

— ЭлСиК —

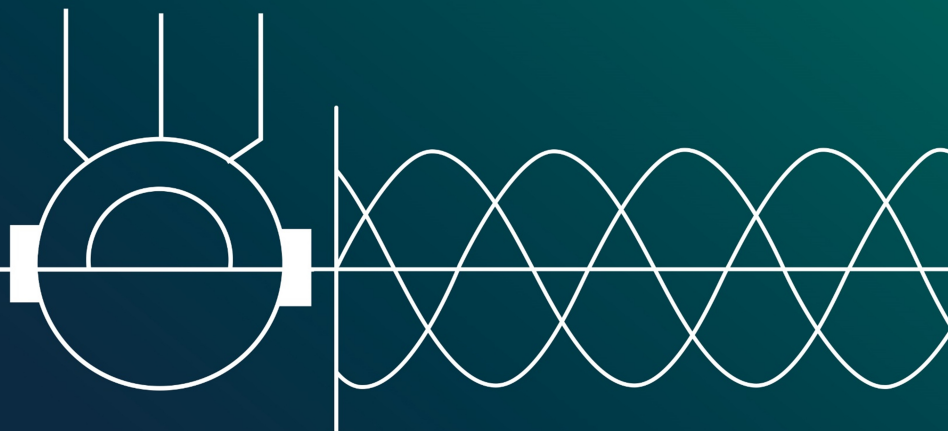
ISSN 2311-8318

ISSN (online) 2658-3151

# ЭЛЕКТРО- ТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

№ 2(51)

2021 г.



## Уважаемые коллеги!

Приглашаем Вас принять участие в научном семинаре аспирантов «Электротехнические комплексы и системы автоматизации в металлургии» (IEEE Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice).

Данный научный семинар будет проводиться в очной форме **24-26 сентября 2021 года** на базе УОЦ «Юность» ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова» (оз. Банное, 40 км от г. Магнитогорска). Рабочий язык семинара – русский и английский. Приём докладов проводится до **30 июня 2021 года**.

Размер организационного взноса 7300 руб., для студентов и аспирантов - бесплатно. Проезд, проживание и питание оплачиваются участниками самостоятельно.

Тематические секции семинара:

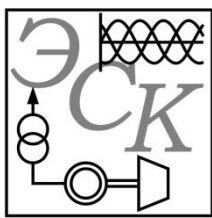
1. Автоматизированный электропривод.
2. Автоматизация и управление технологическими процессами.
3. Силовая электроника.
4. Электрические машины.
5. Системы электроснабжения.
6. Возобновляемая энергетика.

Труды семинара будут опубликованы в виде полных статей:

- статьи, представленные на английском языке и принятые Программным комитетом, публикуются в сборнике трудов семинара, размещаемом в цифровой библиотеке "IEEE Xplore". Издание индексируется наукометрической базой Scopus;

- статьи, представленные на русском языке, отбираются Программным комитетом для публикации в одном из следующих журналов, индексируемых наукометрической базой РИНЦ: 1) входящий в перечень ВАК "Вестник ЮУрГУ. Серия Энергетика", издаваемый ЮУрГУ; 2) входящий в перечень ВАК "Электротехнические системы и комплексы", издаваемый МГТУ; 3) "Электротехника: сетевой электронный научный журнал" или "Машиностроение: сетевой электронный научный журнал", издаваемые Южно-Уральской группой IEEE.

Подробную информацию о научном семинаре, а также шаблон для оформления докладов семинара Вы можете найти на официальном сайте научного семинара **peami.su-ieee.ru**.



# ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

ИЗДАЕТСЯ С ЯНВАРЯ 1996 Г.

№ 2(51), ИЮНЬ 2021

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

## Редакционная коллегия

### Председатель редакционной коллегии:

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

### Главный редактор:

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

### Ответственный редактор:

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

### Секция теории и практики автоматизированного электропривода:

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

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

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

### Секция электро- и теплоэнергетики:

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

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

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

### Секция энерго- и ресурсосбережения:

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

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

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

### Секция электроснабжения:

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

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

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

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

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

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

### Секция электротехнологий в промышленности:

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

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

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

### Секция мониторинга, контроля и диагностики электрооборудования:

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

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

### Технические редакторы:

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

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

© ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2021

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

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

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

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

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

### Адрес редакции:

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

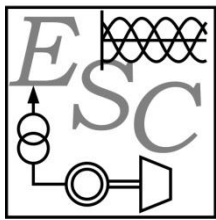
### Адрес издателя:

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

### Адрес типографии:

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

Выход в свет 28.06.2021. Заказ 150. Тираж 500 экз.  
Цена свободная.



# ELECTROTECHNICAL SYSTEMS AND COMPLEXES

PUBLISHED SINCE JAN., 1996

NO. 2(51), JUNE, 2021

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

## Editorial Board

### Head of the Editorial Board:

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

### Editor in Chief:

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

### Executive Editor:

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

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

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

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

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

### Section of Power Engineering:

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

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

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

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

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

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

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

### Section of Electric Power Supply:

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

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

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

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

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

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

### Section of Industrial Electro Technology:

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

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

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

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

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

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

### Technical Editors:

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

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

© FSBEI HE NMSTU, 2021

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

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

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

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

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

### The publisher:

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

### The editorial office:

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

### The printing-office:

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

Publication date: 28.06.2021. Order 150. Circulation: 500.  
Open price.

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ЭЛЕКТРО- И ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА .....</b>	<b>4</b>
<i>Панкратов А.В., Жуйков А.К., Шувалова А.А., Полищук В.И.</i>	
Определение статических характеристик нагрузки по напряжению по данным пассивного эксперимента с учётом реакции сети .....	4
<b>ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ .....</b>	<b>12</b>
<i>Семенова Н.Г., Чернова А.Д.</i>	
Алгоритм принятия решения по развитию объекта систем электроснабжения .....	12
<b>ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА .....</b>	<b>19</b>
<i>Радионон А.А., Гасияров Р.В., Логинов Б.М., Гартлиб Е.А., Гасиярова О.А.</i>	
Разработка цифрового наблюдателя упругого момента электрохимической системы клетки прокатного стана ..	19
<i>Кашин Я.М., Копелевич Л.Е., Самородов А.В., Ким В.А., Маракховский Е.А.</i>	
Математическая модель двигателя совмещенной конструкции электропривода сепаратора .....	30
<b>ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА, АВТОМАТИКА И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ .....</b>	<b>39</b>
<i>Андриянов А.И.</i>	
Проектирование импульсных преобразователей постоянного напряжения с учетом динамических нелинейностей .....	39
<b>ИНФОРМАЦИОННОЕ, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ .....</b>	<b>45</b>
<i>Дунаев М.П., Довудов С.У.</i>	
Моделирование потерь мощности в преобразователе частоты .....	45
<i>Серебряков Н.А.</i>	
Применение ансамбля глубоких нейронных сетей в задачах краткосрочного прогнозирования почасового электропотребления гарантирующего поставщика электроэнергии .....	52
<i>Леднов А.В., Муслимов М.Б., Логунова О.С., Худяков П.Ю., Кухта Ю.Б.</i>	
Система централизованного диспетчерского контроля отделением флотации: аксиоматический подход .....	61
<b>МОНИТОРИНГ, КОНТРОЛЬ И ДИАГНОСТИКА ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ .....</b>	<b>68</b>
<i>Кочеганов Д.М., Серебряков А.В., Стеклов А.С.</i>	
Имитационная модель солнечно-ветряной электростанции с нейро-нечеткой системой прогнозирования технического состояния .....	68
<i>Мугалимов Р.Г., Закирова Р.А., Мугалимова А.Р., Боков А.И.</i>	
Программный комплекс для исследования качества стали статора при капитальном ремонте и модернизации асинхронного двигателя .....	76
<b>СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ .....</b>	<b>83</b>

## CONTENT

<b>POWER ENGINEERING.....</b>	<b>4</b>
<i>Pankratov A.V., Zhuykov A.K., Shuvalova A.A., Polishchuk V.I.</i>	
Determination of Static Load Model by Voltage Using Steady-State Measurements Taking into Account the Network Response .....	4
<b>ELECTRIC POWER SUPPLY .....</b>	<b>12</b>
<i>Semenova N.G., Chernova A.D.</i>	
Algorithm for Making a Decision on the Development of an Object of Power Supply Systems .....	12
<b>THEORY AND PRACTICE OF AUTOMATED ELECTRIC DRIVE .....</b>	<b>19</b>
<i>Radionov A.A., Gasiyarov V.R., Loginov B.M., Gartlib E.A., Gasiyarova O.A.</i>	
Digital Controller for Elastic Modulus of an Electromechanical System of a Rolling Mill Stand ...	19
<i>Kashin Ya.M., Kopelevich L.E., Samorodov A.V., Kim V.A., Marakhovskiy E.A.</i>	
Mathematical Model of Combined Configuration Motor of Separator Electric Drive .....	30
<b>POWER ELECTRONICS, AUTOMATION AND CONTROL SYSTEMS .....</b>	<b>39</b>
<i>Andriyanov A.I.</i>	
Design of Pulse-width DC/DC Converters Taking into Account Dynamic Nonlinearity .....	39
<b>TECHNICAL SYSTEMS DATAWARE AND SOFTWARE .....</b>	<b>45</b>
<i>Dunaev M.P., Dovudov S.U.</i>	
Simulation of Power Losses in a Frequency Inverter .....	45
<i>Serebryakov N.A.</i>	
Application of Deep Neural Network Ensemble in a Problem of Short-Term Load Forecasting Guaranteed Electricity Supplier .....	52
<i>Lednov A.V., Muslimov M.B., Logunova O.S., Khudyakov P.Yu., Kukhta Yu.B.</i>	
Centralized Control System of Flotation Department: Axiomatic Approach .....	61
<b>MONITORING, DIAGNOSTICS AND CONTROL OF ELECTRIC EQUIPMENT .....</b>	<b>68</b>
<i>Kochegyanov D.M., Serebryakov A.V., Steklov A.S.</i>	
Simulation Model of a Wind-Solar Power Plant with a Technical Condition Neuro-Fuzzy Forecasting System .....	68
<i>Mugalimov R.G., Zakirova R.A., Mugalimova A.R., Bokov A.I.</i>	
Software Complex for Researching the Stator Steel Quality During Overhauling and Modernization of an Asynchronous Motor .....	76
<b>INFORMATION ABOUT THE AUTHORS .....</b>	<b>83</b>

