor frequency of the asynchronous rotor based on the concept NN. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol, diagnostika* [Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics], 2019, no. 9, pp. 13-20. doi: 10.25791/pribor.09.2019.870 (in Russian)
20. Pankratov V.V., Kotin D.A. *Adaptivnye algoritmy bezdatchikovogo vektornogo upravlenija asinhronnymi jelektroprivodami podemno-transportnyh mehanizmov* [Adaptive algorithms for sensorless vector control of asynchronous electric drives of lifting and transport mechanisms]. Novosibirsk, NGTU Publ., 2012. 143 p. (in Russian)
21. Moskalenko V.V. *Jelektricheskij privod: uchebnoe posobie dlya sred. prof. obrazovaniya* [Electric Drive]. Moscow, Akademiya Publ., 2004. 368 p. (in Russian)
22. Langraf S.V., Glazyrin A.S., Glazyrina T.A., Afanasyev A.S., Timoshkin V.V. Investigation of the parametric robustness of a sensorless vector asynchronous electric drive with Kalman identifier. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta* [News of the Tomsk Polytechnic University], 2010, vol. 317, no. 4, pp. 120-123. (in Russian)
23. Glazyrin A.S. Sensorless control of an asynchronous electric drive with a synergistic controller. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta* [News of the Tomsk Polytechnic University], 2012, vol. 321, no. 4, pp. 107-111. (in Russian)
24. Afanasev K.S. *Razrabotka nabljudatelja sostojanija dlja asinhronnogo jelektroprivoda s povyshennoj parametricheskoj robustnostju*. Kand. Diss. [Development of a state observer for an asynchronous electric drive with increased parametric robustness. Kand. Diss.]. Tomsk, 2015, 106 p. (in Russian)
25. Aizenberg I. *Complex-Valued Neural Networks with Multi-Valued Neurons*. Berlin: Springer, 2011. 264 p.
26. Veynmeyster, A.V. *Kosvennoe izmerenie skorosti vrashcheniya v jelektroprivoде s asinkhronnym dvigatelem na osnove identifikatora sostoyaniya*. Kand. Diss. [Indirect measurement of rotation speed in an electric drive with an asynchronous motor based on a state identifier. Kand. Diss. abstract]. St. Petersburg, 2013, 17 p. (in Russian)
27. Litvinenko A.M., Baranov D.S. Adaptive control system for the electric drive of the washing machine. *Elektrotehnika* [Electrical engineering], 2020, no. 10, pp. 31-36. (In Russian)
28. Schmidhuber J. Deep Learning in neural networks: An overview. *Neural Networks*. 2015, vol. 61, pp. 85-117. doi: 10.1016/j.neunet.2014.09.003
29. Dotsenko V.V., Sentsov E.V., Litvinenko A.M., Mesherekov V.N., Valtchev S. A Model for Predicting Wind Speed and the Probability of a Wind Gust. 3rd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA). IEEE, 2021, pp. 576-579. doi: 10.1109/SUMMA53307.2021.9632142

Сенцов Е.В., Мещеряков В.Н. Моделирование бездатчиковой системы управления электропривода печного рольганга с применением нейросетевых объектов // Электротехнические системы и комплексы. 2023. № 1(58). С. 49-56. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-1\(58\)-49-56](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-1(58)-49-56)

Sentsov E.V., Meshcheryakov V.N. Simulation of Electric Drive Sensorless Control System for the Furnace Roller Table Using Neural Network Objects. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2023, no. 1(58), pp. 49-56. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-1\(58\)-49-56](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-1(58)-49-56)

Андреев С.М.¹, Прасолов А.С.¹, Бондарев И.С.², Швидченко Н.В.¹¹Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова²ООО «КомпасПлюс», Магнитогорск

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОЙ КОРРЕКЦИИ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ПЕРИОДОВ ДЛЯ ВОЗДУХОНАГРЕВАТЕЛЕЙ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ С УЧЕТОМ ИХ РЕАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ

Изменение характеристик воздухонагревателей доменной печи в составе блока приводит к необходимости коррекции режимных карт. Выполнение такой коррекции носит эпизодический характер, и зачастую само значение величины коррекции времени периодов работы блока воздухонагревателей определяется из эмпирического опыта технолога и строится на предположениях о реальном состоянии насадки воздухонагревателя без оценки «истории» его работы. Такой подход к управлению не позволяет обеспечить непрерывное поддержание максимальной эффективности работы блока воздухонагревателей и приводит к снижению производительности по дутью, что сказывается на экономических показателях работы доменной печи. В работе рассматривается система управления, которая выполняет непрерывный анализ состояния воздухонагревателей в блоке и выполняет коррекцию времени периода дутья для каждого воздухонагревателя. Оценка возможностей блока воздухонагревателей выполняется с использованием лингвистической переменной, для которой формируются два термина – «слабый» и «сильный» воздухонагреватель, которые определяют способность воздухонагревателя к нагреву дутья для заданного времени цикла работы. Используя методы нечеткой логики с учетом характеристик «слабого» воздухонагревателя в конце каждого цикла работы, формируется величина коррекции времени периода дутья для всего блока. Таким образом система позволяет осуществить непрерывную коррекцию режимной карты с учетом изменяющихся характеристик воздухонагревателей в блоке. Проведенный вычислительный эксперимент с моделями воздухонагревателей с разными характеристиками показал, что переход от исходной режимной карты с одинаковым временем периодов дутья к новой режимной карте произошел за 15 полных циклов работы блока, или за 37,5 часов. При этом средняя температура дутья увеличилась на 32,8°C, а минимальная температура горячего дутья от «слабого» воздухонагревателя увеличилась на 133,6°C

Ключевые слова: доменный воздухонагреватель, нечеткая логика, математическая модель, теплопередача, режимная карта

ВВЕДЕНИЕ

Порядка 70% мирового производства стали [1, 2] производится по технологии с использованием процесса получения жидкого чугуна в доменной печи с дальнейшей его переработкой в кислородном конвертере. В технологическом процессе производства чугуна воздухонагреватели являются важным вспомогательным оборудованием, которое непрерывно обеспечивают доменный процесс горячим дутьем, которое представляет собой поток нагретого до температуры 1100–1250°C воздуха с расходом до 10 тыс. м³/ч [3-5]. Горячее дутье является важной частью доменного процесса, так как обеспечивает протекание всех физико-химических процессов восстановления железа из железосодержащих материалов, находящихся в шахте доменной печи [6]. Важным требованием, предъявляемым к горячему дутью, является непрерывность подачи и стабильность температуры [7].

В свою очередь, отдельный воздухонагреватель (ВН) представляет собой противоточный регенеративный теплообменник периодического действия [8]. Для обеспечения непрерывности подачи дутья в доменную печь несколько воздухонагревателей (обычно 3 или 4) объединяют в блок, в котором в каждый момент времени хотя бы один находится в режиме дутья, чтобы обеспечить постоянный поток горячего дутья в доменную печь, а остальные – в режиме нагрева [9, 10].

На рис. 1 показана схема, поясняющая работу бло-

ка воздухонагревателей доменной печи. По схеме два воздухонагревателя (№2 и 3) находятся в режиме нагрева, а один воздухонагреватель (№1) в режиме дутья. Также на схеме показаны основные узлы воздухонагревателей.

От работы блока воздухонагревателей во многом зависит общая экономическая эффективность производства чугуна [11, 12]. Считается, что при повышении температуры дутья на 100°C уменьшается расход кокса на 2-3% [13-15]. Поэтому повышение эффективности работы блока доменных воздухонагревателей выражается в повышении температуры горячего дутья.

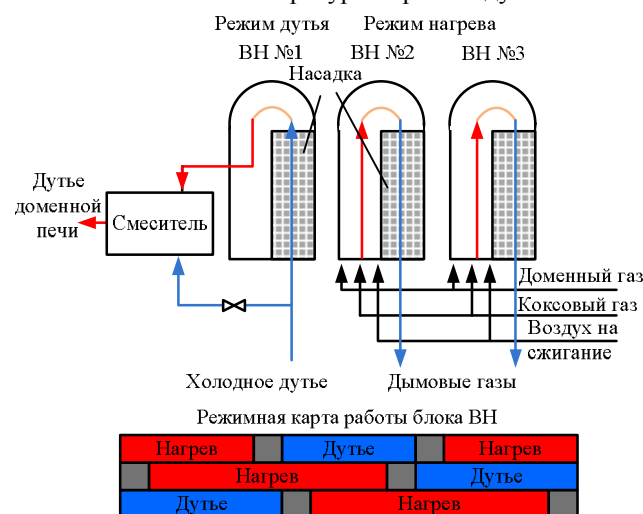


Рис. 1. Схематичное изображение работы воздухонагревателей доменной печи и возможный вариант режимной карты

Так, в работах [16, 17] с использованием имитационной модели работы блока воздушонагревателей, построенной с использованием искусственных нейронных сетей, предложена методика поиска длительностей периодов воздушонагревателей с разными характеристиками при заданной продолжительности полного периода работы блока воздушонагревателей с учетом ограничений на максимальное количество топлива, потребляемого блоком.

В работе [18] выполнено исследование по разработке методики, которая позволяет определить сравнительную степень изношенности насадок воздушонагревателей, что является причиной снижения КПД ВН и определены экономические критерии постановки на ремонт ВН.

В работе [19] анализируется конструкция насадки воздушонагревателя и предлагается ступенчатый нагрев купола воздушонагревателя и сокращение периодов работы при применении дополнительной насадки. Проведенный вычислительный эксперимент с использованием модели Меньшикова-Соломенцева показал, что комплексное применение этих методов на аппарате с дополнительной насадкой позволит повысить температуру дутья на 50-55°C. Ступенчатый нагрев купола ВН исследовался в работе [20]. В соответствии с двухступенчатым графиком нагрева каждый период нагрева насадки воздушонагревателя разделяют на две стадии с различным уровнем температур, что позволило увеличить среднюю температуру нагрева дутья на 5-7°C, а коэффициент полезного действия ВН на 0,06-0,08%.

В работе [21] выполнено исследование влияния роста гидравлического сопротивления насадки в период нагрева на температурные параметры теплоносителей. Полученные результаты были положены в разработанную методику оптимизации режима работы блока доменных воздушонагревателей, позволяющую при выбранных критериях оптимальности, ограничениях на значимые факторы теплообмена определить оптимальный режим функционирования блока аппаратов с учетом их индивидуальных характеристик.

Как показали исследования [16-22], в процессе эксплуатации ВН из-за постоянных тепловых ударов вследствие периодической работы элементы насадок ВН разрушаются, что ухудшает способность насадки аккумулировать тепло в режиме нагрева и, соответственно, снижается производительность ВН. Ремонт насадок воздушонагревателей производится не для всего блока в целом, а для отдельного ВН, что приводит к тому, что с течением времени производительность воздушонагревателей в одном блоке начинает сильно различаться и это различие изменяется во времени. Поэтому периодически производится коррекция режимных карт с учетом реальных теплотехнических характеристик воздушонагревателей и в особенности состояние их насадок [22, 23]. Процесс коррекции режимной карты носит эпизодический характер, и зачастую само значение величины коррекции времени периодов работы блока воздушонагревателей определяется из эмпирического опыта технолога и строится на предположениях о реальном состоянии насадки ВН без оценки «истории» его работы.

Так как реальное состояние воздушонагревателей в блоке большую часть времени эксплуатации различно

и их характеристики постоянно изменяются, то выбор режимной карты становится достаточно трудоемкой задачей [24]. Подходы к созданию и коррекции режимных карт весьма разнообразны. В основном они основываются на применении прогнозного управления [25] с использованием различных методов идентификации математической модели, включающих как модели на основе теплопередачи [26, 27], так и на основе интеллектуального анализа технологической информации [16, 28-30].

Для обобщенного описания состояния ВН в данной работе вводятся лингвистические понятия «сильный» и «слабый» ВН. Эти понятия характеризуют вклад каждого ВН в нагрев дутья всего блока. Непрерывное определение сильного и слабого ВН в блоке позволяет автоматически проводить коррекцию режимных карт таким образом, чтобы максимально задействовать возможности воздушонагревателей в блоке.

Для проведения вычислительных операций с введенными лингвистическими понятиями для характеристик ВН используются методы нечеткой логики, позволяющие оперировать нечеткими и приближенными рассуждениями при описании процессов и объектов [31]. В автоматизированных системах управления методы нечеткой логики наиболее часто используются при реализации алгоритмов формирования управляющих воздействий для процессов, описываемых лингвистически [32]. Для процесса нагрева дутья таким лингвистическим параметром является обобщенный параметр, характеризующий способность ВН к нагреву дутья при работе его в блоке. Управляющим параметром в этом случае принимается длительность периодов (нагрева и дутья) для каждого ВН при заданном времени цикла. Непрерывный контроль состояния каждого ВН позволит непрерывно формировать длительность периодов, а для блока ВН в целом обеспечивать коррекцию режимной карты.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НАСАДКИ ВОЗДУХОНАГРЕВАТЕЛЯ

Насадка ВН представляет выложенные друг на друга кирпичи шестиугольной формы с круглыми каналами для протекания теплоносителя. В газовый период дымовые газы, протекая по каналам насадки сверху вниз, передают тепло огнеупорам, а в дутьевой период холодное дутье протекает по каналам снизу вверх, постепенно нагреваясь, подается далее в доменную печь, насадка при этом охлаждается [33]. При исследовании работы насадки ВН разработана математическая модель, в которой приняты следующие допущения.

Сплошное тело насадки с вертикальными каналами заменяется набором теплоизолированных цилиндрических тел с одним каналом модели. Диаметр цилиндрического тела, канала, теплофизические характеристики материала, а также количество цилиндрических тел выбираются такими, чтобы получить подобное реальному распределение температуры по высоте и количеству аккумулированной тепловой энергии [35]. В исследованиях было принято заменить одним цилиндрическим телом вертикальную группу каналов, образованных вертикальным столбом огнеупора (рис. 2).

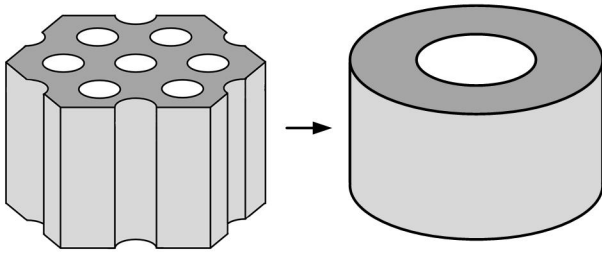


Рис. 2. Представление слоя насадки воздухонагревателя теплотехнически подобным элементом в форме толстостенного цилиндра

Тепловые характеристики материала стенки цилиндра выбирались такими же, как параметры материалов, используемых в данном воздухонагревателе огнеупоров, и изменяются по высоте (сверху – диас, снизу – шамот). Такое представление позволит значительно упростить математическую модель теплового нестационарного режима насадки воздухонагревателя при достаточно высокой точности полученной математической модели [26].

При реализации численной модели каждый цилиндрический элемент разбивается на n участков одинаковой длины h . Теплота, отданная или полученная теплоносителем от цилиндра, вычитается (складывается) с энтальпией в предыдущем участке.

Температура теплоносителя, протекающего внутри цилиндра, устанавливается в соответствии с показаниями датчиков температуры купола для газового периода и температуры холодного дутья в дутьевой период.

Количество теплоты, переданное теплоносителем, определяется по закону Ньютона-Рихмана:

$$Q = \alpha (T_f - T_w) F, \quad (1)$$

где α – коэффициент теплоотдачи, Вт/м²·град; T_f – температура теплоносителя, °С; T_w – температура стенки, °С; F – площадь поверхности теплообмена, м.

В период нагрева насадки коэффициент теплоотдачи вычисляется как сумма конвективного α_c и лучистого α_r теплообмена:

$$\alpha = \alpha_c + \alpha_r. \quad (2)$$

В период дутья лучистый теплообмен минимален, поэтому в расчетах теплопередачи газ-внутренняя поверхность полого цилиндра используется только конвективный теплообмен.

Конвективный теплообмен вычисляется согласно следующему уравнению:

$$\alpha_c = (1,123 + 0,283 U d^{-0,4}) T_f^{0,25}, \quad (3)$$

где U – скорость теплоносителя, м/с; d – диаметр канала, м.

Коэффициент лучистой теплоотдачи от газа к твердой стенке вычисляется по формуле

$$\alpha_r = \frac{\sigma (T_f^4 - T_w^4) F}{\left(\frac{1}{\varepsilon_f} - \frac{1}{\varepsilon_w} - 1 \right) (T_f - T_w)}, \quad (4)$$

где $\sigma = 5,6 \cdot 10^8$ – постоянная Стефана-Больцмана, Вт/м²·К²; ε_f – степень черноты дымовых газов; ε_w – степень черноты материала насадки.

Изменение температуры теплоносителя по высоте для i -го участка вычисляется как

$$T_{f(i)} = T_{f(i-1)} + \frac{Q}{c_f W} \Delta \tau, \quad (5)$$

где $T_{f(i-1)}$ – температура теплоносителя в предыдущем участке; c_f – это теплоемкость теплоносителя; W – массовый расход; $\Delta \tau$ – шаг по времени.

После вычисления количества теплоты, переданного теплоносителем к стенке, вычисляется температура материала насадки в следующий момент времени:

$$T_{w(i)}^{\tau+1} = \frac{Q \Delta \tau}{m_w c_w} + T_{w(i)}^{\tau}, \quad (6)$$

где m_w – масса материала насадки, кг; c_w – теплоемкость материала насадки, Дж/кг·град.

Адаптация предложенной математической модели сводится к выбору значений внешнего и внутреннего радиуса при известных значениях степени черноты материала насадки и скорости течения теплоносителя.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РЕГУЛЯТОРА ДЛИТЕЛЬНОСТИ ПЕРИОДОВ РАБОТЫ ВОЗДУХОНАГРЕВАТЕЛЕЙ

Анализ работы блока воздухонагревателей показал, что для каждого момента времени существует рациональное распределение времени периодов дутья и нагрева, позволяющее максимально использовать способности ВН к аккумуляции тепла. Моменты переключения отдельных ВН в блоке представляются в форме режимных карт (см. **рис. 1**). Так как по возможностям нагрева дутья все воздухонагреватели в блоке разные и их характеристики непрерывно изменяются во времени, то режимная карта должна учитывать текущее состояние каждого воздухонагревателя и, соответственно, производится её коррекция. Для интегральной оценки состояния воздухонагревателя введены два понятия – «сильный» и «слабый» ВН, что позволит формировать оценку состояния с использованием лингвистической переменной «Состояние ВН». Таки-ми лингвистическими переменными оперируют методы нечеткой логики и нечетких множеств, которые позволяют описывать нечеткие понятия и знания, оперируя этими знаниями, и делать нечеткие выводы. Нечеткая логика обеспечивает эффективные средства отображения, неопределённостей и неточностей реального мира [34].

Цикл работы воздухонагревателя состоит из двух основных временных промежутков – времени периода дутья и времени периода нагрева. Так как при постоянном времени цикла эти значения связаны, управлять можно любым из этих временных параметров, а второй параметр будет являться функцией первого. В работе было принято, что управляемым параметром является время работы ВН в период дутья. Для управления этим параметром в условиях неопределенности состояния ВН в работе предложено использовать регулятор времени на основе нечеткой логики. Для такого типа ре-

гулятора требуется формирование базы правил, использование которой позволит формировать направление изменения времени дутья.

Для синтеза нечетко-логического регулятора (НЛР) разработана база правил при всех возможных состояниях системы. В качестве критерия оценки работы регулятора используется два параметра системы – это разница значений температур горячего дутья в конце дутьевого периода, а также динамика изменения данного параметра.

НЛР позволяет использовать множество вариантов функций принадлежности. Нечеткое множество задается на непрерывной области определения (предметной области) переменной с помощью функций принадлежности, которые характеризуют степень принадлежности значения переменной этому множеству [34].

Принцип работы системы заключается в следующем – в конце дутьевого цикла работы измеряется минимальная температура горячего дутья. Когда все три воздушонагревателя закончили продувку, выбирается «слабый» ВН с самой низкой температурой горячего дутья, а также вычисляется среднеарифметическая температура горячего дутья для всех воздушонагревателей.

Далее вычисляются два значения: e_1 – разность между температурой горячего дутья «слабого» ВН и среднеарифметической температурой горячего дутья всех ВН в конце цикла продувки, $e_{2(i)}$ – величина изменения температур горячего дутья за цикл работы блока.

$$e_{1(i)} = T_{(Lo)i} - T_{Ai}; \quad (7)$$

$$T_A = \frac{1}{3}(T_1 + T_2 + T_3); \quad (8)$$

$$e_{2(i)} = e_{1(i)} - e_{1(i-1)}, \quad (9)$$

где $e_{1(i)}$ – величина разности между температурой горячего дутья $T_{(Lo)i}$ «слабого» ВН и среднеарифметической температурой горячего дутья всех ВН в конце текущего цикла продувки T_{Ai} ; $e_{1(i-1)}$ – величина разности между температурой горячего дутья «слабого» ВН и среднеарифметической температурой горячего дутья всех ВН в конце предыдущего цикла продувки; T_1, T_2, T_3 – температуры горячего дутья в конце цикла каждого ВН.

Нормирование значений $e_{1(i)}$ и $e_{2(i)}$ производится через весовые коэффициенты K_1 и K_2 , которые являются настроечными значениями НЛР:

$$X_1 = K_1 e_{1(i)}; \quad (10)$$

$$X_2 = K_2 e_{2(i)}. \quad (11)$$

Полученные нормированные значения переменных X_1 и X_2 являются входными сигналами НЛР. Значения этих переменных определяют величину отклонения параметров «слабого» ВН от среднего значения состояний ВН в блоке. Значение X_1 определяет саму величину отклонения, а X_2 – скорость изменения величины X_1 при постоянном времени цикла работы ВН.

В области определения переменной X_1 определено пять нечетких множеств (рис. 3), а в области определения переменной X_2 – три нечетких множества

(рис. 4), формирующих функции принадлежности этих величин соответствующей области. Вводятся следующие области определения. Для переменной X_1 – величина отклонения: A_1 – Очень большое; A_2 – Большое; A_3 – Среднее; A_4 – Маленькое; A_5 – Нет отклонения. Для переменной X_2 – скорость изменения: A_1 – Быстро; A_2 – Медленно; A_3 – Без изменений. Так как значения X_1 и X_2 формируются только в конце периода дутья каждого ВН, то особенностью реализации НЛР является выполнение вычислений только в момент окончания цикла работы всего блока. То есть регулятор обладает свойством дискретности, чтение и изменение параметров производится в определенные моменты времени.

Результатом работы НЛР является выходная лингвистическая переменная Y , определяющая направление и скорость изменения времени дутья ВН. Значения изменения времени цикла дутья определены лингвистической переменной Y , соответствующей функциям принадлежности: B_1 – Положительное очень большое; B_2 – Положительное большое; B_3 – Положительное малое; B_4 – Положительное очень малое; B_5 – Нулевое; B_6 – Отрицательно очень малое; B_7 – Отрицательно малое.

Функции принадлежности выходной величины определены в дискретной форме функциями:

$$\mu^Y(X) = \sigma(x - b) = \begin{cases} 1, & \text{если } x = b; \\ 0, & \text{если } x \neq b, \end{cases} \quad (12)$$

где значения параметра b выходной лингвистической переменной представлены вектором $b = [1; 0,75; 0,5; 0,25; 0; -0,25; -0,5]^T$.

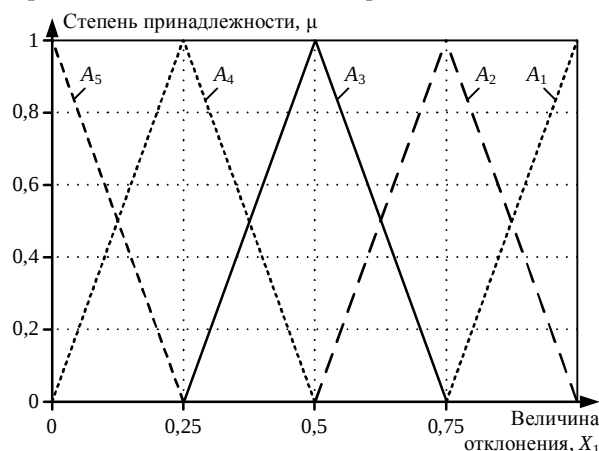


Рис. 3. Функции принадлежности для переменной X_1

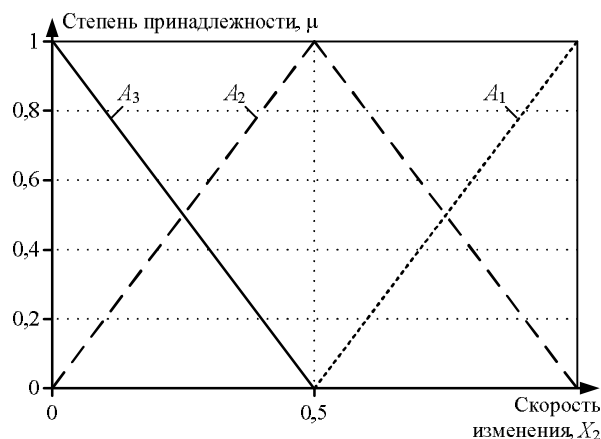


Рис. 4. Области определения переменной X_2

Для нечеткого управления используется основное эвристическое правило: «Если наблюдается рассогласование между текущим и средним значениями температуры, тогда необходимо изменение времени дутья для подавления текущего значения рассогласования».