<sup>1</sup> АО «Системный оператор Единой энергетической системы», г. Томск<sup>2</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет<sup>3</sup> Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, г. Барнаул

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАГРУЗКИ ПО НАПРЯЖЕНИЮ ПО ДАННЫМ ПАССИВНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА С УЧЁТОМ РЕАКЦИИ СЕТИ

Моделирование электрической нагрузки является одной из наиболее трудно решаемых задач моделирования режимов электроэнергетической системы в целом. Это обусловлено как многочисленностью и разнообразием электрических нагрузок, так и их изменчивым поведением. Значительная доля нагрузок не может быть с достаточной точностью описана типовыми характеристиками, поэтому для их уточнения и актуализации в энергосистемах проводятся специальные активные эксперименты. Однако это решает проблему лишь отчасти, так как охватить такими экспериментами все нагрузки во всех возможных состояниях не представляется физически возможным. Целью работы является разработка методики определения статических характеристик нагрузки электроэнергетических систем по напряжению путем математической обработки данных пассивного наблюдения за параметрами электрического режима. Методика основана на разработанной математической модели, учитывающей вероятностный характер изменения мощности нагрузки и напряжения питающей сети, а также корреляционные связи между ними. В общем случае таких корреляционных связей две: изменение мощности нагрузки, вызванное изменением напряжения, и изменение напряжения в точке питания, вызванное изменением мощности нагрузки. Первая связь отражает «естественную» статическую характеристику нагрузки, а вторая – явление, получившее название «реакция сети». Учет «реакции сети» необходим при обработке данных пассивного эксперимента, что предъявляет дополнительные требования к применяемым методикам. Отличием предложенной методики является использование законов распределения вероятности вместо самих измеренных величин. Благодаря этому методика может применяться в сочетании с методами кластерного анализа, представляющими результаты измерений в виде гауссовой смеси. Предложенная методика может быть использована для автоматизации процесса определения статических характеристик нагрузки по данным измерений без проведения активных экспериментов, что в перспективе позволит охватить все телеизмеряемые узлы нагрузки во всех возможных состояниях.

**Ключевые слова:** электроэнергетическая система, статическая характеристика нагрузки, пассивный эксперимент, кластерный анализ, реакция сети, система случайных величин, ковариационная матрица, эллипс рассеивания.

### ВВЕДЕНИЕ

В расчётах установившихся режимов для получения более точных результатов важно иметь модель нагрузки, отражающую её поведение при изменениях параметров режима энергосистемы. На сегодняшний день моделирование нагрузки в современных программных комплексах для расчёта электрических режимов осуществляется с помощью статических характеристик нагрузки по напряжению и частоте (далее – СХН). Как правило, для расчёта установившихся режимов ограничиваются использованием только СХН по напряжению, так как расчёты производят при номинальной частоте электрического тока.

Определение СХН по напряжению может осуществляться расчётным и экспериментальным путём [1-4]. В работах [5-8] авторами подчеркнуто, что в виду значительного разнообразия состава нагрузок и их конфигурации определение СХН расчётным способом на текущий момент времени практически не применяется.

Наиболее точным способом определения СХН по напряжению является проведение экспериментов [9]. Данные эксперименты, в свою очередь, принято разделять на активные и пассивные эксперименты. В каждом случае основная идея заключается в регистрации значений напряжения в питающем узле энергосистемы и соответствующих им значений активной и реактивной мощности нагрузки.

Отличие активных и пассивных экспериментов заключается в характере изменения параметров режима. В случае активных экспериментов осуществляются принудительные изменения параметров режима, под действием которых происходит изменение напряжения питающего узла в максимально возможных пределах. При этом регистрируются величины активной и реактивной мощностей нагрузки. Проведение пассивных экспериментов не подразумевает никакого внешнего вмешательства в режим работы энергосистемы, а регистрируются естественные изменения напряжения.

Активный эксперимент позволяет определить СХН по напряжению наиболее точно. Действительно, как отмечено в [5, 10], точность в активном эксперименте достигается за счёт малой продолжительности эксперимента и широкого диапазона изменения напряжения. Малая продолжительность эксперимента позволяет выбрать такое состояние нагрузки, при котором собственные изменения мощности нагрузки минимальны. Широкий диапазон изменения напряжения повышает обусловленность системы уравнений, по которой могут быть определены коэффициенты СХН [11].

Несмотря на представленные преимущества проведения активного эксперимента, его использование весьма ограничено. Во-первых, как уже было отмечено, происходит вмешательство в режим работы энергосистемы, что может привести к снижению надёжности работы энергосистемы или возникновению аварийной ситуации [7, 12]. Во-вторых, для проведения

активных экспериментов необходимо проводить специальные организационные мероприятия и предварительные расчёты с целью выбора наиболее оптимальной траектории изменения режима.

Отмеченных недостатков не имеет пассивный эксперимент. В пассивном эксперименте точность может быть обеспечена за счёт увеличения объема выборки, так как продолжительность проведения пассивного эксперимента может достигать недель и даже месяцев [12]. В достаточно большом объеме данных нагрузка представлена во всех своих возможных состояниях [6, 13-15], а законы изменения случайных величин проявляются более четко. Это позволяет применять для определения СХН методы теории вероятностей и математической статистики. В частности, линейные СХН по данным пассивного эксперимента определяются с помощью линейной регрессии.

Однако определение СХН с помощью пассивного эксперимента обладает рядом недостатков. Так, из-за малого диапазона изменения напряжения точность определения коэффициентов СХН у пассивного эксперимента будет заведомо ниже, чем у активного [12, 15]. Данный недостаток может быть частично компенсирован, как уже отмечено, большим количеством точек, по которым определяется СХН. Тем не менее, сравнительно точно определить нелинейные СХН по напряжению из-за малого диапазона изменения напряжения не представляется возможным [15]. При этом стоит отметить, что в значительном количестве практических задач по расчёту режимов рассматриваются довольно узкие диапазоны изменения напряжения, где можно ограничиться заданием линейной СХН по напряжению.

Пассивный эксперимент обладает ещё одним существенным недостатком. Для определения СХН по напряжению из экспериментальных данных обычно выполняется статистическая обработка по построению линии регрессии активной  $P$  и реактивной  $Q$  мощностей нагрузки на напряжение  $U$ , совпадающей с линиями СХН. Однако, как отмечено в [4], в случае пассивного эксперимента такая обработка даёт значительную погрешность, так как линии регрессии перестают совпадать с линиями СХН. Причём очень часто возникает ситуация, при которой линии регрессии соответствуют снижению мощности нагрузки при увеличении напряжения, что в подавляющем большинстве случаев не соответствует действительности.

Возникновение такой погрешности связано с тем, что при случайных изменениях мощности нагрузки, которые наблюдаются в пассивном эксперименте, также изменяется напряжение питающего узла за счёт соответствующего изменения падения напряжения. Данное явление изменения напряжения под действием изменения мощности нагрузки получило название «реакция сети» и было рассмотрено Ю.Е. Гуревичем в работах [4, 15]. Им же был предложен способ учёта эффекта реакции сети при обработке результатов пассивного эксперимента.

Однако данный способ обладает рядом недостатков. Во-первых, с его помощью нельзя учесть то обстоятельство, что при проведении пассивного эксперимента нагрузка может находиться в различных состояниях, то есть угол  $\psi$  не является постоянным, и

эллипсов рассеивания, которые образуют экспериментальные данные в плоскостях  $(U, P)$  или  $(U, Q)$  в случае их нормального распределения, может быть выделено несколько. Нормальность распределения случайных колебаний нагрузки продемонстрирована в работах [16-18]. Во-вторых, при учёте реакции сети рассматриваемым способом необходимо осуществлять преобразование всех значений в массивах исходных данных для выполнения аффинного преобразования координат [19], что в случае пассивного эксперимента значительно замедляет обработку данных.

Первый из представленных недостатков может быть устранён путём применения ЕМ-алгоритма кластеризации данных [20]. Применение данного алгоритма оправдано при предположении нормальности распределения экспериментальных данных, которые с использованием данного алгоритма можно аппроксимировать гауссовой смесью [21].

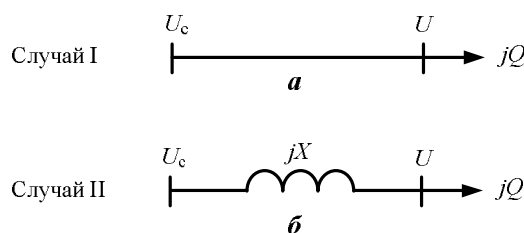
Для устранения второго недостатка в статье предлагается методика учёта реакции сети при определении коэффициентов СХН по результатам пассивного эксперимента путём рассмотрения линейного искажения эллипса рассеивания. Линейность искажения обусловлена малостью колебаний экспериментальных данных вокруг точки математического ожидания при пассивном эксперименте. Такой подход позволяет получить коэффициенты СХН с помощью преобразования параметров распределения, а не самих экспериментальных данных.

В соответствии с этим будет подробно рассмотрено влияние реакции сети на параметры режима в случае простейшей схемы электроснабжения, представляющая корреляционная модель нагрузки, учитывающая реакцию сети, и произведён учёт эффекта реакции сети при определении коэффициентов СХН по напряжению.

#### РЕАКЦИЯ СЕТИ

Для иллюстрации реакции сети можно рассмотреть простейшую схему электроснабжения нагрузки, которая представлена на **рис. 1**.