Функционирование предлагаемого нечеткого регулятора определяется следующей базой правил:

$$\begin{aligned}
 R_1 : (X_1 = A_1^{(X_1)}) \cap (X_2 = A_3^{(X_2)}) &\rightarrow Y = B_1; \\
 R_2 : (X_1 = A_1^{(X_1)}) \cap (X_2 = A_2^{(X_2)}) &\rightarrow Y = B_2; \\
 R_3 : (X_1 = A_1^{(X_1)}) \cap (X_2 = A_1^{(X_2)}) &\rightarrow Y = B_3; \\
 R_4 : (X_1 = A_2^{(X_1)}) \cap (X_2 = A_3^{(X_2)}) &\rightarrow Y = B_2; \\
 R_5 : (X_1 = A_2^{(X_1)}) \cap (X_2 = A_2^{(X_2)}) &\rightarrow Y = B_3; \\
 R_6 : (X_1 = A_2^{(X_1)}) \cap (X_2 = A_1^{(X_2)}) &\rightarrow Y = B_4; \\
 R_7 : (X_1 = A_3^{(X_1)}) \cap (X_2 = A_3^{(X_2)}) &\rightarrow Y = B_3; \\
 R_8 : (X_1 = A_3^{(X_1)}) \cap (X_2 = A_2^{(X_2)}) &\rightarrow Y = B_4; \\
 R_9 : (X_1 = A_3^{(X_1)}) \cap (X_2 = A_1^{(X_2)}) &\rightarrow Y = B_5; \\
 R_{10} : (X_1 = A_4^{(X_1)}) \cap (X_2 = A_3^{(X_2)}) &\rightarrow Y = B_4; \\
 R_{11} : (X_1 = A_4^{(X_1)}) \cap (X_2 = A_2^{(X_2)}) &\rightarrow Y = B_5; \\
 R_{12} : (X_1 = A_4^{(X_1)}) \cap (X_2 = A_1^{(X_2)}) &\rightarrow Y = B_6; \\
 R_{13} : (X_1 = A_5^{(X_1)}) \cap (X_2 = A_3^{(X_2)}) &\rightarrow Y = B_5; \\
 R_{14} : (X_1 = A_5^{(X_1)}) \cap (X_2 = A_2^{(X_2)}) &\rightarrow Y = B_6; \\
 R_{15} : (X_1 = A_5^{(X_1)}) \cap (X_2 = A_1^{(X_2)}) &\rightarrow Y = B_7.
 \end{aligned} \quad (13)$$

Изменение времени дутья для n -го ВН определяется дефазификацией выходной лингвистической переменной по формуле

$$\Delta t_n = \frac{\sum_{j=1}^m \mu_j^Y}{X_{1(n)}} (T_{n(i)} - T_{A(i)}), \quad (14)$$

где $T_{n(i)}$ – температура горячего дутья в конце цикла дутья n -го ВН.

То есть если у ВН температура горячего дутья больше среднеарифметической, то время дутьевого периода увеличивается на Δt_n , соответственно, уменьшится время нагрева на ту же величину. Если температура горячего дутья меньше среднеарифметической, то время дутьевого периода уменьшится. Если температура горячего дутья равна среднеарифметической, то время дутьевого периода не изменится.

После определения времени изменения цикла дутья

для слабого ВН это время перераспределяется между двумя сильными ВН. При этом общее время работы блока не изменяется, а только лишь изменяется время периодов нагрева и дутья в ту или иную сторону. Доля перераспределения времени циклов между двумя другими воздушонагревателями выбирается пропорционально отклонениям от среднего значения. Схема реализации порядка вычислений значений времени периода дутья в регуляторе представлена на рис. 5.

Значения сигналов температуры горячего дутья поступают на блоки вычисления средней температуры горячего дутья, а также на блок вычисления разницы между средней и текущей T'_n . Далее производится определение параметров «слабого» ВН и формируются значения X_1 и X_2 , которые являются входными параметрами НЛР.

Используя правила формирования нечеткого вывода, в НЛР формируется выходной сигнал в форме лингвистической переменной Y и соответствующие для него значения функций принадлежности μ^Y . После процедуры дефазификации для каждого ВН в блоке формируется значение коррекции времени периода дутья Δt_n и новые значения времени периодов дутья t_1, t_2, t_3 . Эти значения передаются на систему управления периодами воздушонагревателей блока.

Для практической реализации регулятора разработана система автоматической коррекции периодов работы воздушонагревателей, обеспечивающая дискретность работы НЛР и формирование времени периодов дутья в конце цикла работы блока, структурно-функциональная организация которой приведена на рис. 6.

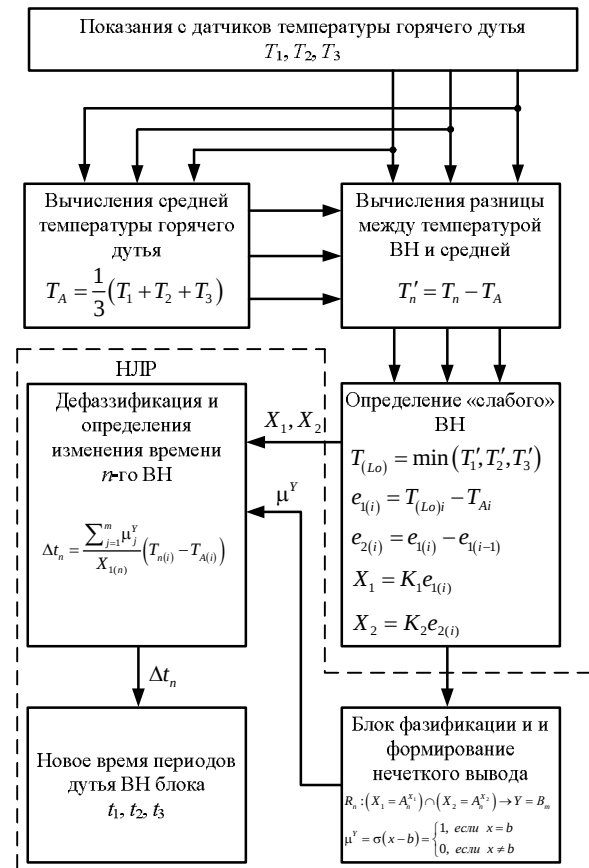


Рис. 5. Схема реализации порядка вычислений значений времени периода дутья в регуляторе

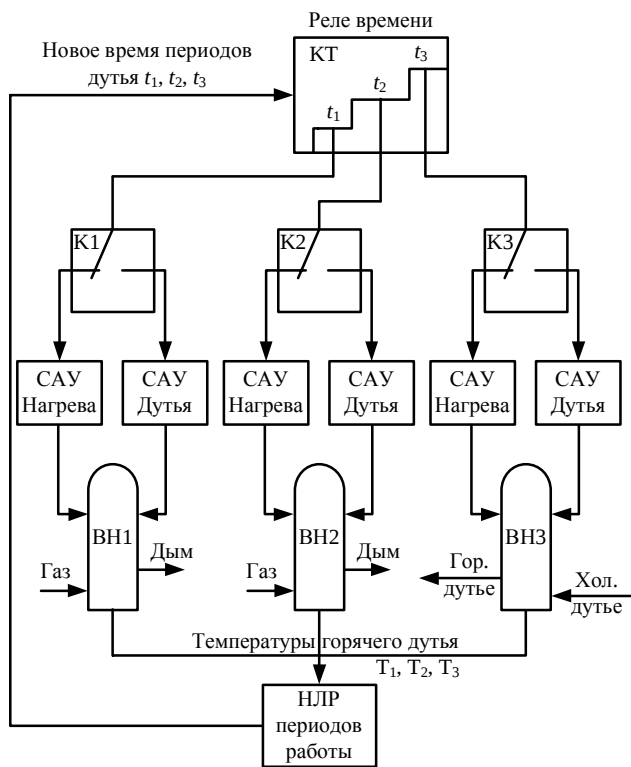


Рис. 6. Структурно-функциональная организация системы автоматической коррекции периодов работы ВН в блоке

В схеме предусмотрено реле времени (КТ), которое в соответствии с заданным временем периода дутья последовательно формирует сигналы на переключение периода работы отдельных воздухонагревателей. Для каждого ВН переключение периода работы осуществляется реле К1 - К3.

Значение температуры горячего дутья после каждого ВН измеряется с использованием датчика или вычисляется по температуре дутья после смесителя и положения клапана холодного дутья в смеситель. Эти значения передаются на вход системы вычислений значений времени периода дутья, построенной с использованием НЛР.

РЕЗУЛЬТАТЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ КОРРЕКЦИИ ВРЕМЕНИ ПЕРИОДОВ ДУТЬЯ

Для исследования работы системы был проведен численный эксперимент, в котором программно реализованная система автоматической коррекции периодов работы ВН на основе разработанных нечетких правил работала совместно с математической моделью насадки ВН.

Применение регулятора совместно с моделью обуславливается тем, что параметры работы блока ВН постоянно меняются в зависимости от уставок температуры смешанного и холодного дутья, а также от условий окружающей среды и состава топлива. В реализованной математической модели насадки ВН учет изменения её эксплуатационных характеристик (уменьшение проходного сечения канала, изменение теплотехнических характеристик огнеупоров в результате эксплуатации, изменение геометрических размеров насадки) формировался путем изменения коэффи-

циентов в (4)–(6).

Учет в модели текущих, реальных параметров ВН позволяет спрогнозировать изменение времени периодов работы блока ВН с учетом сохранившейся тепловой энергии в насадке. Так как для реальных условий работы блока воздухонагревателей значительное изменение времени периодов работы одновременно не представляется возможным, то в вычислительном эксперименте вводилось ограничение на максимальное изменение времени периода дутья. Это позволило избежать резких колебаний температуры, выходящих за пределы возможностей блока.

В качестве начальных условий состояния системы были выбраны следующие значения:

- общее время цикла $t_{\text{ц}}=9000$ с;
- начальное значение времени периода дутья для каждого ВН $t_1=t_2=t_3=3000$ с;
- шаг вычислений $\Delta t=50$ с;
- начальные значения температуры дыма в конце периода нагрева: $T_1=450$ °С, $T_2=350$ °С; $T_3=200$ °С;
- скорость теплоносителя $U=6$ м/с;
- зона нечувствительности системы по значению разности температур «слабый ВН–среднее» $\Delta e_1=10$ °С;
- параметры настройки регулятора $K1=0,005$; $K2=0,02$;
- максимальное значение изменения времени периода дутья за один цикл работы блока воздухонагревателей $\Delta t_{\text{MAX}}=200$ с.

Формируемое НЛР управляющее воздействие в форме величины коррекции времени периода дутья в цикле работы блока воздухонагревателей в соответствии с принятыми правилами стремится минимизировать отклонение величины параметров e_1 и e_2 от нуля с учетом ограничений на максимальную величину коррекции. На рис. 7 показан переходный процесс во времени изменения величин e_1 и e_2 . Как видно из представленных графиков, переходный процесс завершается ориентировочно через 30–40 ч.

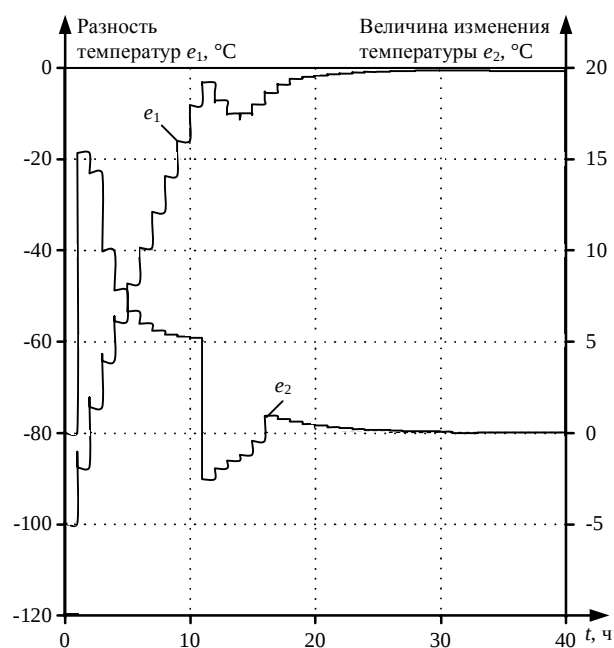


Рис. 7. Изменения управляемых параметров в системе

Для анализа работы системы автоматической коррекции времени периодов переходные процессы параметров отдельных воздухонагревателей удобно представлять по циклам работы блока. На **рис. 8** представлено изменение температуры горячего дутья для каждого воздухонагревателя в блоке (T_1 - T_3) и средней температуры дутья T_A по циклам работы блока. На **рис. 9** представлено изменение времени периодов дутья для каждого ВН в блоке.

Анализ полученных переходных процессов показал, что работа системы коррекции является устойчивой с выходом регулируемых параметров времени дутья на новые значения, которые обеспечивают увеличение средней температуры дутья.

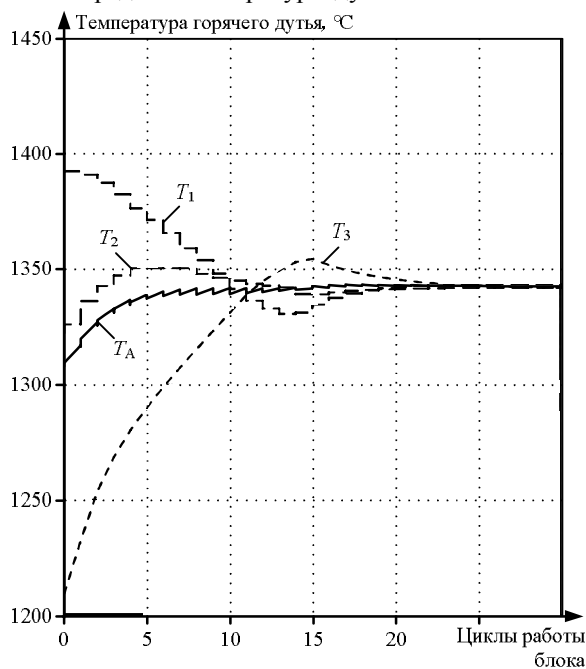


Рис. 8. Изменение температуры горячего дутья по воздухонагревателям в блоке

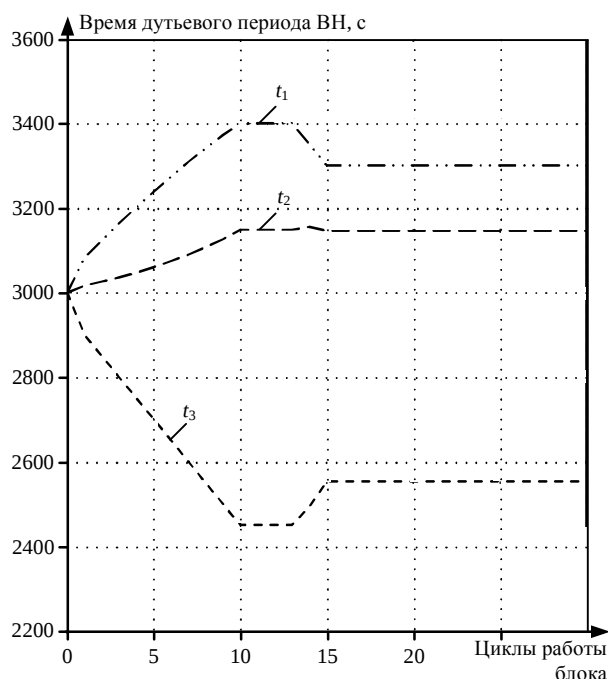


Рис. 9. Изменение времени периодов дутья по воздухонагревателям в блоке

Настройка времени работы блока ВН продолжалась 15 циклов полной смены режимов, или 37 ч 30 мин. Средняя температура горячего дутья увеличилась на 32,8°C, минимальная температура горячего дутья на 133,6°C.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассматривается интеллектуальная система коррекции времени дутьевого режима блока воздухонагревателей. По анализу температуры горячего дутья с каждого ВН-блока в системе формируется терм лингвистической переменной «сильный» и «слабый» ВН, который определяет состояния насадки ВН и, соответственно, его способность к нагреву дутья доменной печи. Используя методы нечеткой логики и учитывая тепловую энергию, оставшуюся в насадке воздухонагревателя после дутьевого периода, системой коррекции вырабатывается стратегия управления на следующий цикл работы с учетом теплового баланса всех ВН в блоке, которая заключается в формировании величины и направления изменения времени дутьевого периода.

Разработана структурно-функциональная организация системы автоматической коррекции периодов работы ВН в блоке и схема формирования коррекции времени периодов дутья с использованием нечетко-логического регулятора.

Проведенный вычислительный эксперимент с использованием имитационной модели насадки ВН показал, что работа интеллектуальной системы непрерывной коррекции времени периодов дутья позволит увеличить температуру горячего дутья на 10-30°C, а также снизить величину колебаний температуры смешанного дутья.

Представленные результаты могут быть использованы в существующих АСУ ТП нагрева дутья, а разработанная имитационная модель насадки ВН с НЛР позволяет разработать цифровой двойник ВН, предоставляющий информацию о текущем состоянии насадки ВН и позволяющий планировать её ремонты.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Юсфин Ю.С. Приоритетные проблемы аглодоменного производства // Сталь. 1993. №4. С. 4-9.
2. Model Development of a Blast Furnace Stove / J. Zetterholm, X. Ji, B. Sundelin, P.M. Martin, C. Wang // Energy Procedia. 2015. No. 75. Pp. 1758-1765. doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.454
3. Оптимизация тепловых режимов доменных воздухонагревателей на основе экономического критерия / Ф.Р. Шкляр, В.Л. Советкин, Н.И. Трофимов, В.М. Малкин, Н.М. Бабускин, В.С. Колодяжный // Известия вузов. Черная металлургия. 1985. №8. С. 113-115.
4. Упрощенный метод оптимизации режимов работы блока доменных воздухонагревателей / С.Л. Соломенцев, В.К. Сигмунд, В.Д. Коршиков, С.М. Басукинский, А.П. Пухов // Сталь. 1986. №5. С. 16-18.
5. Кондратьев Г.В., Коршикова М.В. Повышение эффективности управления блоком доменных воздухонагревателей // Славянские чтения: сб. науч. тр. Российской науч.-техн. конференции. Липецк, 1999. С. 87-90.
6. Компьютерные методы моделирования доменного процесса / Оворин О.П., Спирин Н.А., Терентьев В.Л., Гилева Л.Ю., Рыболовлев В.Ю., Косаченко И.Е., Лавров В.В., Терентьев А.В. Екатеринбург: Уральский государственный технический университет, 2005. 301 с.
7. Теплофизические основы тепловой работы металлургии

- ческих слоевых печей и агрегатов / Ярошенко Ю.Г., Швыдкий В.С., Спирин Н.А., Матюхин В.И., Лавров В.В. Екатеринбург: АМК «День РА», 2019. 464 с.
8. Меньшиков Р.И., Соломенцев С.Л. Приближенный метод расчета температур по высоте воздухонагревателей // Изв. вузов. Черная металлургия. 1983. №11. С. 140-143.
 9. Рыженкова А.А., Кривцов А.Ю. Повышение эффективности работы блока доменных воздухонагревателей // Сб. мат. обл. науч.-техн. конф. Липецк: ЛГТУ, 2019. С. 168-171.
 10. Парсункин Б.Н., Андреев С.М., Ахметов У.Б. Оптимизация управления технологическими процессами в металлургии. Магнитогорск: МГТУ, 2009. 198 с.
 11. Перспективное экстремально-оптимизирующее автоматическое управление доменным процессом: учеб. пособие / Парсункин Б.Н., Андреев С.М., Бондарева А.Р., Самарина И.Г., Мухина Е.Ю. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2022. 284 с.
 12. Шкляр Ф.Р., Малкин В.М. Доменные воздухонагреватели (конструкция, теория, режимы работы). М.: Металлургия, 1982. 176 с.
 13. Поляков В.В. Ресурсосбережение в черной металлургии. М.: Машиностроение, 1993. 320 с.
 14. Шокул А.А., Лозовой В.П., Шаркевич Л.Д. Работа доменной печи с нагревом дутья до 1200-1380°C // Сталь. 1983. №3. С. 10-13.
 15. Планка Б. Повышение температуры дутья в доменных печах // Сталь. 1985. №6. С. 14-19.
 16. Рябчиков М. Ю. Совершенствование режимов работы блока доменных воздухонагревателей с целью повышения эффективности процесса нагрева дутья: дис. ... канд. техн. наук 05.16.02 / Рябчиков Михаил Юрьевич. Магнитогорск, 2005.
 17. Парсункин Б.Н., Рябчиков М.Ю., Андреев С.М. Автоматизация и оптимизация управления тепловым режимом работы блока воздухонагревателей доменной печи. Магнитогорск: МГТУ, 2009. 148 с.
 18. Бродюк В.Ю. Разработка и внедрение методов контроля и повышения эффективности функционирования доменного воздухонагревателя в условиях его длительной эксплуатации: дис. ... канд. техн. наук 05.16.02 / Бродюк Вячеслав Юрьевич. Липецк, 2001.
 19. Шацких Ю.В. Разработка и исследование методов повышения эффективности энергоиспользования в доменных воздухонагревателях: дис. ... канд. техн. наук 05.16.02 / Шацких Юлия Владимировна. Липецк, 2002.
 20. Кондратьев Г.И. Разработка и исследование комплексных методов повышения эффективности эксплуатации доменных воздухонагревателей: дис. ... канд. техн. наук 05.16.02 / Кондратьев Григорий Витальевич. Липецк, 2002.
 21. Кривцов А.Ю. Исследование и разработка методов повышения эффективности режимов работы доменных воздухонагревателей с учетом их индивидуальных теплотехнических характеристик: дис. ... канд. техн. наук 05.16.02 / Кривцов Алексей Юрьевич. Липецк, 2007.
 22. Бянкин И.Г. Исследование и оптимизация доменных воздухонагревателей с внутренней камерой: дис. ... канд. техн. наук 05.16.02 / Бянкин Иван Григорьевич. Липецк, 1991.
 23. Бянкин И.Г., Кривцов А.Ю., Коршиков В.Д. К вопросу оптимизации конструктивных, технологических и режимных параметров доменных воздухонагревателей // Современная металлургия нового тысячелетия: междунар. сб. науч. тр. Липецк: ЛГТУ, 2015. С. 289-293.
 24. Chen M., Zhang Y. The Multi-model Predictive Control Method Research on the Outlet Temperature Control of Hot-Blast Stove // Magnetic Resonance of Semiconductors and Their Nanostructures. 2020. Pp. 415-419. doi:10.1007/978-3-030-15235-2_62
 25. Yang Y., Zhao X., Liu X. A Novel Exhaust Gas Temperature Prediction Method of Hot Blast Stove // 39th Chinese Control Conference. IEEE, 2020. Pp. 5916-5921. doi:10.23919/CCC50068.2020.9189443
 26. Ding H.Q., Yang C.-J., Song Z.-H. Application of mathematical model of combustion input and output of hot blast stove // Iron and Steel. 2016. Vol. 51. Pp. 16-21. doi:10.13228/j.boyuan.issn0449-749x.20150423
 27. Zhang Q., Chen L., Zhao C. Numerical Simulation of Combustion and Air Supply Process and Optimal Design of Traditional Top Combustion Hot Blast Stoves // Steel research int. 2021. No. 92(2). 2000311. doi:10.1002/srin.202000311
 28. Using of Intelligence Analysis of Technological Parameters Database for Implementation of Control Subsystem of Hot Blast Stoves Block ACS / A. Koifman, O. Simkin, Y. Klimov, S. Scherbakov // Inf. Technol. Nanotechnol. 2021. Vol. 2864. Pp. 145-157. doi:10.32782/cm/2864-13
 29. Hot Stove Combustion Pattern Optimization / A. Fujii, N. Fujii, H. Miyazaki, M. Ito, M. Honda // Special Issue on Systems, Instrumentation, and Control Technologies. 2019. No. 121. Pp. 88-93.
 30. Yang Y., Zhao X., Liu X. A novel echo state network and its application in temperature prediction of exhaust gas from hot blast Stove // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2020. Vol. 69. Pp. 9465-9476. doi:10.1109/TIM.2020.3003975
 31. Novak V., Perfilieva I., Mockor J. Mathematical Principles of Fuzzy Logic. Kluwer Academic Publisher, 1999. 517 p.
 32. Алгоритм нечеткого управления для синтеза цифровых контуров автоматической стабилизации технологических параметров / Андреев С.М., Логунова О.С., Парсункин Б.Н., Полько П.Г., Рябчиков М.Ю., Рябчикова Е.С. // Автоматизация в промышленности. 2010. № 11. С. 32-37.
 33. Хаджинов А.С., Хаджинов Е.А., Тищенко В.А. Математическое моделирование тепловой работы доменного воздухонагревателя // Вестник Приазовского государственного технического университета. 2010. № 20. С. 154-159.
 34. Dadios E.P. Fuzzy Logic Algorithms. Techniques and Implementations. InTech, 2012. 294 p. doi: 10.5772/2663
 35. Prasolov A., Andreev S. Development of a Simulation Model of the Heat Transfer Process in the Hot-Blast Stove Checkerwork // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing. IEEE, 2022. Pp. 1134-1138. doi:10.1109/ICIEAM54945.2022.9787204

Поступила в редакцию 14 декабря 2022 г.

Принята к печати 10 января 2023 г.

INFORMATION IN ENGLISH

INTELLIGENT AUTOMATIC CORRECTION SYSTEM OF PERIOD DURATION FOR HOT BLAST STOVES TAKING INTO ACCOUNT THEIR REAL-LIFE STATE

Sergey M. Andreev

D.Sc. (Engineering), Associate Professor, Head of the Department, Automated Control Systems Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, andreev.asc@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0735-6723>

Aleksandr S. Prasolov

Postgraduate student, Automated Control Systems Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, aspr.88@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6191-1156>

Ivan S. Bondarev

Testing engineer, Compass Plus Ltd, Magnitogorsk, Russia, ivanbond1998@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0150-3024>

Nikolay V. Shvidchenko

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Department of Electronics and Microelectronics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, n.shvidchenko@magtu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3917-9218>

Changing the characteristics of the hot blast stoves in the unit makes it necessary to correct the mode maps. The implementation of such a correction is episodic, and often the very value of the correction of the operation time periods of the hot blast stove unit is determined from the empirical experience of the technologist and is based on assumptions about the real state of the hot blast stove without evaluating the "history" of its operation. Such an approach to control does not allow for continuous maintenance of maximum efficiency of the hot blast stove unit and leads to a decrease in blast productivity, which affects the economic performance of the blast furnace. The article considers a control system that performs a continuous analysis of the condition of the hot blast stoves in the unit and corrects the time of the blowing period for each stove. Evaluation of the capabilities of the hot blast stove unit is performed using a linguistic variable, for which two terms are formed - "weak" and "strong" hot blast stove, which determine the ability of the hot blast stove to heat the blast for a given cycle time. Using fuzzy logic methods, taking into account the characteristics of a "weak" hot blast stove at the end of each operation cycle, the value of the blowing period correction for the entire unit is formed. Thus, the system allows for continuous correction of the mode map taking into account the changing characteristics of the hot blast stoves in the unit. The conducted calculation experiment with models of hot blast stoves with different characteristics showed that the transition from the original mode card with the same time of blowing periods to the new mode card occurred in 15 full cycles of the unit or in 37.5 hours. At the same time, the average temperature of the blast increased by 32.8 °C, and the minimum temperature of the hot blast from the "weak" hot blast stoves increased by 133.6 °C.

Keywords: hot blast stove, fuzzy logic, mathematical model, heat transfer, mode map

REFERENCES

1. Yusfin Ju.S. Priority problems of sinter and blast furnace production. *Stal* [Steel in Translation], 1993, no. 4, pp. 4-9. (In Russian)
2. Zetterholm J., Ji X., Sundelin B., Martin P.M., Wang C. Model Development of a Blast Furnace Stove. *Energy Procedia*, 2015, no. 75, pp. 1758-1765. doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.454
3. Shkljar F.R., Sovetkin V.L., Trofimov N.I., Malkin V.M., Babushkin N.M., Kolodyazhnyy V.S. Optimization of thermal modes of hot blast stoves based on the economic criterion. *Izvestiya vuzov. Chernaja metallurgiya* [News of universities. Ferrous metallurgy], 1985, no. 8, pp. 113-115. (In Russian)
4. Solomentsev S.L., Sigmund V.K., Korshikov V.D., Basukinskiy S.M., Pukhov A.P. Simplified method for optimizing the operating modes of the hot blast stove unit *Stal* [Steel in Translation], 1986, no. 5, pp. 16-18. (In Russian)
5. Kondratyev G.V., Korshikova M.V. Improving the control efficiency of hot blast stove unit. *Sbornik nauchnykh trudov Rossijskoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii «Slavjanskije chtenija»* [Collection of scientific papers of the Russian Scientific and Technical Conference "Slavic Readings"]. Leningrad, 1999, pp. 87-90. (In Russian)
6. Onorin O.P., Spirin N.A., Terentyev B.L., Gileva L.Ju., Rybolovlev V.Ju., Kosachenko I.E., Lavrov V.V., Terentyev A.V. *Kompyuternye metody modelirovaniya domennogo protsessa*. [Computer methods of blast furnace process modeling]. Yekaterinburg, USTU Publ., 2005. 301 p. (In Russian)
7. Yaroshenko Ju.G., Shvydkij V.S., Spirin N.A., Matyuhin V.I., Lavrov V.V. *Teplofizicheskie osnovy teplovoj raboty metallurgicheskikh sloevykh pechej i agregatov* [Thermophysical fundamentals of thermal operation of metallurgical layer furnaces and aggregates]. Yekaterinburg, AMK «Den' RA» Publ., 2019. 464 p. (In Russian)
8. Menshikov R.I., Solomentsev S.L. Approximate method for calculating temperatures by height of hot blast stoves *Izvestiya vuzov. Chernaja metallurgiya* [Izvestiya. Ferrous Metallurgy], 1983, no.11, pp. 140-143. (In Russian)
9. Ryzhenkova A. A., Krivtsov A.Ju. Improving the efficiency of the hot blast stove unit. *Sbornik materialov oblastnoj nauchno-tehnicheskoy konferentsii*. [Collection of materials of the regional scientific and technical conference]. Lipetsk, LSTU Publ., 2019, pp. 168-171. (In Russian)
10. Parsunkin B.N., Andreev S.M., Ahmetov U.B. *Optimizacija upravlenija tehnologicheskimi processami v metallurgii* [Optimization of process control in metallurgy]. Magnitogorsk, NMSTU Publ., 2009. 198 p. (In Russian)
11. Parsunkin B.N., Andreev S.M., Bondareva A.R., Samarina I.G., Mukhina E.Ju. *Perspektivnoje ekstremalno – optimizirujushhee avtomaticheskoe upravlenie domennym processom* [Promising extremely optimizing automatic control of the blast furnace process]. Magnitogorsk, NMSTU Publ., 2022. 304 p. (In Russian)
12. Shkljar F.R., Malkin V.M. *Domennye vozduhonagrevateli (konstruktsija, teorija, rezhimy raboty)* [Hot blast stoves (design, theory, operating modes)]. Moscow, Metallurgy Publ., 1982. 176 p. (In Russian)
13. Polyakov V.V. *Resursosberezhenie v chernoj metallurgii* [Resource saving in ferrous metallurgy]. Moscow, Mechanical engineering Publ., 1993, 320 p. (In Russian)
14. Shokul A.A., Lozovoj V.P., Sharkevich L.D. Blast furnace operation with blast heating up to 1200-1380 °C. *Stal* [Steel in Translation], 1983, no. 3, pp. 10-13. (In Russian)
15. Planka B. Increase in blast temperature in blast furnaces. *Stal* [Steel in Translation], 1985, no. 6, pp. 14-19. (In Russian)
16. Ryabchikov M.Ju. *Sovershenstvovanie rezhimov raboty bloka domennykh vozduhonagrevatelej s celyu povyshenijaj effektivnosti processa nagreva dutya*. Kand. Diss. [Improving the operating modes of the hot blast stove unit in order to increase the efficiency of the blast heating process. Kand. Diss.]. Magnitogorsk, 2005. 194 p. (In Russian)
17. Parsunkin B.N., Ryabchikov M.Ju., Andreev S.M. *Avtomatizacija i optimizacija upravlenija teplovym rezhimom raboty bloka vozduhonagrevatelej domennoj pechi* [Automation and optimization of thermal mode control of the hot blast stove unit]. Magnitogorsk, NMSTU Publ., 2009. 148 p. (In Russian)
18. Brodjuk V.Ju. *Razrabotka i vnedrenie metodov kontrolja i povyshenijaj effektivnosti funkcionirovaniya domennogo vozduhonagrevatelja v uslovijah ego dlitelnoj ekspluatatsii*. Kand. Diss. [Development and implementation of methods

- for monitoring and improving the efficiency of the functioning of a hot blast stove in conditions of its long-term operation. Kand. Diss.]. Lipetsk, 2001. 154 p. (In Russian)
19. Shackih Ju.V. *Razrabotka i issledovanie metodov povyshenijaj effektivnosti energoispolzovaniya v domennyh vozduhonagrevateljah*. Kand. Diss. [Development and research of methods to improve the efficiency of energy use in hot blast stoves. Kand. Diss.]. Lipetsk, 2002. 164 p. (In Russian)
20. Kondratyev G.I. *Razrabotka i issledovanie kompleksnyh metodov povyshenija effektivnosti ekspluatatsii domennyh vozduhonagrevatelej*. Kand. Diss. [Development and research of complex methods to improve the efficiency of hot blast stove operation. Kand. Diss.]. Lipetsk, 2002. 162 p. (In Russian)
21. Krivtsov A. Ju. *Issledovanie i razrabotka metodov povyshenija effektivnosti rezhimov raboty domennyh vozduhonagrevatelej s uchetom ih individualnyh teplo-technicheskikh harakteristik*. Kand. Diss. [Research and development of methods for improving the efficiency of hot blast stoves, taking into account their individual thermal and technical characteristics. Kand. Diss.]. Lipetsk, 2007. 119 p. (In Russian)
22. Bjankin I.G. *Issledovanie i optimizacija domennyh vozduhonagrevatelej v vnutrennej kameroj*. Kand. Diss. [Research and optimization of hot blast stoves with an internal chamber. Kand. Diss.]. Lipetsk, 1991. 182 p. (In Russian)
23. Bjankin I.G., Krivtsov A.Ju., Korshikov V.D. On the issue of optimization of design, technological and operational parameters of hot blast stoves. *Sovremennaja metallurgija novogo tysjacheletija: Mezhdunarodnyj sbornik nauchnyh trudov* [An international collection of scientific papers "Modern metallurgy of the New Millennium"]. Lipetsk, LSTU Publ., 2015, pp. 289-293. (In Russian)
24. Chen M., Zhang Y. The Multi-model Predictive Control Method Research on the Outlet Temperature Control of Hot-Blast Stove. *Magnetic Resonance of Semiconductors and Their Nanostructures*. 2020, pp. 415-419. doi:10.1007/978-3-030-15235-2_62
25. Yang Y., Zhao X., Liu X. A Novel Exhaust Gas Temperature Prediction Method of Hot Blast Stove. 39th Chinese Control Conference. IEEE, 2020, pp. 5916-5921. doi:10.23919/CCC50068.2020.9189443
26. Ding H.Q., Yang C.-J., Song Z.-H. Application of mathematical model of combustion input and output of hot blast stove. *Iron and Steel*. 2016, vol. 51, pp. 16-21. doi:10.13228/j.boyuan.issn0449-749x.20150423
27. Zhang Q, Chen L., Zhao C. Numerical Simulation of Combustion and Air Supply Process and Optimal Design of Traditional Top Combustion Hot Blast Stoves. *Steel research int*. 2021, no. 92(2). doi:10.1002/srin.202000311
28. Koifman A., Simkin O., Klimov Y., Scherbakov S. Using of Intelligence Analysis of Technological Parameters Database for Implementation of Control Subsystem of Hot Blast Stoves Block ACS. *Inf. Technol. Nanotechnol*. 2021, vol. 2864, pp. 145-157. doi:10.32782/cmris/2864-13
29. Fujii A, Fujii N, Miyazaki H, Ito M, Honda M. Hot Stove Combustion Pattern Optimization. *Special Issue on Systems, Instrumentation, and Control Technologies*. 2019, no. 121, pp. 88-93.
30. Yang Y., Zhao X., Liu X. A novel echo state network and its application in temperature prediction of exhaust gas from hot blast stove. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2020, vol. 69, pp. 9465-9476. doi:10.1109/TIM.2020.3003975
31. Novak V., Perfilieva I., Mockor J. *Mathematical Principles of Fuzzy Logic*. Kluwer Academic Publisher, 1999. 517 p.
32. Andreev S.M., Logunova O.S., Parsunkin B.N., Polko P.G., Rjabchikov M.Ju., Rjabchikova E.S. Fuzzy control algorithm for synthesis of digital circuits for automatic stabilization of technological parameters. *Avtomatizacija v promyshlennosti* [Automation in industry], 2010, no. 11, pp. 32-37. (In Russian)
33. Hadzhinov A. S., Hadzhinov E. A., Tishhenko V. A. Mathematical modeling of the thermal operation of a hot blast stove. *Vestnik Priazovskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Azov State Technical University], 2010, no. 20, pp. 154-159. (In Russian)
34. Dadios E.P. Fuzzy Logic Algorithms. *Techniques and Implementations*. InTech Publ., 2012. 294 p.
35. Prasolov A., Andreev S. Development of a Simulation Model of the Heat Transfer Process in the Hot-Blast Stove Checkerwork. *International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing*. IEEE Publ., 2022, pp. 1134-1138. doi:10.1109/ICIEAM54945.2022.9787204

Интеллектуальная система автоматической коррекции длительности периодов для воздухонагревателей доменной печи с учетом их реального состояния / Андреев С.М., Прасолов А.С., Бондарев И.С., Швидченко Н.В. // *Электротехнические системы и комплексы*. 2023. № 1(58). С. 57-66. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-1\(58\)-57-66](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-1(58)-57-66)

Andreev S.M., Prasolov A.S., Bondarev I.S., Shvidchenko N.V. Intelligent Automatic Correction System of Period Duration for Hot Blast Stoves Taking into Account Their Real-Life State. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2023, no. 1(58), pp. 57-66. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-1\(58\)-57-66](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-1(58)-57-66)

¹АО «Санкт-Петербургское опытно-конструкторское бюро «Электроавтоматика» имени П.А. Ефимова»²Комсомольский-на-Амуре государственный университет

ПРИМЕР РЕАЛИЗАЦИИ СКАЛЯРНОГО УПРАВЛЕНИЯ С УПРОЩЁННОЙ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВЕКТОРНОЙ ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ НА ЯЗЫКЕ ОПИСАНИЯ АППАРАТУРЫ VERILOG

Для приложений с частотно-регулируемым электроприводом широко используется метод управления, основанный на векторной широтно-импульсной модуляции. Алгоритм модуляции в основном реализуется с помощью программного обеспечения на базе микроконтроллеров или цифровых сигнальных процессоров. Однако такие решения не всегда являются оптимальными вследствие ограниченного быстродействия программной реализации и трудностей масштабирования. В качестве альтернативного решения предложена реализация устройства управления преобразователем частоты регулируемого электропривода, выполненная на аппаратном уровне на основе программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС). Реализовано скалярное управление с упрощённой пространственно-векторной широтно-импульсной модуляцией. Благодаря гибкости использования ресурсов ПЛИС снимаются ограничения на возможности масштабирования производительности регулируемых электроприводов. Отдельные модули преобразователя частоты реализованы на языке описания аппаратных средств Verilog, что позволяет перенести рассмотренный подход на любую программируемую логику достаточной емкости. Используются методы цифровой обработки сигналов и показано их практическое применение в цифровых системах управления. Представленный подход позволил уменьшить затраты на проектирование, поскольку в нем не использовались вычисления тригонометрических функций в ПЛИС. Это стало возможным благодаря реализации простых синхронных схем, состоящих из блоков памяти и логики управления. Приведен практический пример разработки преобразователя частоты с упрощённой пространственно-векторной широтно-импульсной модуляцией. Реализация алгоритмов выполнена в бесплатной (ограниченной) интегрированной среде разработки Quartus Prime Lite Edition. Приведены экспериментальные осциллограммы выходных напряжений, полученные при тестировании проекта, загруженного в ПЛИС. Данная статья может быть практически полезной разработчикам коммерческих недорогих скалярных преобразователей частоты.

Ключевые слова: программируемая логическая интегральная схема, FPGA, широтно-импульсная модуляция, Verilog, Quartus Prime Lite Edition, UART, асинхронный двигатель, преобразователь частоты, язык описания аппаратуры, скалярное управление, ROM

ВВЕДЕНИЕ

Основой современного регулируемого электропривода являются электродвигатели переменного тока. Они управляются преобразователями частоты, обеспечивающими преобразование частоты напряжения питающей сети в переменное выходное напряжение другой частоты [1, 2]. Широкому использованию преобразователей частоты способствовало появление мощных силовых полностью управляемых полупроводниковых приборов, к которым относят транзисторы типа MOSFET и IGBT, а также современные запираемые тиристоры [3-5].

Одним из основных способов управления силовыми ключами является широтно-импульсная модуляция (ШИМ) [6-10]. При управлении автономным инвертором широко применяется метод пространственно-векторной широтно-импульсной модуляции [11-13]. Практическая реализация подобных методов требует использования цифровых контроллеров с достаточно высокими вычислительными ресурсами.

Для реализации алгоритмов управления преобразователями частоты используются цифровые сигнальные процессоры (DSP), быстродействующие микроконтроллеры общего применения и специально разработанные высокопроизводительные микроконтролле-

ры класса «Motion Control». Последние содержат встроенные специализированные модули ШИМ для управления трехфазными автономными инверторами напряжения и модули для работы с датчиками [14-16].

В то же время в работе [17] отмечены недостатки использования устройств, работающих под управлением программы, в регулируемых электроприводах. Такими недостатками являются ограниченные возможности производительности и масштабирования, а именно фиксированная память, негибкий канал ШИМ, ограниченный диапазон аналоговых сигналов, недостаточная поддержка многокоординатных систем.

Однако в настоящее время высокопроизводительные цифровые контроллеры возможно реализовать не только на микропроцессорных системах «программируемой логики», но и на системах «жесткой логики», обладающих более высоким быстродействием. Современной мощной и гибкой базой «жесткой логики» являются программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС). Основными производителями ПЛИС за рубежом являются компании Xilinx, Altera, Lattice. В России ПЛИС разрабатывают и производят компании НИИ МВС ЮФУ, ФГУП «НИИ «Квант», ИТМиВТ.

Применение современных технологий в проектировании систем управления преобразователями частоты позволяет отказаться от узла микроконтроллера как самостоятельного вычислительного блока. Это возможно, поскольку уже доступны технические решения

так называемых SoC-устройств (систем на кристалле), совмещающие микроконтроллерное ядро ARM и жесткую логику FPGA на одном чипе. В качестве примеров укажем линейку ПЛИС семейства Cyclone V от компании Altera и линейку ПЛИС семейства Zynq-7000S от компании Xilinx [18, 19].

Данные решения являются так называемыми «дорогими» решениями, поскольку в них возможно помимо логики развернуть и задействовать в ПЛИС интегрированный процессорный блок ARM. Зачастую такой подход применяют в высокопроизводительных встраиваемых устройствах с операционной системой Linux. Данная операционная система запускает приложения, написанные на разных языках программирования (например, Python, C++), и взаимодействует с блоками FPGA через специально разработанные для этого высокоскоростные шины, такие как AXI. Помимо аппаратного процессора (HPS) в некоторых моделях ПЛИС возможно реализовать программный процессор (Soft processor).

Сведения о реализации систем управления преобразователями частоты с применением ПЛИС в источниках информации скудны и зачастую имеют информативный характер. В то же время примеры реализации систем управления с применением RISC-микроконтроллеров общедоступны для ознакомления. Одно из интересных практических решений микроконтроллерной системы управления автономным инвертором с пространственно-векторной ШИМ приведено в работе [12]. Стоит отметить, что в алгоритме работы данной системы применяются специфические библиотеки и затратные по времени арифметические и тригонометрические вычисления. Это сужает использование предложенных принципов в системах на базе RISC-микроконтроллеров из-за ограниченного быстродействия программной реализации.

Применение ПЛИС решает проблему быстродействия, не требует использования вычислительных библиотек, а доступность дешевых отладочных плат позволяет быстро получить результат. Кроме того, отказ от программной реализации алгоритма и аппаратная реализация функций обработки сигнала предоставляют возможность организовать параллельную работу блоков. Это позволяет получить более помехозащищенные системы и предотвратить зависания управляющей программы. Этапы тестирования и верификации проекта избавляют от «фатальных» ошибок на ранних стадиях проектирования.

В данной работе на базе ПЛИС выполнен полностью аппаратный вариант реализации скалярного управления с упрощенной пространственно-векторной ШИМ. В качестве инструмента использован язык описания аппаратуры Verilog. Разработка выполнена в бесплатной версии программного обеспечения Quartus Prime Lite Edition.

ИНТЕРФЕЙСНЫЙ БЛОК УПРАВЛЕНИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ ЧАСТОТЫ

Интерфейсный блок управления содержит модуль чтения последовательного протокола UART (Universal asynchronous receiver/transmitter) и модуль ограничения выходной частоты преобразователя. Интерфейсный блок управления принимает команды задания частоты и преобразует их в выходные параллельные данные.

Экземпляр модуля **uart_rx** чтения последовательного протокола UART имеет следующий вид:

```
module uart_rx (
    input wire    clk,
    input wire    reset,
    input wire    uart_rxd,
    input wire    uart_rx_en,
    output wire   uart_rx_valid,
    output reg [PAYLOAD_BITS-1:0] uart_rx_data
);
```

Более подробно ознакомиться с описанием модуля **uart_rx** можно в репозитории авторов [20].

Вход *clk* служит для подачи системного тактового сигнала. По умолчанию частота тактового сигнала составляет 50 МГц. В случае изменения частоты сигнала тактирования требуется задать новую частоту в параметре *CLK_HZ* внутри модуля **uart_rx** [20].

Вход *reset* с активным низким уровнем отвечает за сброс модуля UART. Вход *uart_rxd* является портом чтения RX. Физически вход *uart_rxd* должен быть подключен к выходу TX передатчика. В качестве последнего может быть использован преобразователь USB-UART, подключенный к компьютеру или панели оператора. По умолчанию частота приема по интерфейсу UART установлена 9600 бит/с. Частота приема может быть перенастроена путем изменения параметра *BIT_RATE* внутри модуля **uart_rx** [20]. Вход *uart_rx_en* с активным высоким уровнем включает модуль в работу.

Выход *uart_rx_valid* является флагом готовности данных. Его можно использовать для синхронизации чтения принятых данных. Выход модуля *uart_rx_data* имеет разрядность 8-бит. Он подключен к выходному регистру полученных данных.

Синтезированная схема модуля **uart_rx** показана на **рис. 1**. На входы *reset*, *uart_rx_en* по умолчанию поданы логические «1».

При 8-битной передаче данных полученное значение должно быть больше 0x00, но меньше 0xFF. Требуется дополнительный модуль ограничения выходной частоты преобразователя, на входы которого поступают данные из модуля **uart_rx**. Описание модуля имеет вид:

```
always @ (posedge CLOCK_50)
begin
    if (rx_valid)
    begin
        if (RX_FreqSet == 0 || RX_FreqSet == 8'b11111111)
        begin
            FreqSet <= 0;
        end
        else
        begin
            FreqSet <= RX_FreqSet;
        end
    end
end
```

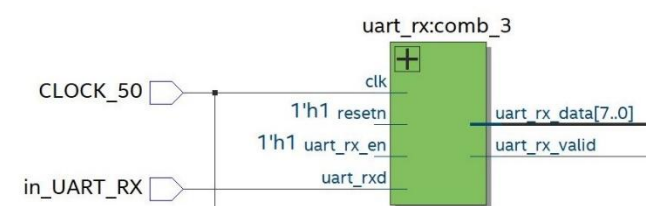


Рис. 1. Схема модуля **uart_rx** чтения протокола UART

Модуль синхронизирован по переднему фронту тактового генератора 50 МГц. В модуле сначала проверяется условие готовности данных на выходе *uart_rx_valid*. Если флаг *rx_valid* установлен, то проверяются условия равенства данных *uart_rx_data* с выхода модуля *uart_rx* значениям 0x00 или 0xFF. В случае выполнения одного из условий равенства в выходной регистр установки частоты *FreqSet* записывается 0x00, что устанавливает выходную частоту в 0 Гц. В противном случае в выходной регистр установки частоты *FreqSet* поступают данные с выхода *uart_rx_data*.

Синтезированная схема модуля ограничения выходной частоты преобразователя показана на рис. 2.

МОДУЛЬ ВЫБОРА ЧАСТОТЫ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Модуль ограничения выходной частоты преобразователя передает 8 бит информации о требуемом значении выходной частоты преобразователя, лежащем в пределах от 1 до 50 Гц, на вход модуля выбора частоты преобразователя **FreqControll**. Данный модуль должен удовлетворять следующим техническим требованиям:

- работать на основной частоте тактирования 50 МГц так же, как и остальные модули;
- считывать значения констант для счётчика, записанные в ПЗУ (ROM) по адресам от 0 до 49;
- формировать на выходе частоту для тактирования последующих узлов системы.

Описание модуля выбора частоты преобразователя приведено ниже:

```
module FreqControll (
    input clk,
    input [7:0] comp
    output outclk_dev
);
    reg [20:0] count = 0;
    wire [20:0] temp;
    reg [20:0] var = 0;
    reg [20:0] var_half = 0;

    single_port_rom_freq (.addr(comp),.clk(clk),.q(temp));

    always @(posedge clk)
    begin
        var <= temp;
        var_half <= temp >> 1;
    end
endmodule
```

```
count <= count + 1'b1;
if (count >= (var-1))
begin
```

```
    assign outclk_dev = (count == (var_half)) ?
    1'b0:1'b1;
endmodule
```

Разработанный модуль **FreqControll** имеет два входа и один выход. Вход *input clk* предназначен для подачи основной тактовой частоты 50 МГц. Вход *input comp* является входом требуемого значения частоты. На выходе *outclk_dev* формируется заданная частота для тактирования последующих модулей.

Из модуля **FreqControll** вызывается дополнительный модуль **single_port_rom_freq**, представляющий собой однопортовое ПЗУ (single port ROM) с записанными константами для счетчика. Данный вид памяти имеет один порт записи и чтения. Описание данного ПЗУ имеет вид:

```
module single_port_rom_freq
#(parameter DATA_WIDTH=21, parameter
ADDR_WIDTH=7)
(
    input [(ADDR_WIDTH-1):0] addr,
    input clk,
    output reg [(DATA_WIDTH-1):0] q
);
    reg [2**ADDR_WIDTH-1:0];
    initial
    begin
        $readmemb("rom_init_freq.txt", rom);
    end
    always @ (posedge clk)
    begin
        q <= rom[addr];
    end
endmodule
```

Модуль ПЗУ **single_port_rom_freq** является параметризуемым, благодаря чему ПЗУ становится универсальным и масштабируемым для различной «ширины» данных и адреса. В рассмотренном случае параметр *DATA_WIDTH* равен 21 биту, а параметр *ADDR_WIDTH* равен 7 бит.