Исследуемая нагрузка запитана от шин бесконечной мощности (ШБМ) с напряжением  $U_c$ , независимым от величины реактивной нагрузки  $Q$ . В случае I (**рис. 1, а**) реакция сети не проявляется, так как сопротивление между узлом нагрузки и ШБМ отсутствует ( $X = 0$ ), а значит, отсутствует падение напряжения, и  $U_c = U$ . Проявление реакции сети в случае II обусловлено наличием некоторого сопротивления  $X$  между узлом нагрузки и ШБМ (**рис. 1, б**). Для наглядной демонстрации влияния реакции сети сопротивление и нагрузка приняты чисто индуктивными.



**Рис. 1. Простейшая схема электроснабжения:**  
**а** – реакция сети отсутствует (случай I);  
**б** – реакция сети проявляется (случай II)

Напряжение в узле нагрузки и величина потребляемой реактивной мощности в случае II связаны соотношением

$$Q(U) = \frac{U(U_c - U)}{X}, \quad (1)$$

где  $Q$  – реактивная мощность нагрузки, Вт;  $U$  – напряжение в узле нагрузки, В;  $U_c$  – напряжение на шинах бесконечной мощности, В;  $X$  – сопротивление сети, Вт.

Графическая зависимость  $Q(U)$  согласно (1) представляет собой перевернутую параболу с вершиной в точке  $(U_c/2, U_c^2/4X)$ , которая пересекает ось абсцисс в точках 0 и  $U_c$ , как показано на **рис. 2**.

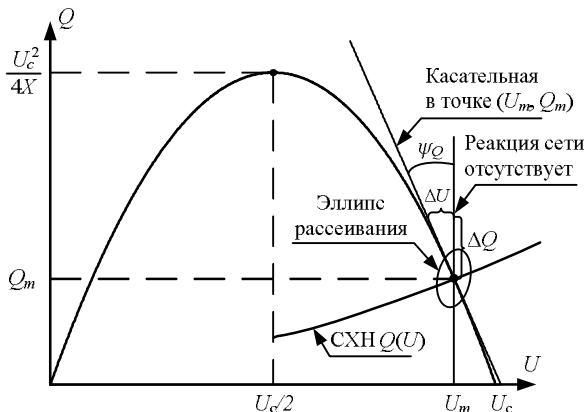


Рис. 2. Демонстрация реакции сети

При  $Q = 0$   $U = U_c$  (здесь и далее рассматривается только рабочий диапазон кривой  $(U_c/2, U_c)$ ), так как падение напряжения на сопротивлении  $X$  в данном случае согласно (1) отсутствует. По мере увеличения реактивной мощности нагрузки  $Q$  от 0 до  $U_c^2/4X$  напряжение  $U$  уменьшается вплоть до величины  $U_c/2$ . Дальнейшее увеличение мощности  $Q$  невозможно, так как функция проходит через свой максимум.

Через рабочую точку  $(U_m, Q_m)$  на **рис. 2** проведена касательная, которая соответствует реакции сети. График реакции сети будет иметь отрицательный наклон  $\psi_Q$ , который можно определить через соотношение

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \psi_Q &= k = \left. \frac{dU}{dQ} \right|_{Q=Q_m} = \frac{X}{\sqrt{U_c^2 - 4Q_m X}} = \\ &= \frac{X}{U_c - 2U_m}, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $k$  – коэффициент, определяющий тангенс угла наклона графика реакции сети к оси ординат (далее – коэффициент реакции сети);  $U_m, Q_m$  – напряжение, В, и реактивная мощность узла нагрузки, Вт, соответственно в рабочей точке характеристики на **рис. 2** (математические ожидания координат точек, описываемых эллипсом рассеивания).

Из **рис. 2** также видно, что в пределах малых изменений напряжения  $\Delta U$  и мощности  $\Delta Q$  влияние эффекта реакции сети можно учесть линейной зависимостью, коэффициент которой определяется по выражению (2).

Также через рабочую точку  $(U_m, Q_m)$  на **рис. 2** проходит линия СХН по напряжению. Как уже отмечалось выше, по результатам пассивного эксперимента определяют линейную СХН, которая в рассматриваемом

случае описывается выражением (3):

$$Q(U) = Q_m \left( b_1 \frac{U}{U_m} + b_0 \right) = B_1 U + B_0, \quad (3)$$

где  $b_0, b_1$  – коэффициенты, характеризующие долю участия составляющих постоянной мощности и постоянного тока, в общей СХН по напряжению в относительных единицах;  $B_0, B_1$  – то же самое, но в именованных единицах.

Стоит отметить, что в выражении (3) величины  $Q, U$  и  $B_0$  являются случайными. Величина  $B_0$  соответствует случайным колебаниям мощности нагрузки, независимым от напряжения  $U$ . Далее рассматривается определение детерминированной величины  $B_1$  по параметрам распределения, а также представлена математическая модель, учитывающая корреляционный характер зависимости  $Q(U)$ .

#### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ (Методы)

Результатами пассивного эксперимента при определении СХН по напряжению для схемы, представленной на **рис. 1, а**, являются вектора измеренных значений напряжения  $U$  и реактивной мощности нагрузки  $Q$  (в общем случае к этим величинам добавляется вектор измеренных значений активной мощности нагрузки  $P$ ). Каждая из этих величин является случайной и в общем случае не одномодальной, а многомодальной величиной. Это означает, что она не может быть описана только одним фундаментальным законом распределения, но может быть представлена в виде суммы некоторого их количества [22]. С физической точки зрения каждому составу и состоянию нагрузки, а также каждому режиму электроснабжения будет соответствовать свой закон распределения, а экспериментальные данные представляют собой смесь законов распределения. На первом этапе анализа необходимо определить, к какому состоянию нагрузки относятся те или иные измерения, а также определить параметры соответствующих законов распределения. Это осуществляется с помощью кластерного анализа. Далее рассматриваются преобразования относительно одного выделенного кластера с соответствующими ему параметрами распределения и коэффициентом реакции сети  $k$ .

Как уже было отмечено,  $U$  и  $Q$  являются взаимозависимыми случайными величинами, которые образуют систему  $(U, Q)$ . Она описывается следующими параметрами [21]:

- $U_m, Q_m$  – математические ожидания;
- $\sigma_U, \sigma_Q$  – среднеквадратические отклонения;
- $r$  – коэффициент корреляции.

Система случайных величин  $(U, Q)$  в случае одномодального распределения и отсутствия реакции сети (случай I) полностью определяется математическим ожиданием  $(U_m, Q_m)$  и ковариационной матрицей  $\mathbf{K}$ :

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} D_U & K_{UQ} \\ K_{UQ} & D_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_U^2 & r\sigma_U\sigma_Q \\ r\sigma_U\sigma_Q & \sigma_Q^2 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где  $D_U, D_Q$  – дисперсия напряжения и реактивной мощности нагрузки соответственно;  $K_{UQ}$  – корреляционный момент между напряжением и реактивной

мощностью нагрузки;  $\sigma_U$ ,  $\sigma_Q$  – среднеквадратическое отклонение напряжения и реактивной мощности нагрузки соответственно;  $r$  – коэффициент корреляции между напряжением и реактивной мощностью.

При графическом отображении на плоскости в координатах  $(U, Q)$  система случайных величин  $(U, Q)$  представляет собой эллипс рассеивания **К** с центром в точке  $(U_m, Q_m)$ , приведённый на **рис. 3**.

Эллипс рассеивания имеет четыре характерных прямых, которые пересекаются в центре рассеивания. Это две оси симметрии эллипса, которые составляют с осью абсцисс углы, определяемые уравнением

$$\operatorname{tg} 2\alpha = \frac{2r\sigma_U\sigma_Q}{\sigma_U^2 - \sigma_Q^2}, \quad (5)$$

где  $\alpha$  – угол между осями симметрии эллипса и осью абсцисс.

Уравнение (5) дает два значения углов  $\alpha$  и  $\alpha_1$ , отличающиеся друг от друга на  $90^\circ$ . Другие две прямые – это линии регрессии  $Q$  на  $U$  и  $U$  на  $Q$ , углы наклона которых к оси абсцисс определяются по выражениям

$$\operatorname{tg} \alpha_Q = r \frac{\sigma_Q}{\sigma_U}; \quad (6)$$

$$\operatorname{tg} \alpha_U = \frac{1}{r} \frac{\sigma_Q}{\sigma_U}, \quad (7)$$

где  $\alpha_Q$  – угол между линией регрессии  $Q$  на  $U$  и осью абсцисс;  $\alpha_U$  – угол между линией регрессии  $U$  на  $Q$  и осью абсцисс.

Коэффициент  $B_1$  в выражении (3) соответствует тангенсу угла наклона линии регрессии  $Q$  на  $U$  к оси абсцисс:  $B_1 = \operatorname{tg} \alpha_Q$ .

Для отражения связи между точками эллипса рассеивания **К**, полученного при условии отсутствия реакции сети (случай I), с точками эллипса рассеивания **К'**, который будет получен при наличии реакции сети (случай II), рассмотрим математическую модель нагрузки, отражающую корреляционную зависимость между мощностью нагрузки  $Q$  и напряжением  $U$  и их связь с аналогичными значениями ( $Q'$  и  $U'$ ), полученными при наличии реакции сети.

Корреляционная зависимость между  $Q$  и  $U$  обеспечивается за счёт задаваемых параметров нормального распределения, с помощью которых можно рассчитать коэффициент  $B_1 = \operatorname{tg} \alpha_Q$  по выражению (6).

В случае отсутствия реакции сети при случайном изменении мощности нагрузки от  $Q_m$  до  $Q_1$  напряжение не изменится, и состояние нагрузки, в исходном режиме описываемое точкой  $A$  с координатами  $(U_m, Q_m)$ , будет описываться точкой  $B$  с координатами  $(U_m, Q_1)$  (**рис. 4**).