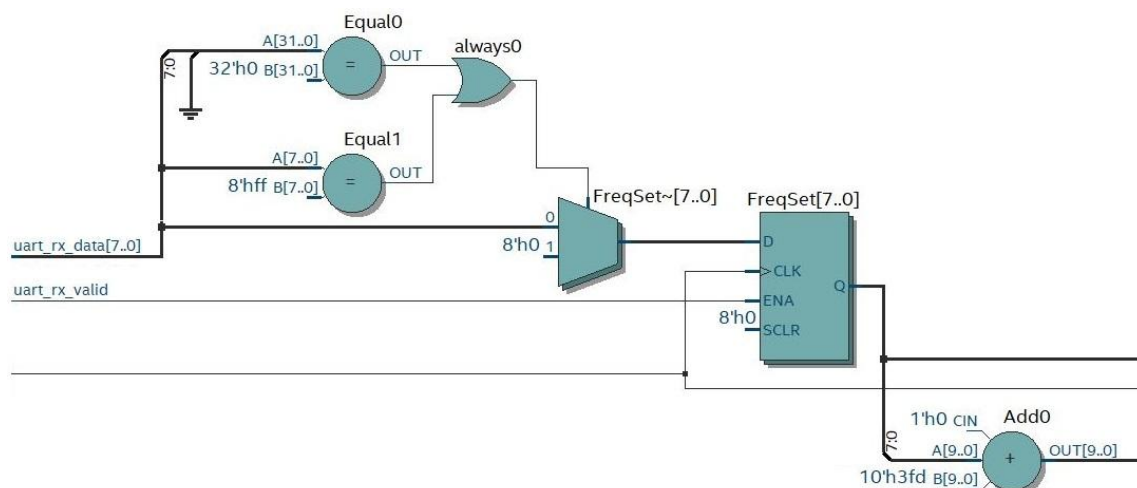


Рис. 2. Схема модуля ограничения выходной частоты преобразователя

Для конфигурации ПЗУ используется директива чтения из памяти *\$readmemb* ("rom_init_freq.txt", rom), где *rom_init_freq.txt* – текстовый файл с записанными в бинарном виде константами. Данные константы вычисляются по выражению

$$N = \frac{CLK}{f 2F_{50}}, \quad (1)$$

где *CLK* – основная частота тактирования системы 50 МГц; *f* – шаг изменения выходной частоты преобразователя от 1 до 50 Гц; *F₅₀* – частота 50 Гц, равная максимальной частоте преобразователя.

В табл. 1 приведен пример расчета констант для ПЗУ по выражению (1).

Чтение из ПЗУ синхронизируется главной тактовой частотой. Требуемое значение частоты *comp* из модуля **FreqControll** передается в модуль **single_port_rom_freq**, который возвращает соответствующую константу в переменную *temp*. Затем эта константа заносится в переменную *var*, а ее половинное значение – в переменную *var_half*. Переменная *count* инкрементируется, начиная с нуля, и в каждом цикле сравнивается со значением *var_half*. Если счетчик досчитал до половины, на выходе модуля *outclock_dev* формируется логический ноль, а в противном случае логическая единица. Таким образом формируется требуемая тактовая частота для тактирования последующих блоков системы. Скважность тактового сигнала на выходе *outclock_dev* составляет 0,5.

Синтезированная схема модуля **FreqControll** выбора частоты преобразователя показана на рис. 3. Из рис. 3 видно, что ПЗУ получает адрес с блока ограничения выходной частоты преобразователя, сам ПЗУ тактируется главной частотой 50 МГц и синхронно выдает данные на логику организации счетчика.

Таблица 1
Расчет констант выбора частоты с шагом 1 Гц

Адрес ПЗУ	Шаг, Гц	Константа N, dec	Константа N, bin
0	1	500000	1111010000100100000
1	2	250000	111101000010010000
2	3	166667	101000101100001011
.....			
49	50	10000	10011100010000

МОДУЛИ ФОРМИРОВАНИЯ СКАЛЯРНОГО УПРАВЛЕНИЯ С УПРОЩЕННОЙ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВЕКТОРНОЙ ШИМ

Существуют различные способы формирования ШИМ. В представленной работе использован несинусоидальный ШИМ, масштабируемый по амплитуде от 0 до 100 единиц с периодом, представленным 100 отсчетами. Так как система цифровая, она не может реализовать отрицательную полуволну сигнала, поэтому условный ноль будет соответствовать 50 единицам. Расчётные выражения для опорных сигналов фазных напряжений имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \sin A &= \left(\operatorname{Asin} \left(\frac{2\pi x}{N_{100}} \right) + 1 \right) \frac{N_{100}}{2} + \\ &+ \frac{1}{4} \left(\left(\operatorname{Asin} \left(3 \frac{2\pi x}{N_{100}} \right) + 1 \right) \frac{N_{100}}{2} \right); \\ \sin B &= \left(\operatorname{Asin} \left(\frac{2\pi x}{N_{100}} - \frac{120\pi}{180} \right) + 1 \right) \frac{N_{100}}{2} + \\ &+ \frac{1}{4} \left(\left(\operatorname{Asin} \left(3 \frac{2\pi x}{N_{100}} - 3 \frac{120\pi}{180} \right) + 1 \right) \frac{N_{100}}{2} \right); \\ \sin C &= \left(\operatorname{Asin} \left(\frac{2\pi x}{N_{100}} + \frac{120\pi}{180} \right) + 1 \right) \frac{N_{100}}{2} + \\ &+ \frac{1}{4} \left(\left(\operatorname{Asin} \left(3 \frac{2\pi x}{N_{100}} + 3 \frac{120\pi}{180} \right) + 1 \right) \frac{N_{100}}{2} \right), \end{aligned} \quad (2)$$

где *A* – амплитуда с заданным значением 1,13; *x* – номер отсчета в периоде, принимающий значения от 0 до 99 с шагом в 1; *N₁₀₀* – общее количество отсчетов, равное 100.

Известно, что при применении несинусоидальной ШИМ происходит недоиспользование напряжения звена постоянного тока примерно на 14%. Значение амплитуд синусоидальных сигналов выбрано равным *A*=1,13, чтобы «вписать» формируемые несинусоидальные опорные сигналы в окно с 100 отсчетами по амплитуде.

Графики опорных напряжений фаз, построенные по выражениям (2), имеют вид, приведенный на рис. 4.

Можно представить значения опорных фазных напряжений в табличной форме и записать полученные массивы в ПЗУ. Примеры расчетных значений фазных напряжений приведены в табл. 2–4.

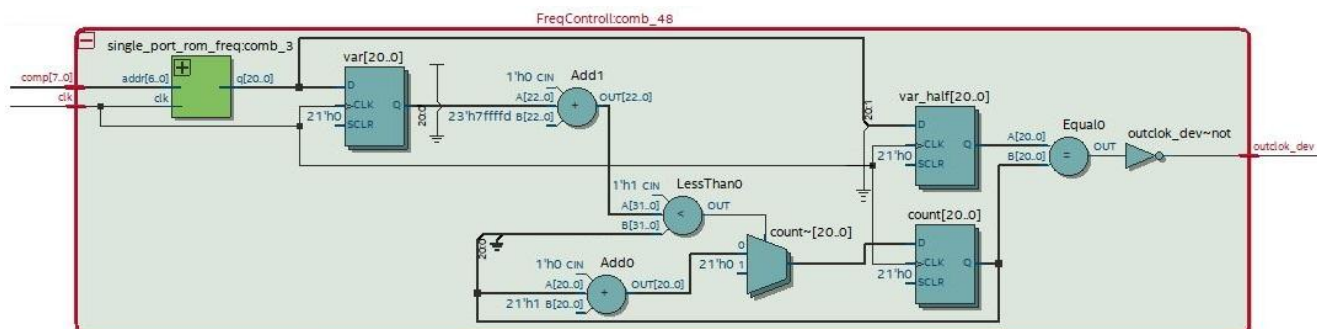


Рис. 3. Схема модуля FreqControll выбора частоты преобразователя

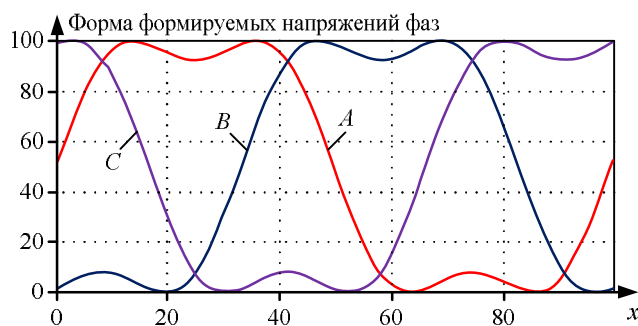


Рис. 4. Графики опорных несинусоидальных фазных напряжений: красная линия – фаза А, синяя линия – фаза В, фиолетовая линия – фаза С

Таблица 2
Расчетные значения фазного напряжения А

Адрес ПЗУ	Шаг, х	Константа N, dec	Константа N, bin
0	1	50	110010
1	2	56	111000
2	3	62	111110
.....			
99	100	50	110010

Таблица 3
Расчетные значения фазного напряжения В

Адрес ПЗУ	Шаг, х	Константа N, dec	Константа N, bin
0	1	1	000001
1	2	2	000010
2	3	3	000011
.....			
99	100	1	000001

Таблица 4
Расчетные значения фазного напряжения С

Адрес ПЗУ	Шаг, х	Константа N, dec	Константа N, bin
0	1	99	110010
1	2	100	110010
2	3	100	110010
.....			
99	100	99	110010

Полученные массивы значений должны быть записаны каждый в свое ПЗУ и синхронизированы с модулем выбора частоты преобразователя **FreqControll** по линии тактирования *outclock_dev*. Для выставления адреса требуется сформировать счетчик, считающий от 0 до 99. Выход счетчика должен быть подключен к адресным входам ПЗУ фазных напряжений. Данный счетчик реализован в модуле **ROMRead**:

```
module ROMRead #(parameter NumberPoint = 100) (
    output reg [(NumberPoint-1):0] q,
    input clk
);
reg [NumberPoint-1:0] count=0;
always @(posedge clk)
```

```
begin
```

```
    if (count >= (NumberPoint-1))
    begin
        count <= 0;
    end
```

```
    else
    begin
        count <= count + 1;
    end
```

```
q <= count;
end
endmodule
```

Приведенное поведенческое описание счетчика позволяет инкрементировать адрес ПЗУ от 0 до 99. Счетчик **ROMRead** параметризован. Изменить максимальное значение счета можно, задав новое значение параметра *NumberPoint*.

Описание ПЗУ для всех трех фаз одинаково, за исключением разных записанных значений фазного напряжения. Например, модуль описания ПЗУ для фазы А **single_port_rom_phase_A** имеет вид:

```
module single_port_rom_phase_A
    #(parameter DATA_WIDTH=8, parameter
    ADDR_WIDTH=8) (
    input [(ADDR_WIDTH-1):0] addr,
    input clk,
    output reg [(DATA_WIDTH-1):0] q
    );
    reg [DATA_WIDTH-1:0] rom[2**ADDR_WIDTH-1:0];
    initial
    begin
        $readmemb("rom_init_phase_A.txt", rom);
    end
    always @(posedge clk)
    begin
        q <= rom[addr];
    end
endmodule
```

Разрядности шины адреса и шины данных всех ПЗУ, формирующих отсчеты фаз, одинаковы и равны 8 бит. Все ПЗУ фаз тактируются сигналом с выхода модуля выбора частоты преобразователя **FreqControll**.

Для реализации принципа скалярного управления преобразователем частоты служит модуль **Voltage**:

```
module Voltage (
    input clk,
    input [6:0] PhaseA,
    input [6:0] PhaseB,
    input [6:0] PhaseC,
    input [6:0] Freq,
    output [6:0] outPhaseA,
    output [6:0] outPhaseB,
    output [6:0] outPhaseC
);
    reg [6:0] calcVlotagePhaseA = 0;
    reg [6:0] calcVlotagePhaseB = 0;
    reg [6:0] calcVlotagePhaseC = 0;
    reg [6:0] tempA = 0;
    reg [6:0] tempB = 0;
    reg [6:0] tempC = 0;
```

```

reg [6:0]tempFreq = 0;
always @(posedge clk)
begin
    tempA <= PhaseA;
    tempB <= PhaseB;
    tempC <= PhaseC;
    tempFreq <= Freq;
    calcVloltagePhaseA <= (tempA*tempFreq)/50;
    calcVloltagePhaseB <= (tempB*tempFreq)/50;
    calcVloltagePhaseC <= (tempC*tempFreq)/50;
end

```

```

assign outPhaseA = calcVloltagePhaseA;
assign outPhaseB = calcVloltagePhaseB;
assign outPhaseC = calcVloltagePhaseC;
endmodule

```

Синтезированная схема модуля **Voltage** скалярного управления преобразователем частоты показана на **рис. 5**. Объединение рассмотренных модулей в общую схему скалярного управления преобразователем частоты показано на **рис. 6**. По схеме можно проследить связи между модулями и их функциональное взаимодействие.

Оконечным является модуль ШИМ (**PWM**), предназначенный для формирования сигналов коммутации силовых транзисторных ключей трехфазного моста. В модуле **PWM** необходимо предусмотреть подмодуль временных задержек для защиты по «мертвому времени» от протекания сквозных токов через транзисторы. Непосредственно выходы с ПЛИС должны подключаться к драйверам ключей, которые обеспечивают усиление выходных сигналов по мощности. Например, могут быть использованы драйверы, предназначенные для управления SiC-транзисторами в полном мосту инвертора, описанные в работе [5].

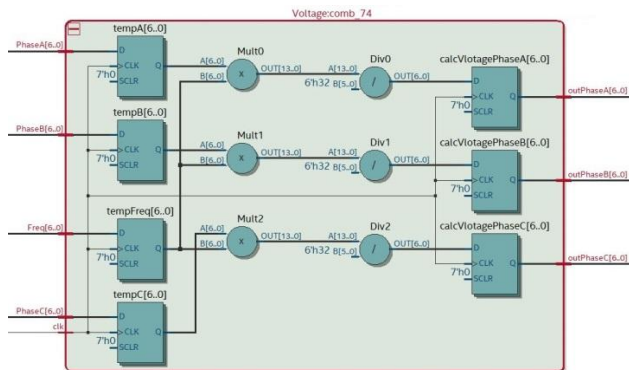


Рис. 5. Схема модуля **Voltage** скалярного управления преобразователем частоты

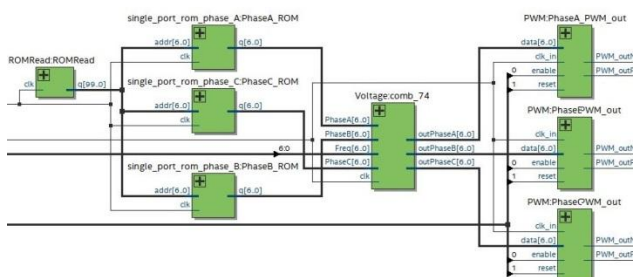


Рис. 6. Фрагмент общей схемы скалярного управления с пространственно-векторной ШИМ

Более подробно с практической реализацией модуля **PWM** на ПЛИС можно ознакомиться в репозитории авторов [20]. Схема модуля **PWM** с защитой по «мертвому времени» приведена на **рис. 7**.

Частота ШИМ сигнала 3 кГц. Из схемы видно, что в каждом канале ШИМ установлен подмодуль **delay_N_clock_shift_reg** для задания мертвого времени порядка 700 нс. Каналы реализации ШИМ идентичны за исключением входных значений каждой фазы. Вход **reset** сбрасывает работу модуля в первоначальное состояние. По входу **enable** возможна аппаратная блокировка модуля при аварии, например по сигналу от датчика тока. Пример описания подмодуля **delay_N_clock_shift_reg** для задания мертвого времени приведен ниже:

```

module delay_N_clock_shift_reg
#(parameter N=35) (
    input in, clk, reset,
    output out
);

```

```

    right_shift_register #(N(N)) (.MSB_in(in), .clk(clk),
    .reset(reset), .LSB_out(out));
endmodule

```

```

module right_shift_register
#(parameter N=4)(
    input MSB_in,
    input clk,reset,
    output reg [N-1:0] Data_out,
    output LSB_out
);
    assign LSB_out = Data_out[0];
    always @(posedge clk)
    begin
        if (~reset)
        begin
            Data_out <= 0;
        end
        else
        begin
            Data_out <= {MSB_in, Data_out[N-1:1]};
        end
    end
endmodule

```

Подмодуль задержки использует принцип сдвигового регистра. Он вносит задержку сигнала в рассмотренном случае на 35 тактов, которая соответствует 700 нс при тактовой частоте 50 МГц. Этого времени достаточно, чтобы исключить одновременное открытие двух транзисторов в стойке моста и предотвратить протекание «сквозных токов», которые приводят к аварийному режиму и выходу из строя преобразователя. Изменить «мертвое время» можно путем изменения параметра **N**.

На **рис. 8** приведена схема подмодуля задания «мертвого времени» **delay_N_clock_shift_reg** для одного канала.

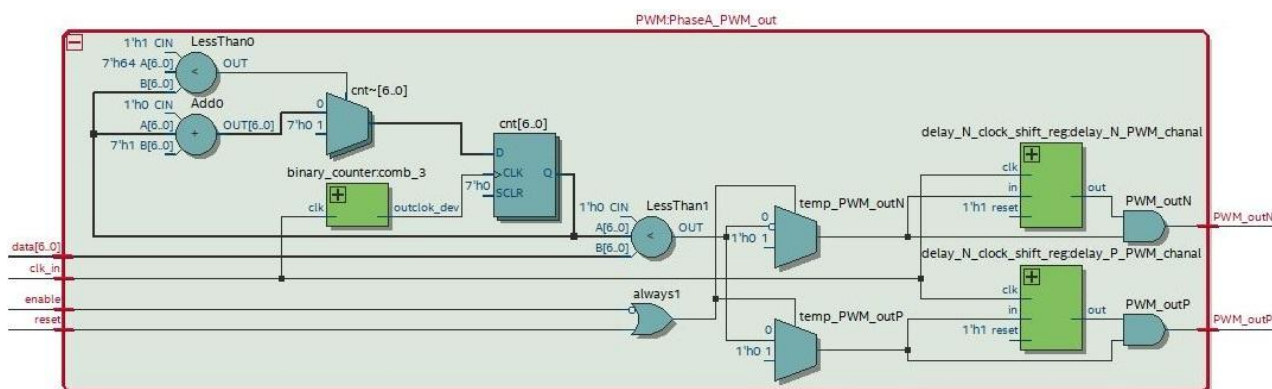


Рис. 7. Схема модуля PWM фазы А с защитой по «мертвому времени»

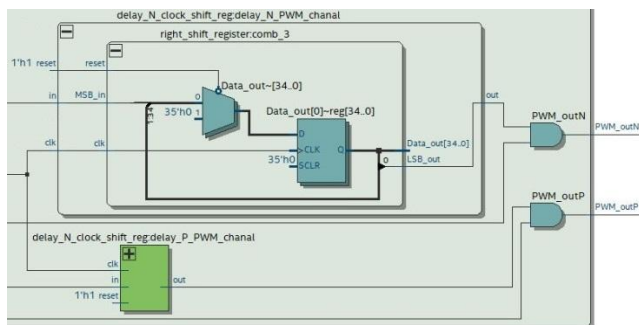


Рис. 8. Схема подмодуля задания «мертвого времени» delay_N_clock_shift_reg

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ СИНТЕЗИРОВАННОГО УПРАВЛЯЮЩЕГО УСТРОЙСТВА

Для тестирования разработанного управляющего устройства и оценки затрачиваемых ресурсов выполнено размещение проекта в ПЛИС EP4CE22F1C6 семейства Cyclone IVE компании Altera. Фрагмент окна инструмента Pin Planner среды Quartus с распределенными по физическим выводам микросхемы входами и выходами схемы приведен на рис. 9.

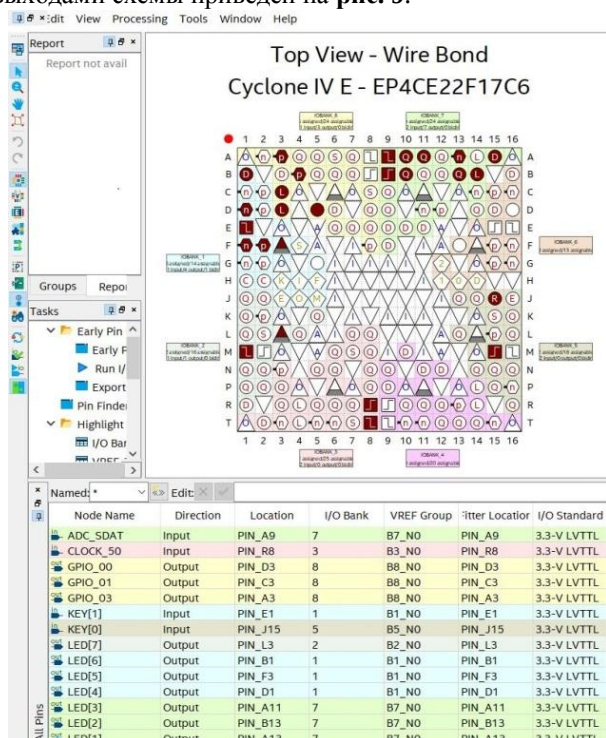


Рис. 9. Конфигурация входов и выходов в Pin Planner

На рис. 10 представлен отчет о занятых проектом ресурсах ПЛИС, полученный после заключительной компиляции. Отчет показывает, что общее количество использованных логических элементов составляет 10%, количество занятых входов/выходов – 16%, количество задействованных блоков памяти – 40%, также использовано 2% аппаратных блоков умножения.

Для тестирования работы проект был загружен в ПЛИС. Информация о заданной частоте передавалась на ПЛИС с помощью терминальной программы компьютера преобразователем USB-UART на базе драйвера PL2303.

В качестве тестов были переданы значения 0x32 и 0x21, соответствующие частотам 50 и 33 Гц. Полученные осциллограммы напряжений представлены на рис. 11 и 12. Выходы ШИМ были подключены напрямую к простейшим фильтрам низкой частоты, представляющим собой интегрирующие RC-цепи с параметрами $R = 5 \text{ кОм}$ и $C = 0,1 \text{ мкФ}$.

Полученные осциллограммы напряжений полностью удовлетворяют заявленному в работе способу скалярного управления преобразователем частоты и соответствуют теоретическим графикам напряжений, представленным на рис. 4.

Family	Cyclone IV E
Device	EP4CE22F17C6
Timing Models	Final
Total logic elements	2,166 / 22,320 (10 %)
Total registers	1173
Total pins	25 / 154 (16 %)
Total virtual pins	0
Total memory bits	240,454 / 608,256 (40 %)
Embedded Multiplier 9-bit elements	3 / 132 (2 %)
Total PLLs	0 / 4 (0 %)

Рис. 10. Занятые ресурсы ПЛИС



Рис. 11. Осциллограмма напряжения при частоте 50 Гц

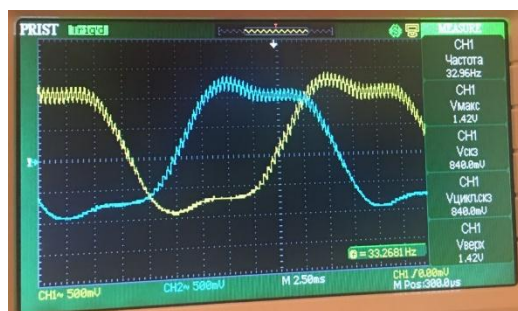


Рис. 12. Осциллограмма напряжения при частоте 33 Гц

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Приведены описания модулей системы управления преобразователя частоты с упрощённой пространственно-векторной ШИМ.
2. Показаны принципы и методы работы с цифровыми системами на базе ПЛИС.
3. Приведены аналитические выражения для расчета опорных сигналов фаз.
4. Получены осциллограммы напряжений выхода системы на базе ПЛИС.
5. Полученные результаты могут использоваться при построении скалярных преобразователей частоты без использования микроконтроллера для вычисления и формирования сигналов.
6. В перспективе все разработанные модули можно упаковать в IP-ядра и подключать к шинам управления в SoC.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Коптяев Е.Н. Двухканальный непосредственный преобразователь частоты // *Электричество*. 2018. № 3. С. 33-37. doi: 10.24160/0013-5380-2018-3-33-37.
2. Васильев Б.Ю., Добуш В.С. Эффективные алгоритмы управления полупроводниковыми преобразователями в асинхронных электроприводах // *Электричество*. 2014. № 4. С. 54-61.
3. Современные силовые полупроводниковые приборы для энергоэффективных технологий / А. Бормотов, А. Гришанин, В. Мартыненко, В. Мускутнев, В. Чибиркин // *Электроника: наука, технология, бизнес*. 2010. №4. С. 36-44.
4. Розанов Ю.К. Основные этапы развития и современное состояние силовой электроники // *Электричество*. 2005. №7. С. 52-61.
5. Ульянов А.В., Шибко Р.В. Применение SiC-транзисторов для построения силовых преобразовательных блоков // *Современные наукоемкие технологии*. 2021. № 8. С. 124-131. doi:10.17513/snt.38790
6. Ле Д.Т., Аверин С.В. Оптимизация алгоритмов коммутации в инверторах с векторной ШИМ // *Вестник Московского авиационного института*. 2016. Т. 23. № 3. С. 155-164.
7. Чаплыгин Е.Е., Хухтиков С.В. Способ управления автономным инвертором напряжения с векторной ШИМ // *Практическая силовая электроника*. 2010. № 39. С. 40-43.
8. Белоусов И.В., Самосейко В.Ф. Оптимальная двухфазная широтно-импульсная модуляция // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления*. 2018. № 28. С. 32-49.
9. Yu Z. Space-Vector PWM With TMS320C24x/F24x Using Hardware and Software Determined Switching Patterns // *Texas Instruments Application Report SPRA524*. 1999. Pp. 24-28.
10. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. М.: Академия, 2006. 272 с.
11. Виноградов А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока. Иваново: ИГЭУ, 2008. 298 с.
12. Егоров В.А., Егорова Ю.Г., Плотников Е.В. Микроконтроллерная система управления автономным инвертором с упрощённой пространственно-векторной широтно-импульсной модуляцией // *Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета*. 2020. № III-1 (43). С. 37-42.
13. Егоров В.А., Плотников Е.В. Микроконтроллерная система управления автономным инвертором с пространственно-векторной широтно-импульсной модуляцией // *Научно-технический вестник Поволжья*. 2020. № 4. С. 29-32.
14. Баховцев И.А. Микропроцессорные системы управления устройствами силовой электроники: структуры и алгоритмы. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2018. 219 с.
15. Отечественный микроконтроллер K1921BK01T для управления электродвигателями / А. Анучин, А. Жарков, В. Козаченко, М. Лашкевич, И. Потапов // *Электроника: наука, технология, бизнес*. 2016. № 1. С. 80-93.
16. Гусев С., Шумилин С., Калачев Ю. Специализированный микроконтроллер АО «ПКК Миландр» для реализации алгоритмов векторного управления электроприводами // *Электронные компоненты*. 2015. № 10. С. 84-87.
17. Вычужанин В. Методика проектирования оптимальных систем управления электродвигателями на ПЛИС // *Современная электроника*. 2011. № 7. С. 54-59.
18. СБИС программируемой логики семейства Cyclone V. URL: <http://altera.ru/sbis-pl-cyclone-v.html> (дата обращения 18.10.2022)
19. Семейство ПЛИС Zynq-7000 компании XILINX. URL: <https://fpga.su/vse-plis-fpga-xilinx/zynq-7000/> (дата обращения: 18.10.2022)
20. Веб-сервис для хостинга IT-проектов URL: https://github.com/AlexVUlyanov/FPGA/tree/main/3-Phase_induction%20motor_control (дата обращения: 18.10.2022)

Поступила в редакцию 25 декабря 2022 г.

Принята к печати 08 февраля 2023 г.

INFORMATION IN ENGLISH

SCALAR CONTROL IMPLEMENTATION WITH A SIMPLIFIED SPACE-VECTOR PULSE-WIDTH MODULATION IN THE DESCRIPTION LANGUAGE OF VERILOG DEVICE

Alexander V. Ulyanov

Ph.D. (Engineering), Chief specialist, Research-and-development Center, Efimov Experimental Design Office «Electrics», St. Petersburg, Russia, ulianov2@mail.ru, <https://orcid.org/0000-2548-9132>

Sergey M. Kopytov

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Department of Industrial Electronics, Komsomolsk-on-Amur State University, Komsomolsk-on-Amur, Russia, skopytov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7967-9460>

For variable frequency drive applications, a control method based on vector pulse width modulation is widely used. The modulation algorithm is mainly implemented using software based on microcontrollers or digital signal processors. However, such solutions are not always optimal due to the limited speed of the software implementation and scaling difficulties. As an alternative solution, an implementation of a scalar control device for a frequency converter of an adjustable electric drive is proposed, which is made at the hardware level based on a programmable logic integrated circuit (FPGA). The scalar control is implemented with a simplified space-vector pulse-width modulation. Thanks to the flexibility of using FPGA resources, restrictions on the ability to scale the performance of variable speed drives are removed. Individual modules of the frequency converter are implemented in the Verilog hardware description language, which makes it possible to transfer the considered approach to any programmable logic of sufficient capacity. Methods of digital signal processing are used and their practical application in digital control systems is shown. The presented approach made it possible to reduce the design costs since it did not use the calculation of trigonometric functions in the FPGA. This became possible due to the implementation of simple synchronous circuits consisting of memory blocks and control logic. A practical example of the frequency converter development with a simplified space-vector PWM is given. The algorithms are implemented in the free (limited) integrated development environment Quartus Prime Lite Edition. Experimental oscillograms of output voltages obtained during testing of the project loaded into the FPGA are presented. This article can be practically useful for developers of commercial inexpensive scalar frequency converters.

Keywords: programmable logic integrated circuit, FPGA, PWM, Verilog, Quartus Prime Lite Edition, UART, asynchronous motor, frequency converter, hardware description language, scalar control, ROM

REFERENCES

- Koptyaev E.N. A Two-Channel Direct Frequency Converter. *Elektrichestvo* [Elektrichestvo], 2018, no. 3, pp. 33-37. doi: 10.24160/0013-5380-2018-3-33-37. (In Russian)
- Vasilyev B.Yu., Dobush V.S. Efficient Algorithms for Control of Semiconductor Inverters in Asynchronous Electric Drives. *Elektrichestvo* [Elektrichestvo], 2014, no. 4, pp. 56-61. (In Russian)
- Bormotov A., Grishanin A., Martinenko V., Mushtin'ev V., Tchibirkin V. Modern Semiconductor Devices for Energy Efficient Technologies. *Elektronika: nauka, tekhnologiya, biznes* [Electronics: Science, Technology, Business], 2010, no. 4, pp. 36-44. (In Russian)
- Rozanov Yu.K. The main stages of development and the current state of power electronics. *Elektrichestvo* [Elektrichestvo], 2005, no. 7, pp. 52-61. (In Russian)
- Ulyanov A.V., Shibeko R.V. Application of sic-transistors for construction of power converter blocks. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii*. [Modern high technologies], 2021, no. 8, pp. 124-131. doi:10.17513/snt.38790. (In Russian)
- Le D.T., Averin S.V. Switching algorithms optimization for vector pulse-width modulation inverters. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*. [Aerospace MAI Journal], 2016, vol. 23, no. 3, pp. 155-164. (In Russian)
- Chaplygin E.E., Khukhtikov S.V. Control Method For Self-Commutated Voltage Inverter With Vector PWM. *Prakticheskaya silovaya elektronika*. [Practical power electronics], 2010, no. 39, pp. 40-43. (In Russian)
- Belousov I.V., Samoseiko V.F. Optimal two-phase pulse-width modulation. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniya*. [PNRPU Bulletin. Electrotechnics, Informational Technologies, Control Systems], 2018, no. 28, pp. 32-49. (In Russian)
- Yu Z. Space-Vector PWM With TMS320C24x/F24x Using Hardware and Software Determined Switching Patterns. Texas Instruments Application Report SPRA524. 1999. Pp. 24-28.
- Sokolovskiy G.G. *Elektroprivody peremennogo toka s chastotnym regulirovaniem*. [AC drives with frequency control]. Moscow, Akademiya Publ., 2006. 272 p. (In Russian)
- Vinogradov A.B. *Vektornoe upravlenie elektroprirodami peremennogo toka*. [Vector control of AC drives]. Ivanovo, ISPU Publ., 2008. 298 p. (In Russian)
- Egorov V.A., Egorova Yu.G., Plotnikov E.V. Microcontroller operating system of autonomous inverter with simplified space-vector latitude-pulse modulation. *Uchenye zapiski Komsomolskogo-na-Amure gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Scholarly Notes of Komsomolsk-na-Amure State Technical University], 2020, vol. 43, no. III-1, pp. 37-42. (In Russian)
- Egorov V.A., Plotnikov E.V. Microcontroller control system of autonomous inverter with space-vector width-pulse modulation. *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik Povolzhya* [Scientific and Technical Volga region Bulletin], 2020, no. 4, pp. 29-32. (In Russian)
- Bakhovtsev I.A. *Mikroprotsessornyye sistemy upravleniya ustroystvami silovoy elektroniki: struktury i algoritmy*. [Microprocessor control systems for power electronics devices: structures and algorithms]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2018. 219 p. (In Russian)
- Anuchin A., Zharkov A., Kozachenko V., Lashkevich M., Potapov I. Domestic microcontroller K1921VK01T for controlling electric motors. *Elektronika: nauka, tekhnologiya, biznes*. [Electronics: Science, Technology, Business], 2016, no. 1, pp. 80-93. (In Russian)
- Gusev S., Shumilin S., Kalachev Yu. Specialized microcontroller JSC "PKK Milandr" for the implementation of vector control algorithms for electric drives. *Elektronnye komponenty* [Electronic components], 2015, no. 10, pp. 84-87. (In Russian)
- Vychuzhanin V. Design of PLA Based Optimal Control Systems for Electric Motors. *Sovremennaya elektronika*. [Modern electronics], 2011, no. 7, pp. 54-59. (In Russian)
- SBIS *programmiruemyy logiki semeystva Cyclone V* (VLSI of programmable logic of the Cyclone V family). Available at: <http://altera.ru/sbis-pl-cyclone-v.html> (accessed 18 November 2022)
- Semeystvo PLIS Zynq-7000 kompanii XILINX* (Zynq-7000 FPGA family from XILINX). Available at: <https://fpga.su/vse-plis-fpga-xilinx/zynq-7000/> (accessed 18 November 2022)
- Veb-servis dlya khostinga IT-proektov* (Web service for hosting IT projects). Available at: https://github.com/AlexVUlyanov/FPGA/tree/main/3-Phase_induction%20motor_control (accessed 18 November 2022)
- Ulyanov A.V., Kopytov S.M. Scalar Control Implementation with a Simplified Space-Vector Pulse-Width Modulation in the Description Language of Verilog Device. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2023, no. 1(58), pp. 67-75. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-1\(58\)-67-75](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-1(58)-67-75)

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ДАТЧИКОВ ТОКА ДЛЯ ЗАЩИТЫ ИСТОЧНИКА РЕГУЛИРУЕМОГО НАПРЯЖЕНИЯ РЕЗОНАНСНОЙ ИСПЫТАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

При разработке источника для плавного регулирования подаваемого напряжения в первичную цепь резонансного контура высокопотенциального испытательного трансформатора стоит задача защитить источник от ненормальных режимов работы и производить непрерывное измерение тока, а также исследовать и разработать схему защиты регулируемого источника переменного напряжения с непрерывным измерением выходного тока нагрузки, не превышающей $\pm 5\%$. Произведен обзор и технический анализ существующих на рынке датчиков, производители которых используют различные принципы измерения. Особое внимание уделено схемам на основе датчиков Холла замкнутого и разомкнутого типа с целью измерения и защиты регулируемого источника однофазного переменного напряжения от ненормальных режимов работы. При решении поставленной задачи авторами предложено разработать и исследовать датчики тока мировых производителей полупроводниковых приборов и на их основе с целью импортозамещения разработать датчик тока, который может соответствовать или даже превосходить аналогичные устройства по техническим характеристикам. В ходе исследования разработан датчик тока типа ДТ-РС-1,0А, позволяющий производить измерение выходного тока регулируемого источника переменного напряжения в пределах среднего значения основной приведенной погрешности не более 1,26 %. Применение разработанного решения измерения выходного тока регулируемого источника переменного напряжения с целью непрерывного мониторинга и защиты от превышения заданных уставок позволит на его базе создавать ряд цифровых измерительных амперметров, позволяющих производить измерение и контроль переменного тока в диапазоне от 1 до 1000 мА. Проведена оценка тепловых режимов работы при рабочем токе с целью обнаружения локальных источников повышенного теплового излучения и выявления картины распределения температур.

Ключевые слова: регулируемый источник переменного напряжения, широтно-импульсная модуляция, испытание изоляции, повышенное напряжение, высоковольтная испытательная установка, испытуемый объект, резонанс

ВВЕДЕНИЕ

Для проведения высоковольтных испытаний на переменном токе промышленной частоты 50 Гц, сверхнизких частотах от 0,01 до 0,1 Гц, выпрямленном напряжении различных форм и полярностей, согласно нормам, установленным в научно-технической документации на конкретное оборудование, в большинстве случаев требуется плавный подъем испытательного напряжения на испытуемом объекте [1, 2]. Существуют различные схмотехнические решения получения высокого испытательного напряжения [3-7]. Однако все они основываются на плавном регулировании напряжения сети с последующим подключением звена, которое усиливает напряжение до требуемого испытательного.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В настоящее время в электроэнергетике, электронике и радиотехнике в качестве плавного регулируемого источника однофазного переменного напряжения промышленной частоты 50 Гц мощностью до 5 кВА используется электромеханический лабораторный автотрансформатор (ЛАТР). Также существуют стабилизаторы напряжения на основе электромеханического ЛАТРа с электроприводным управлением для плавного регулирования напряжения [8-10]. Кроме того, применяются релейные и тиристорные схмотехнические решения [11, 12]. В данных устройствах для реализации возможности плавного регулирования требуется

изменение программного режима работы. Это связано с тем, что они применяются для стабилизации выходного напряжения. В ряде случаев регулирование и вовсе осуществляется ступенчато [13, 14].

В связи с этим авторами разработано устройство регулируемого источника однофазного переменного напряжения с встроенным регулируемым генератором широтно-импульсной модуляции (ШИМ) синусоидальной формы с трехступенчатой системой преобразования напряжения (тока) (AC/DC-DC/AC) [15, 16]. Данное экспериментальное устройство используется для плавного регулирования однофазного переменного напряжения промышленной частоты 50 Гц в первичной цепи резонансного контура высоковольтной испытательной установки. Это устройство позволяет плавно регулировать выходное напряжение источника путем вращения энкодера шагом от 1 В. Разработанное устройство источника переменного напряжения используется в качестве испытуемого объекта для исследования датчиков тока [17]. Структурная схема разработанного устройства регулируемого источника однофазного переменного напряжения представлена на рис. 1.

При работе регулируемого источника однофазного переменного напряжения могут возникнуть ненормальные режимы работы, связанные с выходом из строя внутренних компонентов устройства или изменениями режимов работы нагрузки, такие как перегрузка и короткое замыкание. Защита от импульсных токов в данной статье не рассматривается, так как в данном устройстве она будет исследована и реализована в блоке «DC-DC» (блок 3) и к ней предъявляются

другие требования. Под каждую из вышеперечисленных видов защит требуется оптимальный выбор элементной базы и разработка программного обеспечения для реализации защит, поэтому становится актуальной задачей исследовать готовые решения датчиков тока и на их основе разработать аналогичное устройство.

Фильтр (блок 1) используется для подавления помех, генерируемых корректором мощности и инвертором. Выпрямитель (блок 2) служит для получения выпрямленного напряжения из переменного напряжения сети промышленной частоты 50 Гц. Корректор мощности (блок 3) предназначен для коррекции коэффициента мощности в непрерывном режиме работы на частоте 100 кГц с контролем среднего тока через дроссель. Инвертор биполярной модуляции (блок 4) предназначен для преобразования постоянного тока в переменный с изменением амплитуды выходного напряжения. В качестве блока 5 для исследования рассматриваются датчики Холла замкнутого и разомкнутого типа. Также для исследования рассматривается схемотехническое решение на основе измерительного шунта, операционного усилителя, прецизионных чип-резисторов и источника опорного напряжения. Выходной ток инвертора, протекающий через датчик тока к нагрузке, преобразуется в пропорциональный сигнал напряжения. Этот сигнал напряжения подается на канал аналого-цифрового преобразователя (АЦП). АЦП выполнен на основе 8-битного микроконтроллера PIC10F206 производителя «Microchip Technology Inc» с разрешением 256 единиц уровней. Блок 6 производит настройку внутреннего тактового генератора. Далее происходит запись нулей в регистр и конфигурирование аналого-цифрового преобразователя. После этого происходит настройка ШИМ и определение конца преобразования. На следующем этапе генерируется «флаг» окончания периода измерения с последующей передачей сигнала от модуля в режиме ШИМ на вывод микроконтроллера (блок 6), настроенного на выход. В конце производится передача на устройство обработки 7. Контролер (блок 6) обрабатывает, согласно заложенной функции на отключение, информирование или осциллографирование аварии. Кроме того, контроллер производит все необходимые операции.

В настоящее время во многих отраслях промышленности, включая низковольтное и высоковольтное оборудование, для измерения электрического тока широко используется различное множество датчиков тока. С целью измерения тока используются различные методы измерения на основе фундаментальных физических принципов: шунтирующий резистор в составе с изолирующим усилителем, датчики тока с сердечником и без сердечника, датчик Холла, датчики волоконно-оптические, датчики на эффекте Фарадея и т.д. Все методы измерения должны соответствовать техническим регламентам на конкретное проектируемое устройство, в которых определены различные требования, такие как ток потребления, быстродействие, помехозащищенность, чувствительность, компенсация дрейфа и т.д.

В табл. 1 представлены наиболее распространенные датчики тока, выпускаемые отечественной и зарубежной промышленностью. Приведем краткое описание основных доступных датчиков тока. Модуль для измерения тока на основе эффекта Холла типа KCZ-20 бренда *KernelChip* (Россия). В паспорте отсутствуют заводские зависимости выходного напряжения от тока, протекающего согласно заявленным характеристикам, описания принципа работы магнитного гистерезиса, компенсации низкого смещения и шумов работы и т.д.

Датчик тока типа CJMCU-219 на чипе INA219 производства Texas Instruments (США). Основной модуль состоит из токоизмерительной части на основе *smd*-резистора и 12-битного АЦП с 4096 уровней квантования. Датчик тока типа AS-100 производства *Talema* (Китай) на основе трансформатора тока для монтажа на печатную плату в закрытом корпусе используется как элемент обратной связи с токовой развязкой.

Токовая микросхема AMC3301 производства Texas Instruments (США) – это прецизионный изолированный усилитель с полностью интегрированным изолированным преобразователем постоянного тока в постоянный, который обеспечивает работу с однополярным питанием на стороне низкого напряжения устройства.

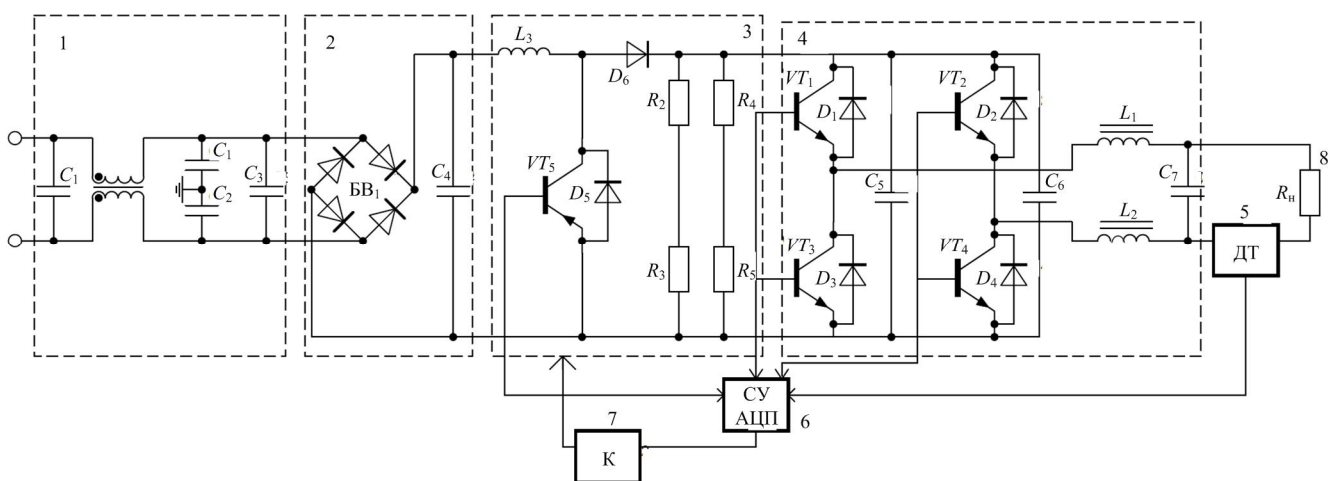


Рис. 1. Структурная схема регулируемого источника однофазного переменного напряжения: 1 – фильтр; 2 – выпрямитель; 3 – корректор мощности; 4 – инвертор биполярной модуляции; 5 – датчик тока (ДТ); 6 – АЦП контроллера №1; 7 – контроллер №2; 8 – нагрузочный блок

Таблица 1

Обзор датчиков тока

Тип	Принцип работы	Фирма производителя	Страна производства	Диапазон измерения, А	Рабочий диапазон, °С	Наличие АЦП/разрядность	Быстродействие, мкс
KCZ-20	Эффект Холла	KernelChip	РФ	от -20 до 20	-20 – +85	Отсутствует/-	–
CJMCU-219	Шунтирующий резистор	Texas Instruments	США	от - 3,2 до 3,2	-25 – +85	Есть/12 бит	–
AS-100	Трансформатор тока	Talema	Германия	до 15	-40 – +120	Отсутствует/-	–
AMC3301	Шунтирующий резистор	Texas Instruments	США	Расчетный	-40 – +125	Отсутствует/-	–
ACS712	Эффект Холла	Allegro	Китай	от -5 до 5	-40 – +125	Отсутствует/-	5
CSLW	Эффект Холла	Honeywell	США	от -1 до 1	-25 – +100	Отсутствует/-	3

Модулей, датчиков и микросхем измерения тока на сегодняшний день огромное количество, они разрабатываются для конкретных схемных решений. С целью исследования датчиков тока подробно в статье рассмотрим датчики Холла двух разновидностей – разомкнутого и замкнутого типа двух мировых производителей.

Датчик Холла замкнутого типа

Рассмотрим полностью интегрированный датчик тока типа ACS712 компании Allegro® MicroSystems на основе эффекта Холла. Этот датчик применяется для измерения постоянного и переменного тока вместо токовых шунтов, прецизионных резисторов, схем на основе операционных усилителей, микросхем на основе изоляторов напряжения, трансформаторов тока [18, 19]. К основным областям применения относятся управление двигателем, обнаружение и управление нагрузкой, импульсные источники питания, зарядные станции, схемы защиты по току и др. Данный датчик сертифицирован по стандартам ГОСТ IEC 60950-1-2014 и стандарту CAN/CSA C22.2 No. 60950-1:2003 [20, 21].

Устройство состоит из точного линейного датчика Холла с малым смещением. В качестве проводника, по которому протекает измеряемый ток, используется расположенная на поверхности кристалла медь. Протекающий по проводнику ток создаёт магнитное поле. Это магнитное поле воздействует на встроенную интегральную микросхему Холла и преобразует его в пропорциональный сигнал напряжения. Точность датчика обеспечивается за счет близкого расположения датчика Холла к магнитному полю. Точное пропорциональное напряжение обеспечивается низким смещением по КМОП-технологии на одном кристалле. Основные технические характеристики представлены в табл. 2.

Авторами разработана и реализована схема на основе датчика Холла замкнутого типа для исследования датчика тока с целью измерения и защиты регулируемого источника однофазного переменного напряжения от ненормальных режимов работы. Определены зависимости выходного напряжения на выходе измерительного датчика от тока при плавном изменении нагрузки от 0 до 1000 мА. Выполнено сравнение полученных практических данных в ходе эксперимента с заводскими и построен график, представленный на рис. 2. По полученным практическим данным и результатам заводских испытаний данного датчика среднее значение погрешности составляет 1,01 %.

Таблица 2

Характеристики датчика тока типа ACS712

Напряжение питания, В	Ток потребления, мА	Рабочий диапазон, °С	Быстродействие, мкс	Стоимость, руб.
4,5–5,5	6–11	-40–+85	5	1500

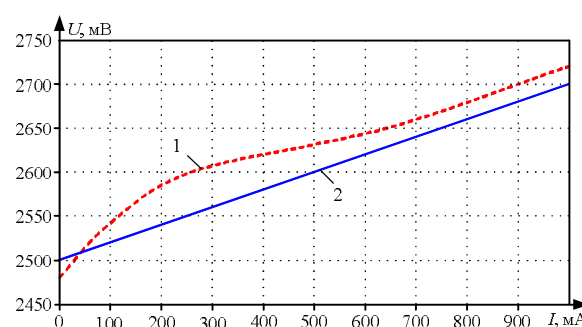


Рис. 2. Результаты практических и заводских данных датчика тока серии ACS712. График зависимости практических данных, описывающий отношение выходного напряжения с датчика к току на образцовом приборе при 20°С (1) и при 25°С (2)

Датчик Холла разомкнутого типа

Рассмотрим миниатюрный датчик измерения переменного, постоянного и импульсного токов серии CSLW разомкнутого типа компании Honeywell's на основе линейного датчика Холла типа SS490. Датчик представляет собой готовое устройство, которое состоит из магнитного сердечника, каркаса, с расчетным количеством витков, чувствительного элемента на основе Холла и усилительного звена, который создает выходное напряжение, линейно связанное с амплитудой и фазой приложенного к нему магнитного поля [22–24]. Данный датчик сертифицирован по стандартам ГОСТ IEC 60950-1-2014 и стандарту CAN/CSA C22.2 No. 60950-1:2003 [20, 21]. Основные технические характеристики представлены в табл. 3.

Разработана и реализована схема на основе датчика Холла разомкнутого типа для исследования датчика тока с целью измерения и защиты регулируемого источника однофазного переменного напряжения от ненормальных режимов работы. Авторами определены зависимости выходного напряжения на выходе измерительного датчика от тока при плавном изменении нагрузки от 0 до 1000 мА. Выполнено сравнение полученных практических данных в ходе эксперимента с заводскими и построен график, представленный на рис. 3. По полученным практическим данным и результатам заводских испытаний данного датчика среднее значение погрешности составляет 1,94%.