Наличие реакции сети приводит к тому, что при увеличении мощности в узле нагрузки увеличивается падение напряжения на сопротивлении  $X$  (**рис. 1, б**). При этом уменьшенному относительно  $U_m$  значению из-за падения напряжения напряжению  $U'$  в узле нагрузки будет соответствовать уменьшенное значение мощности нагрузки  $Q'$  (точка  $C$ ).

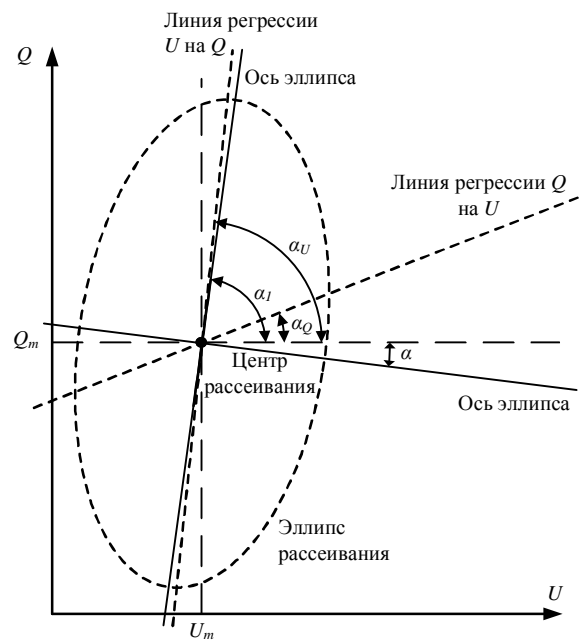


Рис. 3. Эллипс рассеивания при  $k = 0$

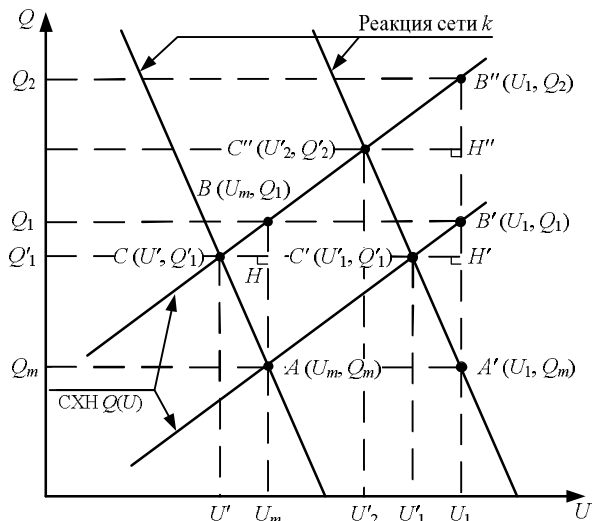


Рис. 4. Пояснения к математической модели

Аналогичные рассуждения применимы и в тех случаях, когда происходит случайное изменение напряжения (система точек  $AA'B'C'$ ), и в тех случаях, когда происходят одновременно случайные изменения напряжения и мощности (система точек  $AA'B''C''$ ).

Осуществив геометрические преобразования в каждом из случаев, можно получить общую систему уравнений (8), которая отражает связь между  $U$  и  $U'$  а также  $Q$  и  $Q'$ :

$$\begin{cases} U'_i = U_i + \frac{Q_i - Q_m}{k^{-1} - B_1}; \\ Q'_i = Q_i + \frac{B_1(Q_i - Q_m)}{k^{-1} - B_1}, \end{cases} \quad (8)$$

где  $i$  – индекс точки на плоскости  $(U, Q)$ .

Система уравнений (8) позволяет осуществить переход от системы случайных величин  $(U, Q)$ , соответствующей отсутствию реакции сети (случай I) к системе случайных величин  $(U', Q')$ , полученной при наличии

реакции сети (случай II). Для определения СХН с учётом реакции сети необходимо решить обратную задачу: имея массивы  $U'$  и  $Q'$ , перейти к массивам  $U$  и  $Q$ , а затем, используя формулу (5), вычислить коэффициент крутизны линейной СХН в именованных единицах  $B_1$ .

#### ОПРЕДЕЛЕНИЕ СХН ПО НАПРЯЖЕНИЮ С УЧЁТОМ РЕАКЦИИ СЕТИ (РЕЗУЛЬТАТЫ)

На рис. 5 представлены результаты моделирования систем случайных величин  $(U, Q)$  и  $(U', Q')$ , связанных между собой системой уравнений (8) и подчиняющимися нормальному закону распределения.

Из результатов моделирования на рис. 5 видно, что линия регрессии и  $Q$  на  $U$ , построенная для системы случайных величин  $(U', Q')$ , из-за наличия реакции сети не совпадает с заданной СХН. При этом также видно, что тестовые точки при любых значениях напряжения располагаются на линии СХН, что говорит о корректности проведённого моделирования.

Как уже отмечено выше, для получения СХН по напряжению необходимо перейти к системе случайных величин  $(U, Q)$  без реакции сети, что позволит определить СХН через коэффициент наклона линии регрессии для полученной системы.

Дисперсия случайной величины  $Q$  может быть выражена через дисперсию случайной величины  $Q'$  с учётом реакции сети по выражению

$$D_Q = D'_Q (1 - kB_1)^2, \quad (9)$$

где  $D_Q$  – дисперсия случайной величины  $Q$ ;  $D'_Q$  – дисперсия случайной величины  $Q'$ .

Корреляционный момент системы случайных величин  $(U, Q)$  можно определить по соотношению

$$K_{UQ} = (K'_{UQ} - kD'_Q)(1 - kB_1), \quad (10)$$

где  $K_{UQ}$  – корреляционный момент системы случайных величин  $(U, Q)$ ;  $K'_{UQ}$  – корреляционный момент системы случайных величин  $(U', Q')$ .

Из первого выражения системы (8), а также согласно [21] из выражения (9) дисперсия случайной величины  $U$  может быть вычислена по формуле

$$D_U = D'_U + k^2 D'_Q - 2kK'_{UQ}, \quad (11)$$

где  $D_U$  – дисперсия случайной величины  $U$ ;  $D'_U$  – дисперсия случайной величины  $Q'$ .

Таким образом, система случайных величин  $(U, Q)$  с учётом реакции сети описывается математическим ожиданием  $(U_m, Q_m)$  и ковариационной матрицей  $\mathbf{K}$ :

$$\mathbf{K} = \begin{vmatrix} D'_U + k^2 D'_Q - 2kK'_{UQ} & (K'_{UQ} - kD'_Q)(1 - kB_1) \\ (K'_{UQ} - kD'_Q)(1 - kB_1) & D'_Q (1 - kB_1)^2 \end{vmatrix}. \quad (12)$$

Тогда тангенс угла наклона  $\text{tg} \alpha_Q$  к оси абсцисс линии регрессии  $Q$  на  $U$ , согласно (5), будет определяться соотношением

$$\text{tg} \alpha_Q = \frac{(K'_{UQ} - kD'_Q)(1 - kB_1)}{D'_U - k^2 D'_Q - 2k(K'_{UQ} - kD'_Q)}. \quad (13)$$

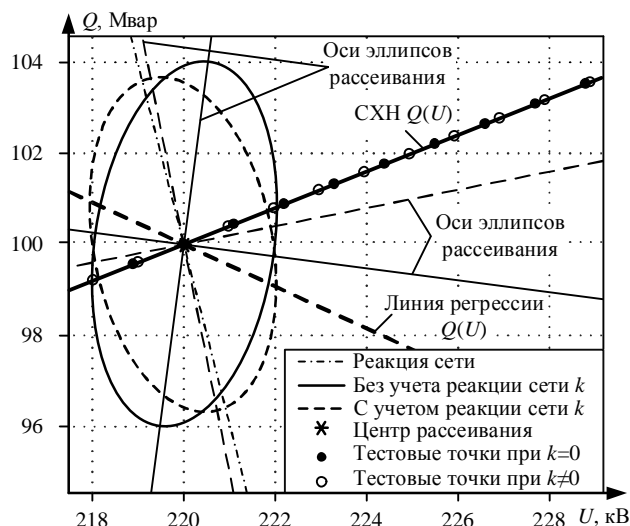


Рис. 5. Демонстрация реакции сети

Из (13) путём преобразований с учётом того, что  $B_1 = \text{tg} \alpha_Q$  следует выражение (14) для определения коэффициента  $B_1$  СХН по напряжению:

$$B_1 = \frac{K'_{UQ} - kD'_Q}{D'_U - kK'_{UQ}}. \quad (14)$$

Составляющая СХН  $B_0$  может быть вычислена по формуле

$$B_0 = Q_m - B_1 U_m. \quad (15)$$

Полученные значения  $B_1$  и  $B_0$  являются искомыми значениями регулирующего эффекта нагрузки ( $B_1$ ) и составляющей СХН, соответствующей постоянству мощности ( $B_0$ ) в именованных единицах.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Учёт реакции сети позволяет получить достоверные значения коэффициентов СХН в именованных единицах. Расчёт коэффициентов СХН по методике, предложенной Ю.Е. Гуревичем, показал результаты, которые совпадают с результатами методики, описанной в статье. Однако предложенный в настоящей статье метод может применяться для многомодальных распределений с предварительной кластеризацией данных по ЕМ-алгоритму, что нельзя осуществить с помощью существующих методик. Кроме того, за счёт отсутствия необходимости в предварительном преобразовании исходных данных можно добиться большего быстродействия при автоматизации процесса расчёта СХН по напряжению по результатам пассивного эксперимента.

В качестве развития предложенной методики планируется показать применение предложенной методики в случае многомодального распределения на примере реальных данных. Также планируется разработать методику определения коэффициента реакции сети  $k$  с учётом статистических данных для каждого кластера.