Таблица 3
 Характеристики датчика тока серии CSLW

Напряжение питания, В	Ток потребления, мА	Рабочий диапазон, °C	Быстродействие, мкс	Стоимость, руб.
4,5–10,5	7–9	–25–+100	3	5010

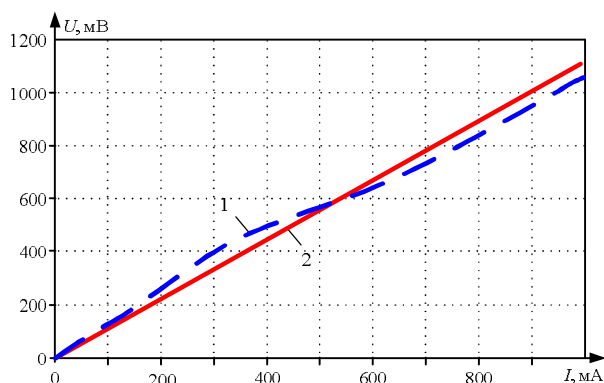
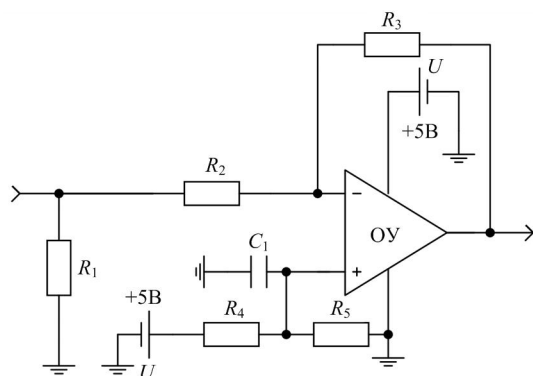


Рис. 3. Результаты практических и заводских данных датчика тока серии CSLW. График зависимости практических данных, описывающий отношение выходного напряжения с датчика к току на образцовом приборе при 20°C (1) и при 25°C (2)

Датчик типа ДТ-РС-1,0А

Изучена схема измерения и защиты на основе датчика тока типа ДТ-РС-1,0А. Данная схема состоит из измерительного шунта из манганина, характеризующегося чрезвычайно малым изменением электрического сопротивления в области рабочих температур, операционного усилителя типа К1446УД5ВН4, чип-резисторов постоянных неперывочных прецизионных маломощных Р1-8П, источника опорного напряжения [25, 26]. Схема датчика собрана из компонентов отечественного производства. Упрощенная структурная схема представлена на рис. 4. Измерительный шунт R_1 включен в разрыв цепи. При протекании тока создается падение напряжения, пропорциональное проходящему через него току. Падающее на шунте дифференциальное напряжение подается на усилительное звено. Дифференциальное напряжение преобразуется в повышенное выходное напряжение. Коэффициент усиления схемы принят пяти, чтобы использовать полный диапазон измерений АЦП контролера 6 (см. рис. 1) и преобразовать усиленное напряжения в цифровое представление.


 Рис. 4. Упрощенная схема датчика тока ДТ-РС-1,0А: R_1 – измерительный шунт; $R_2 \dots R_5$ – прецизионные резисторы; ОУ – операционный усилитель; U – источник опорного напряжения; C_1 – фильтр

Разработаны схемы (см. рис. 1 и 4) для исследования датчика тока с целью измерения и защиты регулируемого источника однофазного переменного напряжения от ненормальных режимов работы. Авторами определены зависимости выходного напряжения на выходе измерительного датчика от тока при плавном изменении нагрузки от 0 до 1000 мА. По полученным практическим данным в ходе эксперимента получен график зависимости. Данный график отображает отношение выходного напряжения с датчика к току на образцовом приборе «Ресурс-UFM2» (рис. 5).

Основные технические характеристики разработанного датчика тока представлены в табл. 4. Выходной сигнал с датчиков тока ACS712, CSLW и ДТ-РС-1,0А поочередно подключили к АЦП микроконтроллера 6 (см. рис. 1), выполнили отладку программного кода, вывели измеренное среднее квадратическое значение переменного тока на дисплей для наглядности и произвели измерения тока в диапазоне от 1 до 1000 мА. Правильность измеренного значения выходного тока сравним с показаниями измерительного комплекса «Ресурс-UFM2». Экспериментальные данные представлены в табл. 5.

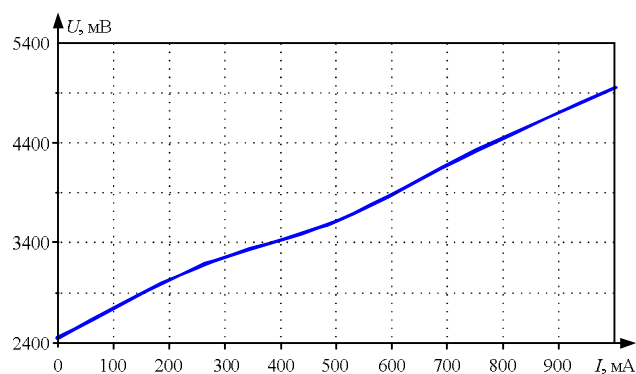


Рис. 5. Результаты практических исследований датчика тока типа ДТ-РС-1,0А

 Таблица 4
 Характеристики датчика тока типа ДТ-РС-1,0А

Напряжение питания, В	Ток потребления, мА	Рабочий диапазон, °C	Быстродействие, мкс	Стоимость, руб.
5	4,5	–40–+125	5	1050

 Таблица 5
 Результаты экспериментов

Параметры	Датчик тока ACS712		Датчик тока CSLW		Датчик тока ДТ-РС-1,0А	
Ток на образцовом приборе, мА	Ток измеренный, мА	Основная приведенная погрешность, %	Ток измеренный, мА	Основная приведенная погрешность, %	Ток измеренный, мА	Основная приведенная погрешность, %
50	49,5	0,05	50,1	0,06	52,2	0,21
250	255,1	0,51	249,8	0,53	248,2	0,16
500	495,2	0,48	501,2	0,60	507,1	0,59
750	768,5	1,85	760,2	0,83	788,1	2,79
1000	1015,2	1,52	997,1	1,81	1022,4	2,53

Среднее значение основной приведенной погрешности датчика тока ACS712 составляет 0,88%. Низкая погрешность обусловлена схемотехническим решением данного датчика, а именно уменьшением напряжения смещения датчика Холла и алгоритма компенсации дрейфа выходного сигнала на основе метода модуляции и демодуляции сигнала при изменении термической нагрузки. Датчик невосприимчив к токовым перегрузкам и готов с высокой точностью производить измерение в начальной области.

Среднее значение основной приведенной погрешности датчика тока CSLW составляет 0,77%. Низкая погрешность обусловлена введением в схему измерения датчика температурную компенсацию на всем диапазоне измерения.

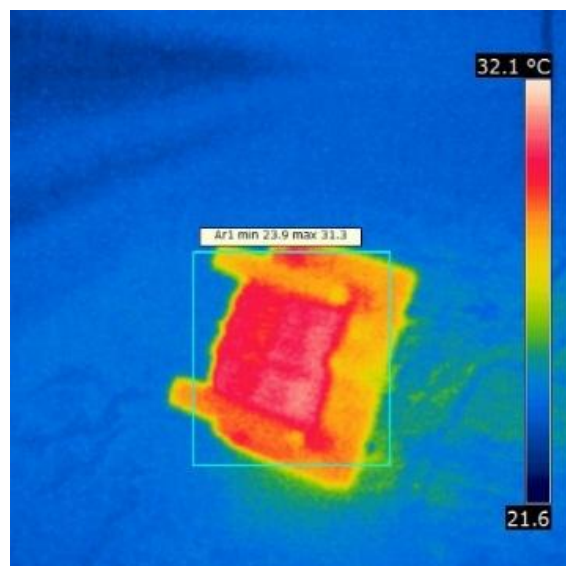
Среднее значение основной приведенной погрешности датчика тока ДТ-РС-1,0А составляет 1,26%. Низкая погрешность обусловлена разделением датчика тока на две составляющие, это токоизмерительная часть и преобразующая, а также использованием в конструкции датчика прецизионные компоненты отечественного производителя.

Для датчиков тока ACS712, CSLW и ДТ-РС-1,0А установим максимальный ток нагрузки 1000 мА и проведем термографический контроль прибором Flir i60 для оценки тепловых режимов работы с целью обнаружения локальных источников повышенного теплового излучения и выявления картины распределения температуры для правильной компоновки элементов на монтажной плате. Результаты термографического контроля представлены на **рис. 6**.

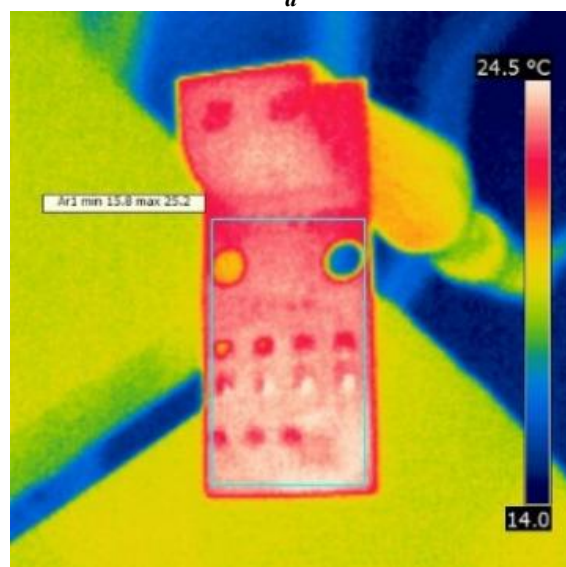
Установлено из данных термографического контроля, что при продолжительном режиме протекания тока в 1000 мА через датчики тока ACS712, CSLW и ДТ-РС-1,0А превышение температуры над окружающей средой 11,3, 5,2 и 3,1°C соответственно. Это приемлемо для использования в измерительных системах.

По результатам исследования создан макетный образец датчика тока ДТ-РС-1,0А в комплексе с регулируемым источником однофазного переменного напряжения, представленный на **рис. 7**. Макетный образец включает в себя монтажную плату, на которой расположен фильтр высокой частоты (блок 1), выпрямитель (блок 2), корректор мощности (блок 3), инвертор биполярной модуляции (блок 4), датчик тока ДТ-РС-1,0А (блок 5).

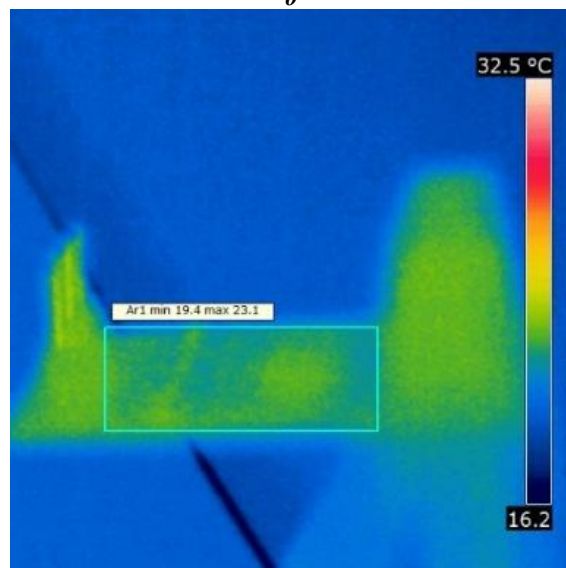
Разработанный макетный образец позволяет исследовать ненормальные режимы работы регулируемого источника однофазного переменного напряжения, такие как короткое замыкание и перегруз номинального тока. Защита от короткого замыкания и перегруза отключит силовые транзисторы инвертора биполярной модуляции путем блокировки управляющих сигналов.



а



б



в

Рис. 6. Результаты термографического контроля:
а – датчик тока ACS712; б – датчик тока CSLW;
в – датчик тока ДТ-РС-1,0А

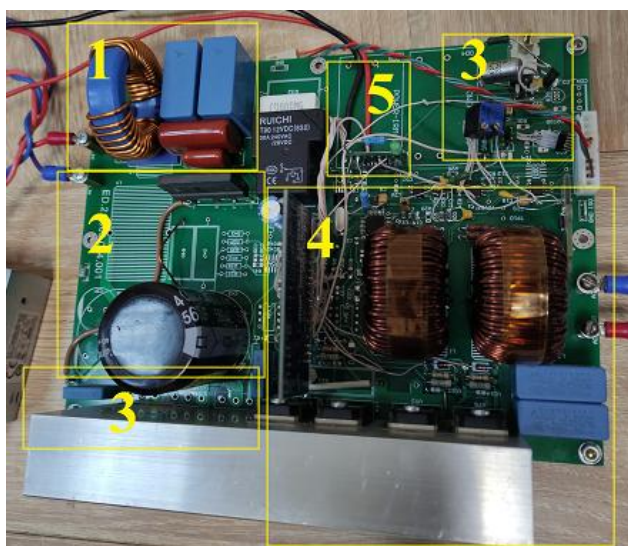


Рис. 7. Фотоизображение макетного образца датчика тока ДТ-РС-1,0А в комплексе с регулируемым источником однофазного переменного напряжения

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выполнен обзор датчиков для измерения среднеквадратичного значения выходного тока инвертора в пределах приведенной погрешности не более $\pm 5\%$. Среди исследуемых датчиков для измерения среднеквадратичного значения выходного тока регулируемого источника однофазного переменного напряжения средней мощности был выбран датчик тока ДТ-РС-1,0А, который обладает следующими преимуществами: низкой стоимостью, широким диапазоном рабочей температуры и низким потреблением электроэнергии.

2. Применение разработанного датчика тока ДТ-РС-1,0А в комплексе с АЦП и микроконтроллером для измерения и защиты регулируемого источника однофазного переменного напряжения средней мощности позволяет производить вычисление среднеквадратичного значения переменного сигнала в реальном масштабе времени и, следовательно, оперативно контролировать ток для постоянного мониторинга.

3. Разработанный датчик тока ДТ-РС-1,0А позволяет производить измерение тока нагрузки в пределах от 1 до 1000 мА. Внедрение данного образца позволит на его базе создавать ряд цифровых измерительных миллиамперметров, позволяющих производить измерение тока в преобразовательных устройствах средней мощности.

Таким образом, в результате научных исследований было разработано и исследовано схемотехническое решение датчика тока на основе компонентов отечественного производства, который соответствует аналогичным устройствам по техническим характеристикам.

Работа выполнена при финансовой поддержке стипендии Президента Российской Федерации для молодых учёных-кандидатов наук СП-1132.2022.1.

Список источников

- ГОСТ 1516.2-97. Межгосударственный стандарт. Электрооборудование и электроустановки переменного тока на напряжение 3 кВ и выше. Общие методы испытаний электрической прочности изоляции. М.: Стандартинформ, 1997. 35 с.

- ГОСТ Р 55194-2012. Национальный стандарт Российской Федерации. Электрооборудование и электроустановки переменного тока на напряжение от 1 до 750 кВ. Общие методы испытаний электрической прочности изоляции. М.: Стандартинформ, 2012. 57 с.
- Корявин А.Р., Волкова О.В., Милкин Е.А. Современные проблемы отечественной стандартизации испытательных напряжений и методов испытаний электрооборудования высокого напряжения // *Электричество*. 2013. №7. С. 30-35.
- Монастырский А.Е. Методы испытаний и диагностики кабельных линий с изоляцией из СПЭ // *Электрооборудование: эксплуатация и ремонт*. 2019. № 10. С. 43-47.
- Тутаринов А.С., Романенко Н.Г. Математическое моделирование влияния внешних факторов на характеристики кабельной линии // *Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: управление, вычислительная техника и информатика*. 2018. №4. С. 107-116. doi: 10.24143/2072-9502-2018-4-107-116
- Калинин И.М., Савченко О.В., Хмель М.Ю. Испытания, проверки и диагностическое обеспечение судовых силовых трансформаторов среднего напряжения // *Труды Крыловского государственного научного центра*. 2022. №2(400). С. 103-115. doi: 10.24937/2542-2324-2022-2-400-103-115
- Шонин Ю.П. Оценка технологического состояния силовых масляных трансформаторов. Ч. 2 // *Библиотечка электротехника*. 2020. № 1-2(253). С. 1-94.
- Асташов А.Г., Леонов В.М. Стабилизаторы напряжения для тяговых подстанций // *Автоматика, связь, информатика*. 2018. № 2. С. 26-27.
- Терентьев П.В., Кораблев А.А., Чесноков М.В. Исследование стабилизаторов напряжения как потребителей и преобразователей электрической энергии // *Наука и образование*. 2019. №4. С. 301.
- Математическое описание переходных процессов в преобразователях и стабилизаторах напряжения систем автономного электроснабжения / В.Я. Хорольский, А.В. Ефанов, С.Н. Антонов, Е.Е. Привалов // *Электротехника*. 2021. № 47. С. 58-61.
- Гурецкий Ю.В., Яшин М.Г. Защита электропотребителей аппаратуры железнодорожной автоматики и телемеханики от опасных воздействий гармонических искажений питающего напряжения // *Специальная техника и технологии транспорта*. 2021. № 10. С. 139-146.
- Ионисторный сетевой стабилизатор напряжения: особенности работы и основные характеристики / О.Е. Глухова, М.М. Слепченко, Т.А. Пухарева, Д.А. Колосов // *Радиотехника*. 2019. №8(12). С. 109-114. doi: 10.18127/j00338486-201908(12)-17
- Малолушяцкий стабилизатор напряжения постоянного тока на базе источника опорного напряжения широкого применения / С.Н. Бондарь, Е.А. Вахтина, С.В. Мишуков, Е.Е. Константинова // *Электротехника*. 2021. №7. С. 37-42.
- Захаров Л.Ф. Импульсный стабилизатор напряжения с широкими пределами изменения входного напряжения // *Электросвязь*. 2018. №11. С. 81-82.
- Хазиева Р.Т., Мухаметшин А.В. Разработка и исследование схемы измерения тока утечки при испытании изоляции повышенным выпрямленным напряжением // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2021. №4. С. 145-155. doi: 10.30724/1998-9903-2021-23-4-145-155
- Мартынов Б.А., Хазиева Р.Т., Мухаметшин А.В. Защита схемы измерения тока резонансной испытательной установки // *Электротехнические и информационные комплексы и системы*. 2021. №2. С. 26-40. doi: 10.17122/1999-5458-2021-17-2-26-40
- Хазиева Р.Т., Васильев П.И., Афлятунов Р.Р. Исследования

- ние установки для испытания изоляции электрооборудования повышенным напряжением // Электротехнические системы и комплексы. 2022. №3(56). С. 65-69. doi: 10.18503/2311-8318-2022-3(56)-65-69
18. Рентюк В. TLI4971 – новый датчик компании Infineon: точное и надежное измерение тока // Компоненты и технологии. 2020. № 1(222). С. 18-22.
 19. Сухов Д.В., Шевцов Д. А., Шишов Д.М. Трансформаторный датчик тока на основе резистивно-индуктивного мультивибратора // Практическая силовая электроника. 2021. №2(82). С. 34-38.
 20. ГОСТ ИЕС 60950-1-2014. Межгосударственный стандарт. Оборудование информационных технологий. Требования безопасности. Ч. 1. Общие требования. М.: Стандартинформ, 2014. 239 с.
 21. CSA CAN/CSA-C22.2 NO. 60950-21-03. Оборудование для информационных технологий. Безопасность. Ч. 21. CSA, 2003. 8 с.
 22. Потехин С.П., Балашевич В.М., Коптяев Е.Н. Датчик тока утечки для систем контроля сопротивления изоляции // Научно-технические ведомости Севмашвуза. 2021. №1. С. 4-12.
 23. Руденко Е.А., Яковлева А.С. Датчик холла - незаметный и незаменимый помощник в современной технике // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке: тр. всерос.науч.-практ. конф. Творческой молодежи. В 2-х т. Хабаровск, 2020. Т.1. С. 144-147.
 24. Лебедев В.А. Датчик сварочного тока // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2018. №9. С. 52-56.
 25. Резистивный датчик тока / К.И. Никитин, А.Ю. Власов, Н.А. Терещенко, С.С. Маковецкий, В.П. Марковский // Актуальные вопросы энергетики. 2019. №1. С. 88-92.
 26. Потехин С.П., Балашевич В.М., Коптяев Е.Н. Датчик тока утечки для систем контроля сопротивления изоляции // Научно-технические ведомости Севмашвуза. 2021. №1. С. 4-12.

Поступила в редакцию 11 января 2023 г.

Принята к печати 11 февраля 2023 г.

INFORMATION IN ENGLISH

DEVELOPMENT AND RESEARCH OF CURRENT SENSORS TO PROTECT THE SUPPLY OF ADJUSTABLE VOLTAGE OF A RESONANT TEST DEVICE

Regina T. Khazieva

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Department of Industrial Electrical Engineering and Electrical Equipment, Ufa State Oil Technical University, Ufa, Russia, khazievert@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7075-0363>

Zuhra Kh. Pavlova

D.Sc. (Engineering), Associate Professor, Department Professor, Institute Director, Department of Industrial Electrical Engineering and Electrical Equipment, Institute of Digital Systems, Automation and Power Engineering, Ufa State Oil Technical University, Ufa, Russia, zpavlova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4767-972X>

Aleksey A. Serdyuk

Manufacturing Director, Engineering Research Centre «Resonance Systems» Ltd, Ufa, Russia, serdiukaa@ed-electro.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9259-5122>

Andrey V. Mukhametshin

Associate Professor, Department of Electrical Engineering and Electrotechnics affiliated with the Department of Industrial Electrical Engineering and Electrical Equipment, Ufa State Oil Technical University, Ufa, Russia, mukhametshinav@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5098-6483>

When developing a source for smooth regulation of the voltage supplied to the primary circuit of the resonant circuit of a high-potential test transformer, the task is to protect the source from abnormal operating modes and to continuously measure the current, as well as to research and develop a protection circuit for an adjustable AC voltage source with continuous measurement of the output current load not exceeding $\pm 5\%$. In solving the problem, the authors proposed to develop and investigate current sensors of world manufacturers of semiconductor devices and, on their basis, for the purpose of import substitution, develop a current sensor that can meet or even exceed similar devices in terms of technical characteristics. In the course of the study, a current sensor of the DT-RS-1.0A type was developed, which makes it possible to measure the output current of an adjustable AC voltage source within the average value of the main reduced error of 1.26%. The use of the developed solution for measuring the output current of an adjustable AC voltage source for the purpose of continuous monitoring and protection against exceeding the specified settings will allow creating on its basis a number of digital measuring ammeters that allow measuring and controlling alternating current in the range from 1 mA to 1000 mA.

Keywords: adjustable AC voltage source, pulse-width modulation, insulation test, overvoltage, high-voltage test setup, test object, resonance.

REFERENCES

1. State Standard 1516.2-97. Electrical equipment and installations for a.c. voltages 3 kV and higher. Moscow, STANDARTINFORM Publ., 1997. 35 p. (In Russian)
2. State Standard R 55194-2012. Electrical equipment and installation for a.c. voltages from 1 to 750 kV. General methods of dielectric tests. Moscow, STANDARTINFORM Publ., 2012. 57 p. (In Russian)
3. Koryavin A.R., Volkova O.V., Milkin E.A. Modern problems of domestic standardization of test voltages and test methods for high voltage electrical equipment. *Elektrichestvo* [Electrichestvo], 2013, no. 7, pp. 30-35. (Russian)
4. Monastyrsky A.E. Test methods and diagnostics of cable lines with XLPE insulation. *Elektrooborudovanie: ekspluatatsia i remont* [Electrical equipment: operation and repair], 2019, no. 10, pp. 43-47. (In Russian)
5. Tutarinov A.S., Romanenko N.G. Mathematical modeling of the influence of external factors on characteristics of cable line. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta], 2021, no. 1, pp. 1-5. (Russian)

- eskogo universiteta. Seriya: upravleniye, vychislitelnaya tekhnika i informatika* [Bulletin of Astrakhan state technical university. Series: management, computer science and informatics], 2018, no. 4, pp. 107-116. doi: 10.24143/2072-9502-2018-4-107-116 (In Russian)
6. Kalinin I.M., Savchenko O.V., Khmel Yu. Tests, checks and diagnostics of ship medium voltage transformers. *Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra* [Proceedings of the Krylov state research centre], 2022, no. 2(400), pp. 103-115. doi: 10.24937/2542-2324-2022-2-400-103-115 (In Russian)
 7. Shonin Yu. P. Technical evaluation of power oil transformers. *Bibliotekha elektrotekhnika* [Library for an electrical engineer], 2020, no. 1-2(253), pp. 1-94. (In Russian)
 8. Astashov A.G., Leonov V.M. Voltage regulators for traction substations. *Avtomatika, svyaz, informatika* [Automation, communication, informatics], 2018, no. 2, pp. 26-27. (In Russian)
 9. Terentiev P.V., Korablev A.A., Chesnokov M.V. Research of voltage stabilizers as consumers and converters of electrical energy. *Nauka i obrazovanie* [Science and Education], 2019, no. 4, p. 301. (In Russian)
 10. Khorolsky V.Ya., Efanov A.V., Antonov S.N., Privalov E.E. Mathematical description of transient processes in converters and voltage stabilizers of standalone power-supply systems. *Elektrotekhnika* [Electrical engineering], 2021, no. 47, pp. 58-61. (In Russian)
 11. Guretsky Yu.V., Yashin M.G. Protection of electrical consumers of railway automation and telemechanics equipment from hazardous effects of harmonic distortions of the supply voltage. *Spetsialnaya tekhnika i tehnologii transporta*. [Special Technique and Transport Technologies], 2021, no. 10, pp. 139-146. (In Russian)
 12. Glukhova O.E., Slepchenkov M.M., Pukhareva T.A., Kolosov D.A. Ionistor Ac Voltage Regulator: Features Of Work And Main Characteristics. *Radiotekhnika* [Radio-engineering], 2019, no. 8(12), pp. 109-114. doi: 10.18127/j00338486-201908(12)-17 (In Russian)
 13. Bondar S.N., Vakhtina E.A., Mishukov S.V., Konstantinova E.E. A low-noise dc voltage stabilizer based on a general-purpose reference voltage source. *Elektrotekhnika* [Russian Electrical Engineering], 2021, no. 7, pp. 37-42. (In Russian)
 14. Zakharov L.F. Pulse voltage stabilizer with wide input voltage change limits. *Electrosvyaz* [Electrical communication], 2018, no. 11, pp. 81-82. (In Russian)
 15. Khazieva R.T., Mukhametshin A.N. Development and research of the circuit for measuring the leakage current when testing the insulation with the higher rectified voltage. *Izvestiya vysshykh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki* [Power engineering: research, equipment, technology], 2021, no. 4, pp. 145-155. doi: 10.30724/1998-9903-2021-23-4-145-155 (In Russian)
 16. Martynov B.A., Khazieva R.T., Mukhametshin A.N. Protection of the current measuring circuit of a resonance testing installation. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy* [Electrical and data processing facilities and systems], 2021, no. 2, pp. 26-40. doi: 10.17122/1999-5458-2021-17-2-26-40 (In Russian)
 17. Khazieva R.T., Vasilyev P.I., Aflyatunov R.R. Installation for testing insulation of electrical equipment with increased voltage. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electro-technical systems and complexes], 2022, no. 3(56), pp. 65-69. doi: 10.18503/2311-8318-2022-3(56)-65-69 (In Russian)
 18. Rentyuk V. TLI4971 - Infineon new sensor: accurate and reliable current measurement. *Komponenty i tehnologii* [Components and technologies], 2020, no. 1(222), pp. 18-22. (In Russian)
 19. Sukhov D.V., Shevtsov D.A., Shishov D.M. Transformer current sensor based on resistance-inductance multivibrator. *Prakticheskaya silovaya elektronika* [Practical power electronics], 2021, no. 2(82), pp. 34-38. (In Russian)
 20. State Standard IEC 60950-1-2014. Information technology equipment. Safety. Part 1. General requirements, STANDARTINFORM Publ., 2014. 239 p. (In Russian)
 21. CSA CAN/CSA-C22.2 NO. 60065:03 Audio, video and similar electronic apparatus – Safety requirements. CSA Publ., 2003. 8 p. (In Canadian Standards Association)
 22. Potekhin S.P., Balashevich V.M., Koptyaev E.N. Leakage current sensor for insulation resistance control systems. *Naucho-tekhnicheskie vedomosti Sevmashvtuza* [Scientific and Technical Bulletin of Sevmashvtuza], 2021, no. 1, pp. 4-12. (In Russian)
 23. Rudenko E.A., Yakovleva A.S. Hall sensor - independent and essential assistant in modern technology. *Nauchno-tekhnicheskoe i ekonomicheskoe sotrudnichestvo stran ATP v XXI veke* [Scientific, technical and economic cooperation of the Asia-Pacific countries in the 21st century], Khabarovsk, 2020, vol. 1, pp. 144-147. (In Russian)
 24. Lebedev V.A. Welding current sensor. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol, diagnostika*. [Devices and systems. Management, control, diagnostics], 2018, no. 9, pp. 52-56. (In Russian)
 25. Nikitin K.I., Vlasov A.Yu., Tereshchenko N.A., Markovetsky S.S., Markovsky V.P. Resistive current sensor. *Aktualnye voprosy energetiki* [Current issues of energy], 2019, no. 1, pp. 88-92. (In Russian)
 26. Potekhin S.P., Balashevich V.M., Koptyaev E.N. Leakage current sensor for insulation resistance control systems. *Naucho-tekhnicheskie vedomosti Sevmashvtuza* [Scientific and Technical Bulletin of Sevmashvtuza], 2021, no. 1, pp. 4-5. (In Russian)

Разработка и исследование датчиков тока для защиты источника регулируемого напряжения резонансной испытательной установки / Хазиева Р.Т., Павлова З.Х., Сердюк А.А., Мухаметшин А.В. // Электротехнические системы и комплексы. 2023. № 1(58). С. 76-83. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-1\(58\)-76-83](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-1(58)-76-83)

Khazieva R.T., Pavlova Z.Kh., Serdyuk A.A., Mukhametshin A.V. Development and Research of Current Sensors to Protect the Supply of Adjustable Voltage of a Resonant Test Device. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2023, no. 1(58), pp. 76-83. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-1\(51\)-76-83](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-1(51)-76-83)

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ УПРАВЛЯЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

Компенсация реактивной мощности в системах электроснабжения промышленных предприятий может осуществляться эксплуатируемыми синхронными двигателями. Однако для эффективного их использования необходимо достаточно точно определять потери активной мощности в зависимости от режимов работы этих двигателей. Целью работы являлось разработка методики, алгоритма и программы оценки состояния синхронного двигателя при изменении управляющих воздействий. Для синхронного двигателя под управляющими воздействиями подразумевается ток возбуждения и напряжение обмоток статора. Оценка состояния синхронного двигателя и исследование регулирующих эффектов управляющих воздействий на основании разработанной методики и алгоритма, а также существующего метода проведения полного факторного эксперимента реализована на программе для ЭВМ. Оценка состояния проводилась для высоковольтного синхронного двигателя марки ДСМ 260/39-36 напряжением 6 кВ, в котором изменение тока возбуждения может быть обеспечено системой управления возбуждением, а изменение напряжения обмоток статора – устройством регулирования напряжения под нагрузкой, трансформатора главной понизительной подстанции промышленного предприятия, осуществляющего питание распределительной электрической сети системы электроснабжения, к которой подключен синхронный двигатель. Исследование регулирующих эффектов управляющих воздействий синхронного двигателя показало, что компенсация реактивной мощности при регулировании тока возбуждения или напряжения обмоток статора обладает разной эффективностью с точки зрения затрат активной мощности на производство реактивной, причем регулирование напряжения обмоток статора позволяет значительно снизить эти затраты. Представленная методика оценки состояния позволяет рассматривать синхронный двигатель как активный элемент системы электроснабжения промышленного предприятия для решения широкого круга задач электроснабжения.

Ключевые слова: синхронный двигатель, потери активной мощности, ток возбуждения, напряжение обмоток статора, активная мощность, реактивная мощность, математическая модель, алгоритм, программа, управляющие воздействия, регулирующий эффект

ВВЕДЕНИЕ

Синхронный двигатель как элемент системы электроснабжения промышленного предприятия нашел широкое применение в технологических процессах таких производств, как черная и цветная металлургия, горно-обогатительная промышленность, нефтегазовая промышленность и др. Отличительной особенностью синхронных двигателей от других электрических машин является неизменная частота вращения ротора при изменении их механической нагрузки, а также возможность компенсировать реактивную мощность.

При решении задач компенсации реактивной мощности в системах электроснабжения промышленных предприятий с синхронными двигателями требуется достаточно точное определение потерь активной мощности в этих двигателях в зависимости от режимов их работы.

Анализ существующих методик [1-4] показал, что при определении потерь активной мощности в синхронных двигателях используют два подхода, а именно теоретический и экспериментальный. Теоретический подход является достаточно унифицированным и обладает высокой погрешностью, а экспериментальный, в свою очередь, очень трудоемкий, так как требует проведения натурных исследований с каждым синхронным двигателем в отдельности.

В настоящее время наиболее подходящей методикой для определения потерь активной мощности является методика, предложенная В.В. Архименко [5], так как она учитывает максимальное количество факторов, а именно: явноплюсность ротора, изменение насыще-

ния магнитной цепи, механическую нагрузку на валу, изменение напряжения обмоток статора, изменение температуры обмоток, изменение потерь активной мощности в стали при минимальном количестве исходных данных. Однако при определении потерь, используя методику [5], необходимо дополнительно определять значения параметров режима работы синхронного двигателя (потребляемую активную мощность, потребляемую или генерируемую реактивную мощность), что вызывает дополнительные трудности. Это обстоятельство накладывает ограничения использования данной методики при решении задач компенсации реактивной мощности в системах электроснабжения промышленных предприятий.

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ

Решением сложившейся ситуации является разработка методики оценки состояния для определения параметров режима при заданных управляющих воздействиях и моменте на валу синхронного двигателя M_2 . К управляющим воздействиям синхронного двигателя относятся ток возбуждения I_2 и напряжение обмоток статора U_1 .

Ток возбуждения и напряжение обмоток статора синхронного двигателя оказывают влияние на режим реактивной мощности Q , потери активной мощности $\Delta P_{сд}$ и потребление активной мощности из сети P_1 . Эти утверждения будут доказаны ниже.

Задача оценки состояния синхронного двигателя с использованием математической модели из [5] заключается в том, чтобы для заданных значений M_2 , I_2 , U_1 найти значения P_1 , Q , $\Delta P_{сд}$. В качестве исходных данных в методике используется условно-постоянная информация, представленная в заводском формуляре двигателя.

Аналитическое описание методики оценки состояния и параметров синхронного двигателя представлено в [6] выражениями (5)-(13), а методика состоит из двух этапов.

Этап №1. Определить параметры номинального режима.

Необходимо принять

$$\alpha_s = \frac{Q}{S_n} = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_n}, \quad (1)$$

где α_s – отношение реактивной мощности к полной мощности синхронного двигателя, о.е.; S_n – номинальная полная мощность синхронного двигателя, кВ·А; $\cos \varphi_n$ – номинальный коэффициент мощности синхронного двигателя, о.е.

$$\beta_s = \frac{P_1}{S_n} = \cos \varphi_n, \quad (2)$$

где β_s – отношение активной мощности, потребляемой из сети, к полной мощности синхронного двигателя, о.е.

$$u = \frac{U_1}{U_n} = 1, \quad (3)$$

где u – изменение напряжения обмоток статора синхронного двигателя по отношению к номинальному, о.е.; U_1 – напряжение обмоток статора синхронного двигателя, отличающееся от номинального, кВ; U_n – номинальное напряжение обмоток статора синхронного двигателя, кВ.

По математической модели [6], используя выражения (1)-(3), определить угол между относительным значением электродвижущей силы (ЭДС) возбуждения без учета насыщения магнитной цепи и напряжением статора синхронного двигателя θ , угол между относительным значением ЭДС Потье и напряжением статора синхронного двигателя σ_r , относительное значение ЭДС Потье синхронного двигателя ε_r , относительное значение ЭДС Кимбарка синхронного двигателя $\Delta\varepsilon$, относительное значение ЭДС возбуждения без учета насыщения магнитной цепи синхронного двигателя ε , относительное значение ЭДС возбуждения с учетом насыщения магнитной цепи синхронного двигателя ε_0 .

Принять

$$\varepsilon_{0,ном} = \varepsilon_0. \quad (4)$$

Этап №2. Определить параметры заданного режима.

Для определения параметров заданного режима необходимо задаться значениями:

1) относительное значение тока возбуждения $\dot{I}_2$, о.е.;

2) относительное значение напряжения обмоток статора синхронного двигателя (в долях от номинального значения) u , о.е.;

3) относительный момент на валу синхронного двигателя (в долях от номинального значения) m , о.е.

Момент на валу синхронного двигателя определяется по зависимости [7]

$$M_2 = \frac{60 \cdot 10^3}{2\pi} \cdot \frac{P_2}{n_n}, \quad (5)$$

где M_2 – механический момент на валу синхронного двигателя, Н·м; P_2 – механическая мощность на валу синхронного двигателя, кВт; n_n – номинальная частота вращения ротора синхронного двигателя, об/мин.

На основании выражения (5) M_2 пропорционально P_2 и по отношению к своим номинальным значениям определяется величиной m :

$$\frac{M_2}{M_{2,ном}} = \frac{P_2}{P_{2,ном}} = m, \quad (6)$$

где $M_{2,ном}$ – номинальный механический момент на валу синхронного двигателя, Н·м; $P_{2,ном}$ – номинальная механическая мощность на валу синхронного двигателя, кВт; m – относительное значение момента на валу синхронного двигателя, о.е.

Значение m задается для определения P_1 и β_s :

$$P_1 = mP_{2,ном} + \Delta p_0 + \Delta p_1 + \Delta p_3, \quad (7)$$

где Δp_0 – механические потери активной мощности в синхронном двигателе, кВт; Δp_1 – потери активной мощности в обмотках статора синхронного двигателя, кВт; Δp_3 – потери активной мощности в стали магнитопровода синхронного двигателя, кВт.

Для определения P_1 необходимо задаться начальными значениями:

$$\Delta p_1 = \Delta p_{1,ном}, \quad (8)$$

где $\Delta p_{1,ном}$ – номинальные потери активной мощности в обмотках статора синхронного двигателя, кВт.

$$\Delta p_3 = \Delta p_{3,ном}, \quad (9)$$

где $\Delta p_{3,ном}$ – номинальные потери активной мощности в стали магнитопровода синхронного двигателя, кВт.

Значения $\dot{I}_2$ и u задаются для решения выражения (10) относительно α_s с использованием математической модели [6]:

$$\psi_3(\dot{I}_2, \beta_s, \alpha_s, u) = \psi_1(\dot{I}_2) - \psi_2(\beta_s, \alpha_s, u) = 0. \quad (10)$$

Далее определяются по выражению (11) $\dot{I}_1$, по выражениям (12)-(14) $\dot{r}_1$, $\dot{r}_2$, Δp_2 и уточняются по выражениям (15), (16) Δp_1 и Δp_3 .

$$\dot{I}_1 = \sqrt{\frac{\alpha_s^2 + \beta_s^2}{u^2}}, \quad (11)$$

где $\dot{I}_1$ – относительное по отношению к номинальному значение тока статора синхронного двигателя, о.е.

$$\dot{r}_1 = \frac{235 + v_0 + \tau_{1н} \dot{I}_1^2}{235 + v_0 + \tau_{1н}}, \quad (12)$$

где $\dot{r}_1$ – относительное по отношению к номинальному значение активного сопротивления фазы статора синхронного двигателя, о.е.; v_0 – температура охлаждающей среды, °C; $\tau_{1н}$ – номинальное значение превышения температуры обмотки статора над температурой охлаждающей среды синхронного двигателя, °C.

$$\dot{r}_2 = \frac{235 + v_0 + \tau_{2н} \dot{I}_2^2}{235 + v_0 + \tau_{2н}}, \quad (13)$$

где $\dot{r}_2$ – относительное по отношению к номинальному значению активного сопротивления обмотки возбуждения синхронного двигателя, о.е.; v_0 – температура охлаждающей среды, °C; $\tau_{2н}$ – номинальное значение превышения температуры обмотки возбуждения над температурой охлаждающей среды синхронного двигателя, °C.

$$\Delta p_2 = \Delta p_{2,ном} \dot{r}_2 \dot{I}_2^2, \quad (14)$$

где Δp_2 – потери активной мощности в обмотке возбуждения синхронного двигателя, кВт; $\Delta p_{2,ном}$ – номинальные потери активной мощности в обмотке возбуждения синхронного двигателя, кВт.

$$\Delta p_1 = \Delta p_{1,ном} \dot{r}_1 \dot{I}_1^2, \quad (15)$$

$$\Delta p_3 = \Delta p_{3,ном} \frac{x_\sigma^2 I_1^2 + 2x_\sigma \alpha_s + u^2}{x_\sigma^2 + 2x_\sigma \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_n} + 1}, \quad (16)$$

где x_σ – индуктивное сопротивление рассеяния синхронного двигателя, о.е.

По определенным значениям параметров заданного режима α_s , Δp_1 , Δp_2 и Δp_3 рассчитываются значения по выражению (7) P_1 , по выражению (1) Q и по выражению (17) $\Delta p_{сд}$.

$$\Delta p_{сд} = \Delta p_0 + \Delta p_1 + \Delta p_2 + \Delta p_3, \quad (17)$$

где $\Delta p_{сд}$ – потери активной мощности в синхронном двигателе, кВт.

Уравнение (10) является нелинейным относительно функции $\psi_2(\beta_s, \alpha_s, u)$, решение которого осуществить аналитическими методами [7] достаточно сложно, так как значение α_s является неизвестным. Учитывая дифференцируемость функции $\psi_2(\beta_s, \alpha_s, u)$ и возможность выбора начального приближения α_0 , целесообразно при поиске корней уравнения (10) использовать итерационный метод Ньютона [7, 8].

Метод Ньютона [8] является одним из самых эффективных методов решения нелинейных задач. Метод сводится к следующему (решение относительно α_s):

1) Имея начальное приближение α_0 решения уравнения (10), последующие приближения определяются как

$$\alpha_{j+1} = \alpha_j - \frac{\psi_2(\beta_s, \alpha_s, u)}{\psi_2'(\beta_s, \alpha_s, u)}, \quad (18)$$

где j – номер итерации; $\Delta \psi_2'(\beta_s, \alpha_s, u)$ – частная производная функции $\psi_2(\beta_s, \alpha_s, u)$ по α_s .

Начальное приближение α_0 , если не учитывать явнополюсность ротора и изменение насыщения магнитной цепи [6], определяется по формуле

$$\alpha_0 = \frac{u}{x_d} \sqrt{\varepsilon_{ном}^2 I_2^2 - x_d^2 \frac{\beta_s^2}{u^2}} - \frac{u^2}{x_d}, \quad (19)$$

где x_d – синхронное индуктивное сопротивление по продольной оси синхронного двигателя, о.е.; $\varepsilon_{ном}$ – номинальное относительное значение ЭДС, индуцируемой потоком возбуждения без учета изменения насыщения магнитной цепи, о.е.,

$$\varepsilon_{ном} = x_d^2 + 2x_d \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_n} + 1. \quad (20)$$

2) За решение принимается n -е приближение α_n , когда

$$\psi_3(\dot{I}_2, \beta_s, \alpha_s, u) \leq \zeta, \quad (21)$$

где ζ – заданная точность решения.

АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ

Графическая структура алгоритма оценки состояния синхронного двигателя при заданных параметрах режима (изменении управляющих воздействий) представлена на **рис. 1**.

Алгоритм оценки состояния синхронного двигателя осуществляется следующими блоками:

- 1) Терминатор: начало алгоритма.
- 2) Ввод-вывод: ввод исходных данных.
- 3) Процесс: вычисление относительных параметров номинального режима с учетом заданных абсолютных параметров (активная и полная мощности, токи, напряжения). По выражениям (1)-(3) определяются значения α_s , β_s и u , далее рассчитываются по математической модели значения θ , σ_p , ε_p , $\Delta \varepsilon$, ε , ε_0 и принимается $\varepsilon_{0,ном} = \varepsilon_0$ [6].

4) Процесс: задаются величины (параметры заданного режима) $\dot{I}_2$, u и t .

5) Процесс: задается номер начальной итерации j .

6) Решение: при условии, если номер итерации $j = 0$, «да», то выполняется блок 7, если «нет», то выполняется блок 8.

7) Процесс: определение начального приближения, принимается по выражениям (8), (9) Δp_1 и Δp_3 , далее определяется по выражениям (2), (7) P_1 и β_s , по выражению (19) α_0 , где $\varepsilon_{ном}$ рассчитывается по выражению (20).

8) Решение: необходимо решить уравнение (10), если $\psi_3(\dot{I}_2, \beta_s, \alpha_s, u) = 0$, «да», то выполняется блок 13, если «нет», то выполняется блок 9.

9) Процесс: рассчитать по выражениям (11), (12) $\dot{I}_1$ и $\dot{r}_1$, а также уточнить значения Δp_1 и Δp_3 советующей итерации.

10) Процесс: рассчитать по выражениям (2), (7) P_1 и β_s , используя уточненные значения Δp_1 и Δp_3 , определенные в блоке 9.

11) Процесс: определить последующее приближение α_s по выражению (18) относительно α_0 .

12) Решение: решить уравнение (10) относительно α_s , значение которого определяется в блоке 11, и сравнить с ζ на основании условия (21), если «да», то выполняется блок 13, «нет», то выполняется блок 16.

13) Процесс: рассчитать по выражению (13) $\dot{r}_2$ и определить Δp_2 .

14) Процесс: рассчитать по выражению (17) $\Delta p_{сд}$ и по выражению (1) Q .

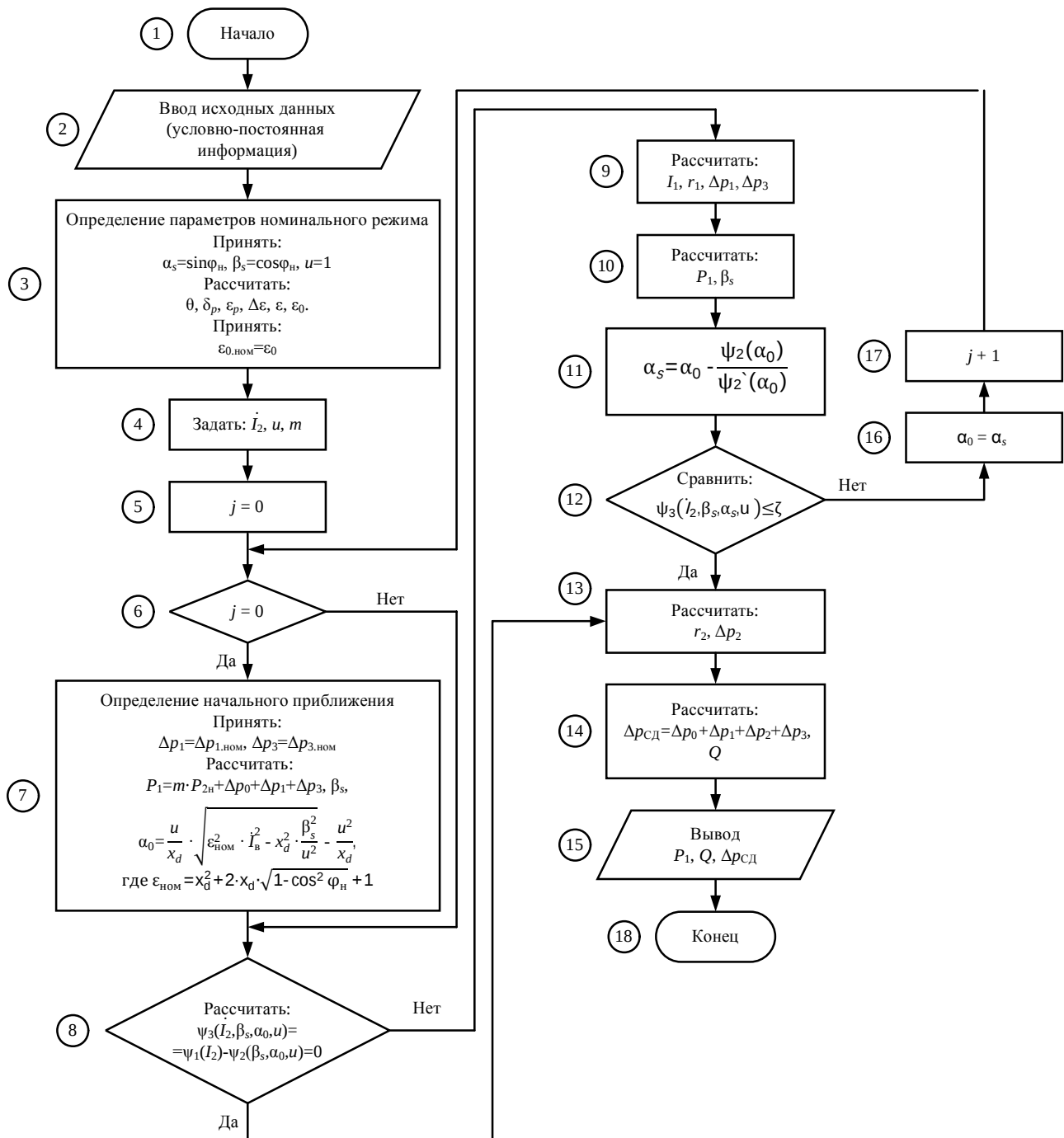


Рис. 1. Графическая структура алгоритма оценки состояния синхронного двигателя

15) Ввод-вывод: вывод P_1 , Q и $\Delta p_{сд}$.

16) Процесс: присвоить начальному значению приближения α_0 значение α_s , определенное в блоке 11.

17) Процесс: переход к следующей итерации $j+1$.

18) Терминатор: конец алгоритма.

На основании математических зависимостей [5, 6], методики и алгоритма разработана программа для ЭВМ, позволяющая производить оценку и исследования состояний синхронного двигателя [9].

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕГУЛИРУЮЩИХ ЭФФЕКТОВ УПРАВЛЯЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Задачей проведения вычислительного эксперимента с использованием разработанной программы явля-

ется исследование регулирующих эффектов управляющих воздействий, оказывающих влияние на режим потребления активной мощности из сети P_1 , потерь активной мощности $\Delta p_{сд}$ и генерации или потребления реактивной мощности Q синхронного двигателя.

Исследования проводились при использовании условно-постоянной информации о высоковольтном синхронном двигателе марки ДСМ 260/39-36, а именно: $n_n = 167$ об/мин, $v_0 = 35$ °C, $P_{2,ном} = 900$ кВт, $U_n = 6$ кВ, $S_n = 1070$ кВ·А, $\cos \varphi_n = 0,9$, $x_d = 0,673$, $x_c = 0,083$, $\tau_{1н} = 51$ °C, $\tau_{2н} = 67$ °C, $\Delta p_0 = 5,2$ кВт, $\Delta p_1 = 19,46$ кВт, $\Delta p_2 = 23,5$ кВт, $\Delta p_3 = 22,74$ кВт.