Стоит отметить, что предложенная в настоящей статье методика может применяться и в случаях более сложных по сравнению с рассмотренной схемой электроснабжения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гуревич Ю.Е., Либова Л.Е., Хачатрян Э.А. Устойчивость нагрузки электрических систем. М.: Энергоиздат, 1981. 209 с.
2. Нигаматуллин Р.М. Расчёт доли регулирующего эффекта нагрузки в отклонении напряжения на распределительной шине // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2020. Т. 18. №4. С. 65-70. doi: 10.18503/1995-2732-2020-18-4-65-70.
3. Газизова О.В., Нигаматуллин Р.М. Оценка влияния статических характеристик нагрузки на уровень частоты сети при раздельной работе с энергосистемой // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Сер. Энергетика. 2020. Т. 20. № 4. С. 54-63. doi: 10.14529/power200406.
4. Гуревич Ю.Е., Либова Л.Е. Применение математических моделей электрической нагрузки в расчетах устойчивости энергосистем и надежности электроснабжения промышленных потребителей. М.: ЭЛЕКС-КМ, 2008. 246 с.
5. Кондрашов М.А., Кондрашова А.Ю. Программное обеспечение для идентификации фактических статических характеристик нагрузки по напряжению крупных потребителей // Прикладная информатика. 2018. Т. 13. №5(77). С. 44-50.
6. Тавлинцев А.С. Развитие методов идентификации статических характеристик комплексного узла нагрузки: дис. ... канд. техн. наук 05.14.02 / Тавлинцев Александр Сергеевич. Екатеринбург, 2018. 172 с.
7. Дзюба М.А., Тарасенко В.В., Коржов А.В. Метод определения статических характеристик нагрузки по напряжению с учетом ограничений по режимным параметрам и электробезопасности активного эксперимента // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Сер. Энергетика. 2018. Т. 18. № 2. С. 28-35. doi: 10.14529/power180204.
8. Кондрашов М.А., Попов М.Г. Профили информационного обмена для задачи идентификации статических характеристик нагрузки // Электроэнергетика глазами молодежи: материалы XI Международной научно-технической конференции. Ставрополь: Северо-Кавказский федеральный университет, 2020. С. 30-31.
9. Панкратов А.В., Полищук В.И., Бацева Н.Л. Экспериментальное определение статических характеристик нагрузки электроэнергетических систем // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Сер. Энергетика. 2015. Т. 15. № 1. С. 11-20. doi: 10.14529/power150102.
10. Определение статических характеристик мощности нагрузок узлов сети на основе активного эксперимента / В.Ф. Кравченко, В.И. Нагай, И.Ф. Бураков, Б.П. Золотов // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2015. № 1(182). С. 54-59.
11. Методика идентификации статических характеристик нагрузки по результатам активного эксперимента / Ю.В. Хрущев, А.В. Панкратов, Н.Л. Бацева, В.И. Полищук, А.С. Тавлинцев // Известия Томского политехнического университета. 2014. Т. 325. № 4. С. 164-175.
12. Экспериментальные исследования режимов энергосистем / Л.М. Горбунова, М.Г. Портной, Р.С. Рабинович, С.А. Савалов, В.Ф. Тимченко. М.: Энергоатомиздат, 1985. 448 с.
13. Коновалов Ю.С., Кутелевичус И.Б. О возможности определения статических характеристик нагрузки методами математической статистики // Электричество. 1968. №3. С. 11-13.
14. Тавлинцев А.С., Суворов А.А. Статистически равновесные состояния нагрузки в задаче идентификации статических характеристик нагрузки // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Сер. Энергетика. 2017. Т. 17. № 2. С. 23-28. doi: 10.14529/power170203.
15. Гуревич Ю.Е., Либова Л.Е. Об определении характеристик нагрузки по напряжению методом пассивного эксперимента // Электричество. 1972. №2. С. 21-24.
16. Козлов В.А. Электроснабжение городов. М.: Энергия, 1977. 280 с.
17. Оценка значений пиков и впадин при ограничении пределов изменения тэта-ординат графиков электрической нагрузки / В.П. Степанов, Е.А. Кротков, А.С. Ведерников, А.В. Гудков, Р.Ф. Идиатуллин // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. 2005. №37. С. 121-127.
18. Петров В.В. Предельные теоремы классического типа для сумм независимых случайных величин // Итоги науки и техники Сер. Современные проблемы математики. Фундаментальные направления. 1991. Т. 81. С. 10-38.
19. Понарин Я.П. Аффинная и проективная геометрия. М.: МЦНМО, 2009. 288 с.
20. Воронцов К. В., Потапенко А. А. Модификации EM-алгоритма для вероятностного тематического моделирования // Машинное обучение и анализ данных. 2013. Т. 1. № 6. С. 657-686.
21. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. М.: Высшая школа, 2001. 575 с.
22. Жмылёв С.А., Алиев Т.И. Системы массового обслуживания с полимодальными потоками // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2018. Т. 18. № 3. С. 473-478. doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-3-473-478.

Поступила в редакцию 31 марта 2021 г.

## INFORMATION IN ENGLISH

# DETERMINATION OF STATIC LOAD MODEL BY VOLTAGE USING STEADY-STATE MEASUREMENTS TAKING INTO ACCOUNT THE NETWORK RESPONSE

Aleksey V. Pankratov

Ph.D. (Engineering), Head of Tomsk Representative Office, System Operator of the United Power System, JSC, Tomsk, Russia. E-mail: pankratovav@kuzb.so-ups.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8176-1925>.

Alexander K. Zhuykov

Undergraduate Student, Power and Electrical Engineering Department, National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia. E-mail: zhuykov\_aleksandr@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5333-1661>.

Alena A. Shuvalova

Post-Graduate student, Power Engineering Faculty, Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia. E-mail: alena\_shuvalova\_360@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0104-1085>.

Vladimir I. Polishchuk

D.Sc. (Engineering), Professor, Dean, Power Engineering Faculty, Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia. E-mail: polischuk\_vi@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8100-4406>.

Simulation of electric load is one of the most difficult modeling problems of operating condition of the electric power system. It is stipulated by a large number and a variety of electrical loads and their erratic behavior. The considerable share of loads cannot be described with sufficient accuracy by typical characteristics. To refine and actualize them, special staged field tests are carried out in power systems. This does not completely solve the problem. It is impossible to cover all loads in all possible states with such experiments. The purpose of the work is to develop a method for determining the static load model of electric power systems by voltage. The determination is made by mathematical processing of the data of steady-state observation over the parameters of an electrical mode. The method is based on the developed mathematical model considering probability nature of changes in the load power and the supply network voltage as well as the correlations between them. There are two such correlations. Changing the load power caused by a voltage variation. And also a voltage variation at the supply point caused by the change in the load power. The first correlation reflects the natural static load model. The second correlation reflects the "network response". Taking into account the "network reaction" is necessary when processing data from the steady-state measurement. The difference of the proposed method is usage of laws of probability distribution instead of the measured values. This makes it possible to use the method in combination with cluster analysis methods. In these methods, the measurement results are presented in the form of a Gaussian mixture. The proposed method can be used to automate the process of determining the static load models according to the measurements without conducting staged field tests. This will make it possible to cover all the telemetered nodes of load in all possible states in the future.

**Keywords:** electric power system, static load model, steady-state measurements, cluster analysis, network response, system of random variables, covariance matrix, dispersion ellipse.

#### REFERENCES

- Gurevich Yu.E., Libova L.E., Khachatryan E.A. *Ustichivost nagruzki elektricheskikh system* [Load stability of electrical systems], Moscow, Energoizdat Publ., 1981, 209 p. (In Russian)
- Nigamatullin R.M. alculatoin of a Share of the Load Regulating Effect in the Distribution Busbar Voltage Deviation. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2020, vol. 18, no. 4, pp. 65-70. doi: 10.18503/1995-2732-2020-18-4-65-70. (In Russian)
- Gazizova O.V., Nigamatullin R.M. Evaluation of The Effect of Static Load Characteristics on The Level of Frequency During Separate Operations with The Grid. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika* [Bulletin of the South Ural State University. Series "Power Engineering"], 2020, vol. 20, no. 4, pp. 54-63. doi: 10.14529/power200406. (In Russian)
- Gurevich Yu.E., Libova L.E. *Primenenie matematicheskikh modeley elektricheskoy nagruzki v raschetakh ustoychivosti energosistem i nadezhnosti elektrosnabzheniya promyshlennikh potrebiteley* [Application of mathematical models of electric load in calculations of power systems and reliability of power supply to industrial consumers]. Moscow, ELEX\_KM Publ., 2008, 246 p. (In Russian)
- Kondrashov M.A., Kondrashova A.Yu. Software for identifying the actual static load characteristics by the voltage of large consumers. *Prikladnaya informatika* [Journal of Applied Informatics], 2018, vol. 13, no. 5(77), pp. 44-50. (In Russian)
- Tavlintsev A.S. *Razvitie metodov identifikatsii staticheskikh harakteristik kompleksnogo uzla nagruzki*. Kand. Diss. [Development of methods for identifying the static characteristics of a complex load node: Kand. Diss.], Ekaterinburg, 2018. 172 p.
- Dzyuba M.A., Tarasenko V.V., Korzhov A.V. Method for Determining of Voltage Steady-State Load Characteristics with Subject to The Limitation on Sensitive Parameters and Electrical Safety of Active Experiment. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika* [Bulletin of South Ural State University. Series "Power Engineering"], 2018, vol. 18, no. 2 pp. 28-35. doi: 10.14529/power180204. (In Russian)
- Kondrashov M.A., Popov M.G. Information exchange profiles for the task of identifying static load characteristics. *Elektro-energetika glazami molodezhi: Materialy XI Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii* ["Electric power industry through the eyes of youth". Materials of the XI International Scientific and Technical Conference.]. Stavropol, North Caucasus Federal University Publ., 2020, pp. 30-31. (In Russian)
- Pankratov A.V., Polishchuk V.I., Batseva N.L. Experimental determination of static load characteristics of electric power systems. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika* [Bulletin of South Ural State University. Series "Power Engineering"], 2015, vol. 15, no. 1, pp. 11-20. doi: 10.14529/power150102. (In Russian)
- Kravchenko V.F., Nagai V.I., Burakov I.F., Zoloev B.P. Determination of Static Characteristics of Power Loads of Network Nodes Based on The Active Experiment. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Severo-Kavkazskij region. Tekhnicheskie nauki* [University News. North-Caucasian Region. Technical Sciences Series], 2015, no. 1 (182), pp. 54-59. (In Russian)
- Khrushchev Yu.V., Pankratov A.V., Batseva N.L., Polishchuk V.I., Tavlintsev A.S. The technique for identifying load static characteristics based on experimental data. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University], 2014, vol. 325, no. 4, pp. 164-175. (In Russian)
- Gorbunova L.M., Portnoy M.G., Rabinovich R.S., Sovalov S.A., Timchenko V.F. *Ekspperimentalnye issledovaniya rezhimov energosistem* [Experimental studies of the modes of energy systems]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1985, 448 p. (In Russian)
- Konovalov Yu.S., Kugelevichus I.B. On the possibility of determining the static characteristics of the load by methods of mathematical statistics. *Elektrichestvo* [Electricity], 1968, no. 3, pp. 11-13. (In Russian)
- Tavlintsev A.S., Suvorov A.A. Statistically equilibrium states of load in the problem of static load characteristics identification. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika* [Bulletin of South Ural State University. Series "Power Engineering"], 2017, vol. 17, no. 2, pp. 23-28. doi: 10.14529/power170203. (In Russian)
- Gurevich Yu.E., Libova L.E. On determining the characteristics of the load by voltage by the method of steady-state measurements. *Elektrichestvo* [Electricity], 1972, no. 2, pp. 21-24. (In Russian)
- Kozlov V.A. *Elektrosnabzhenie gorodov* [Power supply of cities]. Moscow, Energy Publishing House, 1977, 280 p. (In Russian)