План полного факторного эксперимента и результаты вычислительного эксперимента представлены в таблице.

Результаты оценки состояния синхронного двигателя

Опыт	m , о. е.	I_2 , о. е.	u , о. е.	P_1 , кВт	Q , квар	$\Delta p_{сд}$, кВт
1	0,7	0,4	0,90	668,0	-626,1	41,1
2	0,7	0,4	0,95	670,8	-738,1	43,9
3	0,7	0,4	1,00	674,5	-870,1	47,6
4	0,7	0,4	1,05	679,2	-1023,1	52,3
5	0,7	0,4	1,10	685,1	-1198,2	58,3
6	0,7	0,6	0,90	661,1	-128,8	38,5
7	0,7	0,6	0,95	662,4	-233,1	39,8
8	0,7	0,6	1,00	664,4	-357,6	41,8
9	0,7	0,6	1,05	667,1	-503,7	44,5
10	0,7	0,6	1,10	670,7	-672,8	48,1
11	0,7	0,8	0,90	664,5	320,4	48,4
12	0,7	0,8	0,95	663,9	226,4	47,9
13	0,7	0,8	1,00	664,0	110,9	47,9
14	0,7	0,8	1,05	664,8	-27,7	48,8
15	0,7	0,8	1,10	666,4	-190,7	50,4
16	0,7	1,0	0,90	676,3	741,3	69,8
17	0,7	1,0	0,95	672,9	657,1	66,4
18	0,7	1,0	1,00	670,4	549,7	63,9
19	0,7	1,0	1,05	668,9	417,7	62,4
20	0,7	1,0	1,10	668,3	259,4	61,8
21	0,7	1,2	0,90	698,3	1139,4	105,1
22	0,7	1,2	0,95	690,4	1063,6	97,2
23	0,7	1,2	1,00	683,9	963,1	90,7
24	0,7	1,2	1,05	678,9	836,1	85,7
25	0,7	1,2	1,10	675,3	680,9	82,1

План полного факторного эксперимента, на основании которого осуществлены исследования, включает в себя:

1) Количество факторов $K = 3$, к ним относятся ток возбуждения I_2 , напряжение обмоток статора u и момент на валу m синхронного двигателя.

2) Количество откликов $G = 3$, к ним относятся потребляемая активная мощность P_1 , реактивная мощность Q и потери активной мощности $\Delta p_{сд}$ синхронного двигателя.

3) Границы изменения факторов: ток возбуждения I_2 от 0,4 до 1,2; напряжение обмоток статора u от 0,9 до 1,1; момент на валу $m = 0,7$.

4) Количество уровней факторов $M = 5$, при этом количество проводимых экспериментов составляет $N = 25$.

Графические зависимости, полученные в результате вычислительного эксперимента для реактивной мощности, представлены в [10], для потребляемой активной мощности из сети P_1 на рис. 2 и 3, для потерь активной мощности $\Delta p_{сд}$ в синхронном двигателе на рис. 4 и 5.

На рис. 2 представлено семейство U-образных характеристик состояний синхронного двигателя (по потребляемой активной мощности из сети) при регулировании тока возбуждения и фиксированных значениях напряжений статора. В диапазоне значений тока возбуждений ниже 0,8 о.е. синхронный двигатель находится в режиме потребления реактивной мощности (режим недовозбуждения), а в диапазоне выше 0,8 о.е. находится в режиме генерации реактивной мощности (режим перевозбуждения), причем напряжение статора оказывает влияние на режим потребления активной мощности из сети таким образом, что чем выше значение напряжения в режиме недовозбуж-

дения, тем больше потребление активной мощности из сети, и наоборот, в режиме перевозбуждения чем выше напряжение статора, тем меньше потребление активной мощности из сети.

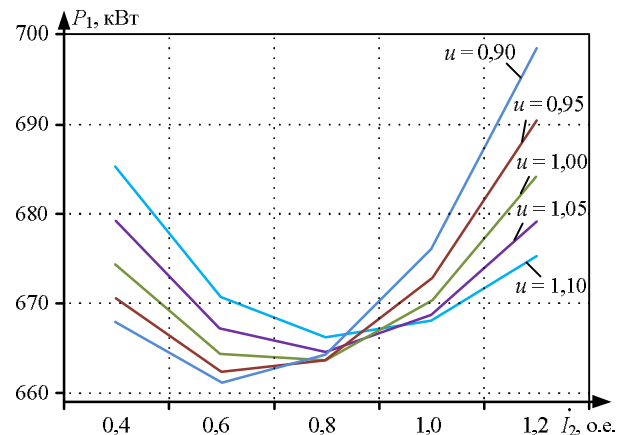


Рис. 2. Графические зависимости активной мощности P_1 , потребляемой из сети от тока возбуждения I_2 при фиксированных значениях напряжений статора u синхронного двигателя

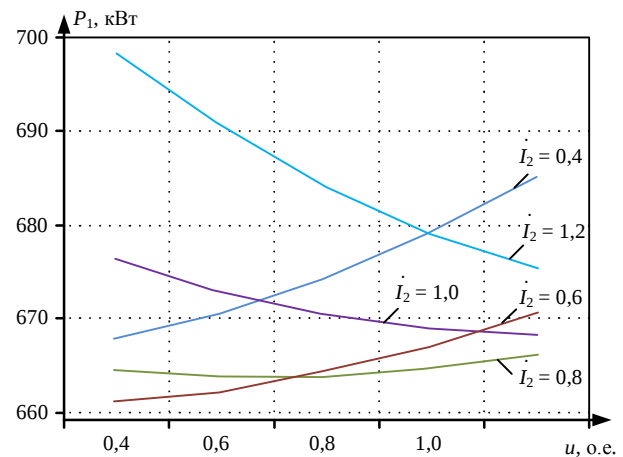


Рис. 3. Графические зависимости активной мощности P_1 , потребляемой из сети от напряжения статора u при фиксированных значениях токов возбуждений I_2 синхронного двигателя

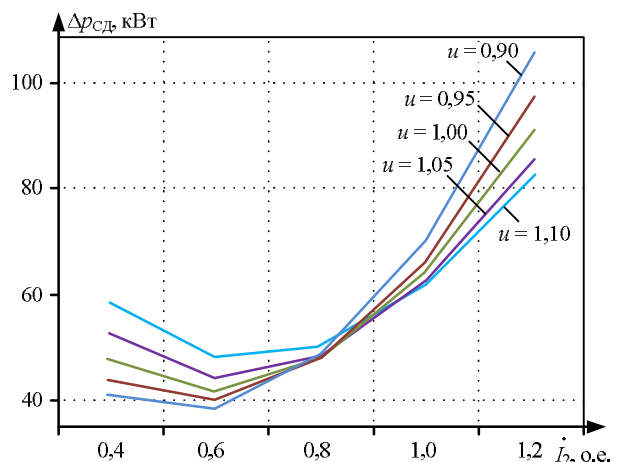


Рис. 4. Графические зависимости потерь активной мощности $\Delta p_{сд}$ от тока возбуждения I_2 при фиксированных значениях напряжений статора u синхронного двигателя

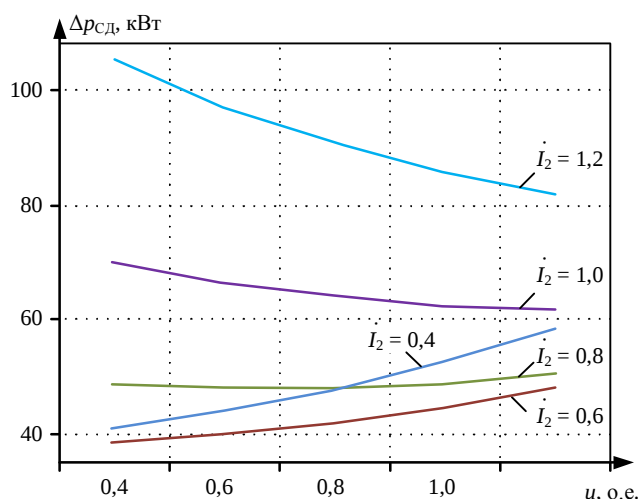


Рис. 5. Графические зависимости потерь активной мощности $\Delta p_{сд}$ от напряжения статора u при фиксированных значениях токов возбуждений I_2 синхронного двигателя

На рис. 3 представлено семейство характеристик состояний синхронного двигателя (по потребляемой активной мощности из сети) при регулировании напряжения статора и фиксированных значениях тока возбуждения. В диапазоне регулирования напряжения от 0,9 до 1,1 о.е. видно, что при значениях тока возбуждения 0,4 и 0,6 о.е. потребление активной мощности из сети имеет возрастающий характер, при токе 0,8 о.е. потребление активной мощности возрастает значительно медленнее, чем при токах 0,4 и 0,6 о.е., а при значениях тока больше 1,0 о.е. потребление активной мощности снижается.

На рис. 4 представлено семейство характеристик состояний синхронного двигателя (по потерям активной мощности) при регулировании тока возбуждения и фиксированных значениях напряжения статора. Изменения значений напряжения статора в диапазоне от 0,9 до 1,1 о.е. номинального значения при регулировании тока возбуждения ниже 0,8 о.е. приводит к увеличению потерь активной мощности, а при токе выше 0,8 о.е. наблюдается обратный процесс, потери активной мощности в синхронном двигателе уменьшаются. Характер изменения потерь активной мощности в синхронном двигателе при регулировании тока возбуждения объясняется тем, что в режиме недовозбуждения потребление реактивной мощности из сети при увеличении напряжения увеличивается, тем самым увеличиваются потери в обмотке статора и стали магнитопровода. В режиме перевозбуждения при увеличении напряжения потери активной мощности уменьшаются за счет снижения генерации реактивной мощности, то есть чем выше значения напряжения статора, тем меньше генерируется реактивная мощность и, соответственно, возникают меньшие потери активной мощности в обмотках статора. Однозначно, увеличиваются или уменьшаются, о потерях активной мощности в стали магнитопровода в режиме генерации реактивной мощности сказать нельзя, так как потери в стали зависят от тока статора, реактивной мощности и напряжения статора, согласно выражению (16).

На рис. 5 представлено семейство характеристик состояний синхронного двигателя (по потерям активной мощности) при регулировании напряжения статора и фиксированных значениях тока возбуждения. Изменение значений тока возбуждения ниже 0,8 о.е. номинального значения при регулировании напряжения статора от 0,9 до 1,1 о.е. приводит к увеличению потерь активной мощности, причем чем ниже величина тока возбуждения, тем сильнее характер зависимости, а при токе выше 0,8 о.е. характер зависимости изменяется, потери активной мощности уменьшаются, и при увеличении тока возбуждения характер зависимости становится сильнее. Характер состояний синхронного двигателя при регулировании напряжения статора объясняется тем, что увеличение напряжения обмотки статора приводит к уменьшению генерации реактивной мощности, при этом снижаются потери активной мощности в обмотке статора, а потери в стали определяются согласно выражению (16).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оценка состояний синхронного двигателя показала, что при изменении управляющих воздействий в широких пределах изменяются величины реактивной [10] и потерь активной мощностей. Следует отметить, что генерация реактивной мощности [10] существенно отличается при регулировании тока возбуждения или напряжения обмоток статора синхронного двигателя. Особенно при различных управляющих воздействиях наблюдаются разные затраты активной мощности на производство реактивной (разный регулирующий эффект). Например, при регулировании напряжения обмоток статора затраты на производство реактивной мощности будут ниже по сравнению с регулированием тока возбуждения. Это утверждение необходимо учитывать при выборе оптимального режима работы синхронного двигателя (в режиме компенсации реактивной мощности).

Представленная методика оценки состояния позволяет рассматривать синхронный двигатели как активный элемент системы электроснабжения промышленного предприятия для решения широкого круга задач электроснабжения.

На практике применение разработанной методики оценки состояния синхронного двигателя позволит более эффективно управлять компенсацией реактивной мощности и вследствие этого снижать потери активной мощности в системе электроснабжения промышленного предприятия в целом.

Список источников

1. Литвак Л.В. Рациональная компенсация реактивных нагрузок на промышленных предприятиях. М.: Госэнергиздат, 1963. 256 с.
2. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей. М.: Энергоатомиздат, 1984. 240 с.
3. Никулин И.А. Расчет режима возбуждения синхронного двигателя, обеспечивающего минимум потерь электроэнергии // Электричество. 1965. №4. С. 8-13.
4. Вершинин П.П. Повышение эффективности режимов передачи и потребления электроэнергии в отраслях тяжелой промышленности на базе комплексного использования синхронного двигателя: дис. ... д-ра техн. наук. 05.09.03 / Вершинин Петр Павлович. Днепропетровск, 1984.

5. Архипенко В.В. Метод определения потерь активной мощности в синхронном двигателе // Электричество. 1973. № 2. С. 12-14.
6. Статические характеристики и методы расчета установившихся режимов работы синхронного двигателя / А.Н. Филатов, Е.Ю. Сизганова, В.И. Пантелеев, Р.А. Петухов, Г.А. Пилиugin // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. 2015. №6. С. 795-801.
7. Арушанян И.О., Численные алгоритмы решения нелинейных уравнений: учебное пособие. М.: Московский гос. ун-т, 2018. 39 с.
8. Гурьев Е.К., Никулин А.М. Итерационные методы решения нелинейных уравнений: учебное пособие. М.: МАТИ, 2005. 176 с.
9. Свидетельство о гос. регистрации прогн. для ЭВМ №2021680084. Оценка состояния синхронного двигателя / Пантелеев В.И., Филатов А.Н., Пилиugin Г.А.; заявители Пантелеев В.И., Филатов А.Н., Пилиugin Г.А.; заявл. 01.12.2021, опубл. 07.12.2021.
10. Пилиugin Г.А., Пантелеев В.И., Филатов А.Н. Моделирование синхронного двигателя как активно-адаптивного элемента системы электроснабжения промышленного предприятия // Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности: материалы V Международной научно-технической конференции. Чебоксары: Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, 2021. С. 55-60.

Поступила в редакцию 11 января 2023 г.

Принята к печати 08 февраля 2023 г.

INFORMATION IN ENGLISH

METHOD FOR ASSESSING THE SYNCHRONOUS MOTOR STATE WHEN CONTROL ACTIONS CHANGE

Gennadiy A. Pilyugin

Assistant Professor, Department of Electric Power Industry, Polytechnical Institute of Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia, SFU_PI_PILYUGIN@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6073-9542>

Vasilii I. Panteleev

D.Sc. (Engineering), Head of the Department, Department of Electric Power Industry, Polytechnical Institute of Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia, pvi0808@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8676-3177>

Aleksey N. Filatov

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Department of Electric Power Industry, Polytechnical Institute of Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia, anf.24@mail.ru

Reactive power compensation in power supply systems of industrial enterprises can be carried out by operated synchronous motors. However, for their effective use, it is necessary to accurately determine the loss of active power depending on the operating modes of these motors. The purpose of the work was to develop a methodology, algorithm and program for assessing the state of a synchronous motor when changing control actions. For a synchronous motor, control actions mean the excitation current and voltage of the stator windings. The assessment of the synchronous motor state and the study of the regulatory effects of control actions on the basis of the developed methodology and algorithm, as well as the existing method of conducting a complete factor experiment is implemented on a computer program. The condition assessment was carried out for a high-voltage synchronous motor of the DSM 260/39-36 brand with a voltage of 6 kV, in which a change in the excitation current can be provided by an excitation control system, and a change in the voltage of the stator coil, a voltage regulation device under load (RPN), a transformer of the main step-down substation of an industrial enterprise that supplies the distribution electrical network the power supply system to which the synchronous motor is connected. The study of the regulatory effects of the control actions of a synchronous motor has shown that reactive power compensation when regulating the excitation current or voltage of the stator windings has different efficiency in terms of the active power cost for the reactive power generation, and the regulation of the voltage of the stator windings can significantly reduce these costs. The presented method of condition assessment allows us to consider synchronous motors as an active element of the power supply system of an industrial enterprise, or a group of active elements for solving a wide range of power supply tasks.

Keywords: synchronous motor, active power losses, excitation current, stator winding voltage, active power, reactive power, mathematical model, algorithm, program, control actions, control effect

REFERENCES

1. Litvak L.V. *Ratsionalnaya kompensatsiya reaktivnykh nagruzok na promyshlennykh predpriyatiyakh* [Rational compensation of reactive loads at industrial enterprises]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1963. 256 p. (In Russian)
2. Syromyatnikov I.A. *Rezhimy raboty asinkhronnykh i sinkhronnykh dvigateley* [Operating modes of asynchronous and synchronous motors]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1984. 240 p. (In Russian)
3. Nikulin I.A. Calculation of the excitation mode of a synchronous motor providing a minimum of power losses. *Elektrichestvo* [Elektrichestvo], 1965, no 4, pp. 8-13. (In Russian)
4. Vershinin P.P. *Povyshenie effektivnosti rezhimov peredachi i potrebleniya elektroenergii v otraslyakh tyazhelyoy promyshlennosti na baze kompleksnogo ispolzovaniya sinkhronnogo dvigatelya*. Doct. Diss. [Improving the efficiency of transmission modes and electricity consumption in heavy industries based on the integrated use of a synchronous motor. Doct. Diss.]. Dneprodzerzhinsk, 1984. (In Russian)
5. Arkhipenko V.V. Method for determining active power losses in a synchronous motor. *Elektrichestvo* [Elektrichestvo], 1973, no 2, pp. 12-14. (In Russian)
6. Filatov A.N., Sizganova E.Yu., Panteleev V.I., Petukhov R.A., Pilyugin G.A. Static characteristics and methods for calculating the steady-state operating modes of a synchronous motor. *Journal of Siberian Federal University. Engineering&Technologies*, 2015, no 6, pp. 795-801. (In Russian)
7. Arushanyan I.O. *Chislennyye algoritmy resheniya nelineynykh uravneniy* [Numerical algorithms for solving nonlinear equations]. Moscow, Moscow State University Moscow State University Publ., 2018. 39 p. (In Russian)
8. Gur'ev E.K., Nikulin A.M. *Iteratsionnye metody resheniya nelineynykh uravneniy* [Iterative methods for solving nonlin-

- | | |
|--|---|
| <p>ear equations]. Moscow, MATI Publ., 2005. 176 p. (In Russian)</p> <p>9. Panteleev V.I., Filatov A.N., Pilyugin G.A. <i>Otsenka sostoyaniya sinkhronnogo dvigatelya</i> [Synchronous motor condition assessment]. Computer program RF, no. 2021680084, 2021.</p> <p>10. Pilyugin G.A., Panteleev V.I., Filatov A.N. Simulation of a synchronous motor as an active-adaptive element of the</p> | <p>power supply system of an industrial enterprise. <i>Problemy i perspektivy razvitiya energetiki, elektrotekhniki i energoefektivnosti: materialy V Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii</i> [Materials of the V International Scientific and Technical Conference "Problems and prospects for the development of energy, electrical engineering and energy efficiency"]. Cheboksary, Ulanov Chuvash State University Publ., 2021, pp. 55-60. (In Russian)</p> |
|--|---|
-
- | | |
|--|--|
| <p>Пилюгин Г.А., Пантелеев В.И., Филатов А.Н. Методика оценки состояния синхронного двигателя при изменении управляющих воздействий // <i>Электротехнические системы и комплексы</i>. 2023. № 1(58). С. 84-91. https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-1(58)-84-91</p> | <p>Pilyugin G.A., Panteleev V.I., Filatov A.N. Method for Assessing the Synchronous Motor State when Control Actions Change. <i>Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы</i> [Electrotechnical Systems and Complexes], 2023, no. 1(58), pp. 84-91. (In Russian). https://doi.org/10.18503/2311-8318-2023-1(58)-84-91</p> |
|--|--|
-

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Абдулкеримов Сагид Абдурахманович – канд. техн. наук, доцент, директор, Национальный исследовательский университет «МЭИ», филиал в Душанбе, Душанбе, Республика Таджикистан, tor.df.mpei@ya.ru

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

Ахъеев Джавод Саламшоевич – канд. техн. наук, доцент, кафедра электрических станций, Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими, Душанбе, Республика Таджикистан, javod@ttu.tj, <https://orcid.org/0000-0002-9869-288X>

Бондарев Иван Сергеевич – инженер-тестировщик, ООО «КомпасПлюс», Магнитогорск, Россия, ivanbond1998@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0150-3024>

Ганиев Зокирджон Султонович – старший преподаватель, кафедра электроэнергетики, Национальный исследовательский университет «МЭИ», филиал в Душанбе, Душанбе, Республика Таджикистан, zoko1981@mail.ru

Джураев Шохин Джураевич – канд. техн. наук, старший преподаватель, кафедра электроэнергетики, Национальный исследовательский университет «МЭИ», филиал в Душанбе, Душанбе, Республика Таджикистан, dzhuraevsh@mpei.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4092-2758>

Кацай Александр Владимирович – канд. филол. наук, генеральный директор, ООО «Кинемак», Москва, Россия, proton764@mail.ru

Кондрашова Юлия Николаевна – канд. техн. наук, доцент, кафедра электроснабжения промышленных предприятий, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия, rotjuil720@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5280-5666>

Копытов Сергей Михайлович – канд. техн. наук, доцент, кафедра промышленной электроники, Комсомольский-на-Амуре государственный университет, Комсомольск-на-Амуре, Россия, skopytov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7967-9460>

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

Мещеряков Виктор Николаевич – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой, кафедра электропривода, Липецкий государственный технический университет, Липецк, Россия, mesherek@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0984-5133>

Мухаметшин Андрей Валерьевич – доцент, базовая кафедра электроэнергетики и электротехнологии в составе кафедры электротехники и электрооборудования предприятий, Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия, mukhametshinav@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5098-6483>

Назиров Хуршед Бобоходжаевич – канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой, кафедра электроэнергетики, Национальный исследовательский университет «МЭИ», филиал в Душанбе, Душанбе, Республика Таджикистан, hurshed84@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4347-5239>

Павлова Зухра Хасановна – д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры, директор института, кафедра электротехники и электрооборудования предприятий, институт цифровых систем, автоматизации и энергетики, Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия, zpavlova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4767-972X>

Пантелеев Василий Иванович – д-р техн. наук, заведующий кафедрой, кафедра электроэнергетики, Политехнический институт Сибирского федерального университета, Красноярск, Россия, rv0808@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8676-3177>

Пилюгин Геннадий Александрович – старший преподаватель, кафедра электроэнергетики, Политехнический институт Сибирского федерального университета, Красноярск, Россия, SFU_PI_PILYUGIN@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6073-9542>

Попова Валерия Сергеевна – аспирант, Комсомольский-на-Амуре государственный университет, Комсомольск-на-Амуре, Россия, <https://orcid.org/0000-0002-1874-0598>

Прасолов Александр Сергеевич – аспирант, кафедра автоматизированных систем управления, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия, Aspr.88@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6191-1156>

Сенцов Евгений Викторович – аспирант, кафедра электропривода, Липецкий государственный технический университет, Липецк, Россия, evgenysentsov@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8383-5139>

Сердюк Алексей Анатольевич – технический директор, ООО Научно-инженерный центр «Резонансные системы», Уфа, Россия, serdiukaa@ed-electro.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9259-5122>

Снигур Артём – студент, кафедра электроснабжения промышленных предприятий, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия, artem_snigur@mail.ru

Соловьев Вячеслав Алексеевич – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой, кафедра электропривода и автоматизации промышленных установок, Комсомольский-на-Амуре государственный универси-

тет, Комсомольск-на-Амуре, Россия, ерапу@knastu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7930-0601>

Третьяков Андрей Максимович – студент, кафедры электроснабжения промышленных предприятий, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия, andreyt2001@yandex.ru

Ульянов Александр Владимирович – канд. техн. наук, главный специалист, научно-исследовательский центр, АО Опытно-конструкторское бюро «Электроавтоматика» им. П.А. Ефимова, Санкт-Петербург, Россия, Ulianov2@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2548-9132>

Филатов Алексей Николаевич – канд. техн. наук, доцент, кафедра электроэнергетики, Политехнический институт Сибирского федерального университета, Красноярск, Россия, anf.24@mail.ru

Хазиева Регина Тагировна – канд. техн. наук, доцент, кафедра электротехники и электрооборудования

предприятий, Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия, khazievart@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7075-0363>

Шалимов Алексей Витальевич – студент, кафедры электроснабжения промышленных предприятий, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия, Shalimov-alexey@mail.ru

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

Шевлюгин Максим Валерьевич – д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой, кафедра электроэнергетики транспорта, Российский университет транспорта (МИИТ), Москва, Россия, mx_sh@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3300-5193>

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

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

С 02.02.2016 г. журнал входит в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук.

По состоянию Перечня на 07.03.2023 г. журнал публикует работы по следующим научным специальностям:

- 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки)
- 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации (технические)
- 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки)
- 2.4.1. Теоретическая и прикладная электротехника (технические науки)
- 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы (технические науки)
- 2.4.3. Электроэнергетика (технические науки)
- 2.4.4. Электротехнология и электрофизика (технические науки)

По результатам экспертной оценки ВАК с **06.12.2022 г.** журнал отнесен к категории **К2**.

Журнал публикует научные работы по следующим рубрикам:

- теория и практика автоматизированного электропривода;
- электроэнергетика;
- 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 (отправляется по электронной почте ecis.red@gmail.com):

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