17. Stepanov V.P., Krotkov E.A., Vedernikov A.S., Gudkov A.V., Idiatulin R.F. Estimation of the values of peaks and troughs when limiting the limits of changes in the theta ordinates of electrical load graphs. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki* [Vestnik of Samara State Technical University. Technical Sciences Series], 2005, no. 37, pp. 121-127. (In Russian)
18. Petrov V.V. Limiting theorems of classical type for sums of independent random variables. *Itogi nauki i tekhn. Ser. Sovrem. probl. mat. Fundam. Napravleniya* [Results of science and technology. Series: modern problems of mat. fundamental direction], 1991, vol. 81, pp. 10-38. (In Russian)
19. Ponarin Ya.P. *Afinnaya i proektivnaya geometriya* [Affine and projective geometry]. Moscow, Moscow Center for Continuing Mathematical Education Publ., 2009. 288 p. (In Russian)
20. Vorontsov K.V., Potapenko A.A. Modifications of the EM algorithm for probabilistic thematic modeling. *Mashinnoe obuchenie i analiz dannyh* [Machine learning and data analysis], 2013, vol. 1, no. 6, pp. 657-686. (In Russian)
21. Wentzel E.S. *Teoriya veroyatnostey* [Probability theory]. Moscow, High School Publ., 2001. 575 p. (In Russian)
22. Zhmylev S.A., Aliev T.I. Queuing systems with polymodal flows. *Nauchno-tekhnicheskij vestnik informacionnyh tekhnologij, mekhaniki i optiki* [Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics], 2018, vol. 18, no. 3, pp. 473-478. doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-3-473-478. (In Russian)

Определение статических характеристик нагрузки по напряжению по данным пассивного эксперимента с учётом реакции сети / А.В. Панкратов, А.К. Жуйков, А.А. Шувалова, В.И. Полищук // Электротехнические системы и комплексы. 2021. № 2(51). С. 4-11. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-2\(51\)-4-11](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-2(51)-4-11)

Pankratov A.V., Zhuykov A.K., Shuvalova A.A., Polishchuk V.I. Determination of Static Load Model by Voltage Using Steady-State Measurements Taking into Account the Network Response. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2021, no. 2(51), pp. 4-11. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-2\(51\)-4-11](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-2(51)-4-11)

## АЛГОРИТМ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ ПО РАЗВИТИЮ ОБЪЕКТА СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Предложена структурная схема процесса принятия решения по выбору предпочтительной альтернативы по развитию системы электроснабжения (СЭС) района области, состоящая из локального и глобального уровней. Представлены основные этапы и операционные действия алгоритма процесса принятия решения по развитию объекта СЭС на локальном уровне: формирование альтернатив с использованием базы данных параметров основного оборудования; оценка альтернатив по частным критериям; выбор наилучшей альтернативы по результатам их ранжирования. Формирование альтернатив по развитию объектов СЭС предложено осуществлять с учетом индекса технического состояния каждой единицы оборудования. Для объекта, оборудование которого подлежит замене, формируются альтернативы путем декартова произведения множеств номенклатурных параметров этого оборудования. Многокритериальное оценивание каждого объекта СЭС осуществлено с использованием системы частных критериев: экономического (суммарных дисконтированных затрат на замену оборудования), технического (годовой потери электроэнергии в элементах объекта СЭС), технико-экономического (ущерба от перерыва в электроснабжении), социально-экологического (площади изымаемых земель), технико-эксплуатационного (унификации номенклатуры используемого оборудования). Расчет технико-экономического критерия предложено осуществлять с помощью самоорганизующихся карт Кохонена. Ранжирование альтернатив по развитию объектов СЭС осуществлено посредством искусственной нейронной сети (ИНС), обученной алгоритмом обратного распространения ошибки. Для этого определена архитектура ИНС на основе F-меры. Наилучший результат составил  $F=0,98$  для алгоритма тренировки Левенберга-Марквардта при числе нейронов в трех скрытых слоях 6, 18 и 26 соответственно. Представлены результаты программно реализованного алгоритма принятия решения по развитию объекта СЭС на примере подстанции «Степановская» Оренбургской области.

**Ключевые слова:** системы электроснабжения, альтернатива развития, принятие решения.

## ВВЕДЕНИЕ

Одним из важнейших показателей электроэнергетики страны является техническое состояние систем электроснабжения. СЭС имеют следующие особенности, которые необходимо учитывать при оценке их вариантов развития:

1) высокая степень износа оборудования (парк изношенного оборудования составляет в некоторых районных СЭС более 50 и даже 70%);

2) большой объем номенклатуры современного оборудования с разными технико-экономическими характеристиками;

3) необходимость учета возросших социально-экономических требований к СЭС и финансовых ограничений;

4) множество формируемых возможных вариантов (альтернатив) развития СЭС.

Под развитием СЭС понимаем совокупность мероприятий (сценариев развития) по техническому перевооружению или реконструкции оборудования СЭС, направленных на повышение энергоэффективности функционирования СЭС.

На основании вышесказанного актуальным и значимым становится разработка и внедрение автоматизированных систем по выбору приоритетной альтернативы развития СЭС [1], использование которых позволит: обрабатывать большие объемы информации с возможностью ранжирования вариантов развития СЭС и учетом возросших социально-экономических требований; сократить время на принятие решения; повысить обоснованность принятого решения за счет всестороннего анализа и оценки каждой сгенерированной

альтернативы развития СЭС.

Анализ научных исследований в области разработки автоматизированных систем по развитию СЭС позволил условно выделить следующие направления:

– оптимизация системы электроснабжения в условиях неопределенности [2] с использованием методов нечеткой логики для определения стратегий развития, многокритериальной оптимизации и экспертных оценок для выбора наилучшего варианта;

– выбор пунктов размещения подстанций глубокого ввода с учетом неопределенности роста нагрузки [3] с использованием многокритериальной оптимизации путем сведения нескольких критериев к одному;

– выбор конфигурации электрической сети методами дискретной оптимизации по критерию минимума потерь с возможностью использования в мультиагентных системах [4, 5];

– расчет, анализ и оптимизация потерь электроэнергии в сетях электроснабжения промышленного предприятия с учетом многокритериальных оценок мероприятий [6];

– оптимизация функционирования и развития систем электроснабжения городов на основе метода средневзвешенной нормализованной оценки [7-9];

– оценки состояния оборудования систем электроснабжения [10,11] при помощи обученной искусственной нейронной сети.

За рубежом ведется активная разработка автоматизированных систем принятия решения в сферах, касающихся гидроэнергетики [12], Smart Grid [13], проектов по ремонту электрических сетей [14], реконфигурации системы распределения энергии, энергетического менеджмента [5].

# ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для СЭС района области характерными являются иерархичная структура, многосвязанность и вложенность объектов. Как отмечено в [15], возникновение иерархической структуры в любой сложной системе определяет необходимость разделения процесса выбора наилучшей альтернативы на такое число уровней, чтобы «решение задачи оптимизации на каждом из них было не сложным».

В связи с вышесказанным в исследовании предложено рассматривать двухуровневую структуру принятия решения: на первом (локальном) уровне осуществляется выбор предпочтительных альтернатив развития объекта СЭС, а на втором (глобальном) – выбор приоритетной альтернативы развития СЭС района, формируемой из предпочтительных альтернатив развития объектов СЭС с учетом финансового ограничения инвестиционной программы. В работе под СЭС района области понимается совокупность технологически взаимосвязанных объектов СЭС, расположенных на одной территории и обслуживаемых одним структурным подразделением, а под объектом СЭС – совокупность подстанций и питающих их линий электропередач.

Анализ литературы в области теории принятия решения позволил выявить следующие основные этапы принятия решения [15]: формирование альтернатив; оценка альтернатив; выбор приоритетной альтернативы. Авторами предложено адаптировать классический процесс принятия решения в соответствии с целью исследования, выделив на каждом этапе принятия решения операционные действия (рис. 1).

Рассмотрим предложенную структуру процесса принятия решения применительно для локального уровня.

## ВЫБОР ПРЕДПОЧТИТЕЛЬНОЙ АЛЬТЕРНАТИВЫ НА ЛОКАЛЬНОМ УРОВНЕ

### 1-й этап «Формирование альтернатив».

#### 1.1. Разработка базы данных.

В работе предлагается разрабатывать базу данных реляционного типа, которая позволяет структурировать номенклатуру оборудования объектов СЭС по основным их свойствам, характеристикам и параметрам, с установлением семантических связей между ними. Примером основных рассматриваемых сущностей являются: «Количество линий»  $L\{l_1, l_2, \dots, l_m\}$ ; «Расстояние до источника питания»  $D\{d_1, d_2, \dots, d_z\}$ ; «Тип проводника»  $W\{w_1, w_2, \dots, w_n\}$ ; «Количество цепей»  $C\{c_1, c_2, \dots, c_k\}$ ; «Тип опоры»  $P\{p_1, p_2, \dots, p_j\}$ ; «Сечение провода»  $F\{f_1, f_2, \dots, f_g\}$ ; «Номер схемы подстанции»  $S\{s_1, s_2, \dots, s_i\}$ ; «Тип выключателя» для стороны высшего и низшего напряжения подстанции  $B_{вн}\{b_{вн1}, b_{вн2}, \dots, b_{внh}\}$  и  $B_{нн}\{b_{нн1}, b_{нн2}, \dots, b_{ннh}\}$ ; «Мощность трансформатора»  $T\{t_1, t_2, \dots, t_v\}$  [16].

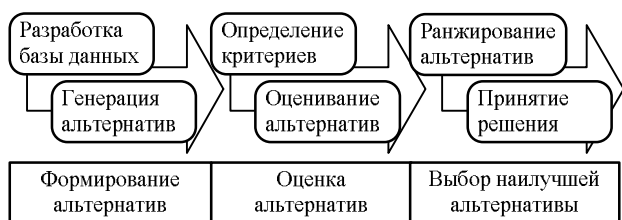


Рис. 1. Этапы и операционные действия процесса принятия решения по развитию СЭС

### 1.2. Генерация альтернатив.

Генерация альтернатив подразумевает формирование кортежей, включающих в себя вариативные совокупности параметров элементов оборудования СЭС. Для этого в работе предложено использовать циклический перебор, в ходе которого согласуются элементы множеств оборудования и осуществляется проверка соответствия действующего оборудования уровню перспективной нагрузки. Преимуществом циклического перебора, используемого в данной работе, является определение всех возможных вариантов развития объекта СЭС. Определяя декартово произведение согласованных номенклатурных данных объекта СЭС, формируется множество альтернатив развития:

$$A\{A_1, A_2, \dots, A_q\} = L \cdot D \cdot W \cdot C \cdot P \cdot F \cdot S \cdot B_{вн} \cdot T \cdot B_{нн}. \quad (1)$$

Каждая из альтернатив представляет собой кортеж длиной 10:

$$A_q\{d_z, w_n, l_m, c_k, f_g, p_j, s_i, b_{внh}, t_v, b_{ннh}\} | l_m \in L \wedge d_z \in D \wedge w_n \in W \wedge c_k \in C \wedge p_j \in P \wedge f_g \in F \wedge s_i \in S \wedge b_{внh} \in B_{вн} \wedge t_v \in T \wedge b_{ннh} \in B_{нн}. \quad (2)$$

Генерация альтернатив осуществляется с учетом индекса технического состояния (ИТС) каждой единицы оборудования [17].

Индекс технического состояния предлагается определять на основании методик, изложенных в нормативных документах [17, 18], формализация которых может быть представлена следующим образом:

$$ИТС_{об} = \begin{cases} 50 | \sum KBy_i \cdot ИТСy_i > 50, ИТСy_i < 25; \\ \sum KBy_i \cdot ИТСy_i, \end{cases} \quad (3)$$

где  $KBy_i$  – весовой коэффициент функционального узла оборудования  $i$ ;  $ИТСy_i$  – индекс технического состояния узла  $i$ .

Выбор сценария развития для каждого объекта СЭС зависит от индекса технического состояния объекта и осуществляется в соответствии с системой неравенств, представленных ниже:

- если  $S_{max} < 100\%$ ,  $k_{р.н} \leq 1$  и  $0 < ИТС \leq 50$ , то техническое перевооружение СЭС;
- если  $S_{max} < 100\%$ ,  $k_{р.н} \leq 1$  и  $50 < ИТС \leq 70$ , то реконструкция СЭС;
- если  $S_{max} \sim 100\%$ ,  $k_{р.н} > 1$ ,  $ИТС = \forall$ , то техническое перевооружение СЭС,

где  $S_{max}$  – максимальная нагрузка оборудования объекта СЭС, определяемая исходя из установленной мощности оборудования и уровня перспективной расчетной нагрузки, %;  $k_{р.н}$  – коэффициент роста нагрузки, определяемый исходя из уровня перспективной расчетной нагрузки и нагрузки в текущем периоде.

### 2-й этап «Оценка альтернатив».

Второй этап локального уровня состоит из следующих операционных действий:

#### 2.1. Определение критериев.

Система электроснабжения – динамично развивающаяся система. Для нее характерен непрерывный

рост нагрузок, обусловленный появлением новых потребителей, увеличением степени электрификации, необходимости учета экономических, технических, социальных, экологических и других требований. В связи с этим оценку развития каждого объекта СЭС предлагается осуществлять на основе многокритериальной модели оценивания.

В качестве системы частных критериев оценки альтернатив по развитию объекта СЭС предложено использовать следующие критерии: экономический (суммарных дисконтированных затрат); технический (годовой потери электроэнергии); технико-экономический (экономических потерь от нарушения в электроснабжении); социально-экологический (площадь изымаемых земель); технико-эксплуатационный (унификации оборудования) [2, 16].

Разработку математических моделей частных критериев оценки альтернатив предложено осуществлять на основе нормативных документов в области электроэнергетики, а также с учетом типизации номенклатурных параметров оборудования. Разработка математических моделей частных критериев подробно изложена в работах авторов [2, 16]. В данной статье представим окончательные результаты:

– технический критерий:

$$\Delta W = \Delta W_{XX} + \Delta W_{нагр.Т} + \Delta W_{пост.ПС} + \Delta W_{пост.Л} + \Delta W_{нагр.Л}, \quad (4)$$

где  $\Delta W_{XX}$ ,  $\Delta W_{нагр.Т}$  – постоянные и нагрузочные потери в трансформаторах;  $\Delta W_{пост.ПС}$  – укрупненные постоянные потери электроэнергии на подстанции;  $\Delta W_{пост.Л}$ ,  $\Delta W_{нагр.Л}$  – укрупненные постоянные и нагрузочные потери электроэнергии в линиях;

– экономический критерий:

$$Z = \sum_{t=0}^{t_{ТПР}} (K_{Лт} + K_{ПСт} + K_{дем} - K_{ост}) (1 + E_n)^{-t} + \sum_{t=t_{ТПР}}^{t_{эсп}} a_{обсл} (K_{Лт} + K_{ПСт}) (1 + E_n)^{-t}, \quad (5)$$

где  $K_{Лт}$  – капиталовложения при сооружении линий на  $t$ -м году;  $K_{ПСт}$  – капиталовложения при сооружении подстанций на  $t$ -м году;  $K_{дем}$  – стоимость демонтажа оборудования на  $t$ -м году;  $K_{ост}$  – остаточная стоимость оборудования на  $t$ -м году;  $E_n$  – нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений;  $a_{обсл}$  – норма отчислений на текущий ремонт и обслуживание;  $t_{ТПР}$  и  $t_{эсп}$  – текущие годы ТПИР и эксплуатации объекта;

– технико-экономический критерий:

$$Y = P_{\max} (Y_0 + Y_{недопост}) \cdot (K_{В1} + 0,5 K_{В2}) + \sum_{i=1}^k 3_{рем,i}^{ав} P_i \omega_i, \quad (6)$$

где  $P_{\max}$  – максимальная мощность потребителей;  $Y_0$  – удельный ущерб от перерыва электроснабжения;  $Y_{недопост}$  – неполученные доходы от передачи электрической энергии потребителям;  $K_{В1}$  и  $K_{В2}$  – коэффициенты вынужденного простоя в случае полного прекращения электроснабжения потребителей и потребителей, подключенных к одной из секций подстанции соответственно;  $3_{рем,i}^{ав}$  – стоимость восстановления поврежденного оборудования;  $p$  – число единиц одно-

типного оборудования;  $\omega$  – частота отказов оборудования;  $k$  – число типов оборудования;

– социально-экологический критерий:

$$S = S_{пл.Л} L + S_{пл.ПС}, \quad (7)$$

где  $S_{пл.Л}$  – площадь отвода земли для типовых опор на 1 км воздушной линии (ВЛ);  $L$  – длина ВЛ;  $S_{пл.ПС}$  – площадь отвода земли под подстанцию;

– технико-эксплуатационный критерий, значение которого позволяет оценить альтернативу развития объекта СЭС по частоте использования выбранного оборудования в существующей практике эксплуатации.

Значение этого критерия определяется посредством:

1) Нахождения количества и размера кластеров, (каждый кластер включает в себя объекты СЭС, имеющих сравнительно одинаковое по типоразмеру оборудование) и определение значений критерия унификации оборудования для каждого из них.

Определение количества и размера кластеров предложено осуществлять с помощью самоорганизующихся карт Кохонена. Значение критерия унификации оборудования  $N$  определяется как

$$N = \frac{n_i}{O}, \quad (8)$$

где  $n_i$  – число объектов СЭС, имеющих сравнительно одинаковое по типоразмеру оборудование и вошедших в  $i$ -й кластер;  $O$  – общее количество рассматриваемых объектов СЭС.

Результат кластеризации 268 объектов СЭС Оренбургской области представлен на **рис. 2**. В 1-й кластер вошло 58 объектов СЭС, во 2-й – 40 объектов СЭС, в 3-й – 21 объект СЭС, в 4-й – 149. Соответственно, коэффициенты унификации были равны:  $N_1 = 0,22$ ;  $N_2 = 0,149$ ;  $N_3 = 0,08$ ;  $N_4 = 0,56$ .

2) Распределения альтернатив развития объектов СЭС по кластерам.

Распределение предложено осуществлять с помощью искусственной нейронной сети (ИНС), состоящей из входного слоя с числом нейронов, равным размеру кортежа альтернативы развития объекта СЭС, одного скрытого и выходного слоя. Количество нейронов в выходном слое равно количеству кластеров. Нейроны в выходном слое могут принимать значения 0 или 1: 0 – альтернатива не принадлежит данному кластеру; 1 – альтернатива принадлежит данному кластеру.

3) Присвоения соответствующего значения технико-эксплуатационного критерия каждой альтернативе развития объекта СЭС.

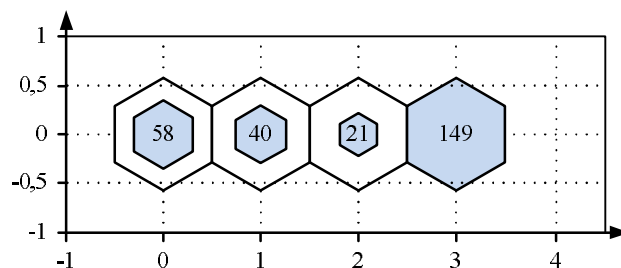


Рис. 2. Результат кластеризации объектов СЭС района

Значение технико-эксплуатационного критерия каждой альтернативы развития объекта СЭС будет соответствовать значению критерия унификации оборудования кластера  $N_i$ , в который распределена альтернатива.

## 2.2. Оценивание альтернативы.

Многокритериальное оценивание альтернативы развития каждого объекта СЭС авторами предлагается осуществлять либо с помощью теории нечетких множеств, либо с помощью искусственной нейронной сети. Применение теории нечетких множеств подробно изложено в работах [2, 3]. В данном исследовании рассмотрим применение ИНС для оценивания альтернатив каждого объекта СЭС Оренбургской области.

Для обучения ИНС использовалась совокупность векторов входных значений, состоящих из критериев оценки альтернативы  $X$ , и соответствующих им выходных значений коэффициента предпочтительности  $T$ :

$$(X^i, T^i), \quad (9)$$

где  $i$  – номер обучающей альтернативы;  $T$  – единичный выходной вектор, являющийся коэффициентом предпочтительности альтернативы. Он характеризует степень принадлежности альтернатив к классу предпочтительных или нецелесообразных решений, изменяется в пределах от 0 до 1;  $X$  – входной вектор, содержащий критерии, приведенные к единичной мощности:

$$X^i = \left\{ \frac{C^i}{P}, \frac{\Delta W^i}{P}, \frac{Y^i}{P}, \frac{S^i}{P}, N^i \right\}. \quad (10)$$

В работе для обучения ИНС общее количество примеров составило 2180, из них количество подстанций СЭС Оренбургской области, отнесенных к множеству предпочтительных решений составляла 250, а к множеству нецелесообразных решений – 1930.

Далее экспериментально были определены архитектура ИНС и алгоритм обучения на основе таких метрик, как доля правильных ответов и F-мера, представляющая среднее гармоническое точности и полноты принятия решения. В эксперименте использовались нейронные сети с двумя и тремя скрытыми слоями, с числом нейронов в них от 2 до 30, а также сравнивались между собой 5 алгоритмов тренировки ИНС: упругого обратного распространения; Левенберга-Марквардта; градиентного спуска с адаптивным обучением; Квази-Ньютоновского; шкалированных связанных градиентов. Наилучший результат составил  $F=0,98$  для алгоритма тренировки Левенберга-Марквардта при числе нейронов в трех скрытых слоях 6, 18, 26 соответственно. Доля правильных ответов ИНС составила 99,03%.

## 3-й этап «Выбор наилучшей (предпочтительной) альтернативы».

### 3.1. Ранжирование альтернатив.

Альтернативы для каждого объекта СЭС ранжируются по значению коэффициента предпочтительности, которое определяет ИНС.

### 3.2. Принятие решения.

Предпочтительной альтернативой развития объекта СЭС считается альтернатива, имеющая наибольшее значение коэффициента предпочтительности.

Разработанный алгоритм принятия решения по выбору предпочтительной альтернативы развития объекта СЭС представлен в виде диаграммы активностей в нотации UML на рис. 3.

Разработанный алгоритм был программно реализован, получено свидетельство о государственной регистрации [19].

На рис. 4 представлен интерфейс окна для ввода исходных данных об объекте СЭС и расчета ИТС оборудования. На рис. 5 представлен результат формирования, оценки и ранжирования сгенерированных альтернатив развития для ПС «Степановская». Время генерации 54 альтернатив для ПС «Степановская», их оценки и ранжирования составило 4 секунды.

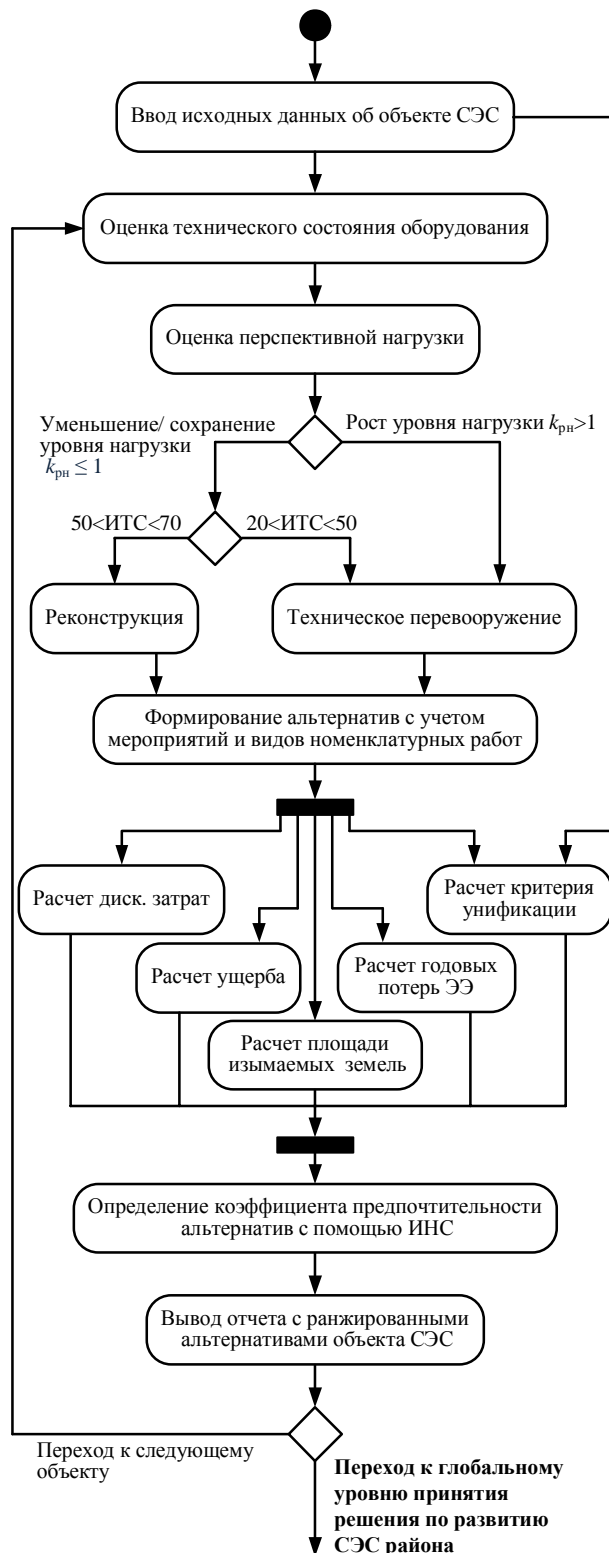


Рис. 3. Алгоритм принятия решения по развитию объекта СЭС

Проект База данных О программе

Название подстанции: Степановская РЭС ЦПО

Характеристики источника и ЛЭП

Выберите источник питания:   
 Напряжение источника питания:   
 Выберите схему питания:   
 Расстояние до источника питания: км   
 Тип ЛЭП:   
 Тип опор:   
 Число цепей:   
 Сечение фазы:   
 Тип изоляции:   
 Осложняющие условия:   
☐ Трасса в городе км   
☐ Болотистый участок км   
☐ Горный участок км   
 Добавить Удалить

Название	Способ присоединения	Расстояние, км	Тип ЛЭП
ВЛ Оренбургская-Каргалинская	Радиальная	5	Воздуш

Сохранить Очистить

Характеристики потребителя

Потребляемая активная мощность: 7490 кВт   
 Вид основного потребителя: Жилищно-коммунальный с   
 Категория надежности потребителя: Вторая   
 Уровень напряжения потребителя 1 (НН): 10   
 Уровень напряжения потребителя 2 (СН): 35   
 Число часов использования максимума нагрузки: 7280

Характеристики подстанции

Типовая схема: 4Н   
 Тип выключателей:   
 Тип выключателя ВН: Масляный бак   
 Тип выключателя СН: Маломасляный   
 Тип выключателя НН: Маломасляный   
 Мощность трансформатора: 10 МВА   
 Тип вводов: Герметичный ввод

Ввод параметров ТС состояния оборудования

Расчет частных критериев

Рис. 4. Интерфейс окна ввода исходных данных об объекте СЭС

Источн	Тип про	Nл	Nц	Тип опоры	Сеч	Источн	Тип прс	Nц	Тип опоры	Сечение	Тип схем	Моу	Тип тр-р	Тип вык ВН	Тип вык НН1	Затраты тыс.руб	Потери тыс.кВтч	Ущерб тыс.руб/год	Площадь м2	Унифи	Коэф. предп
Каргалинская	ВЛ	2	1	ЖБ	120	Оренбургская	ВЛ	1	ЖБ	150	5Н	25	Элегазовый ОРУ	Вакуумный	Вакуумный	244159.80	930.77	102.33	814	0.08	1.00
Каргалинская	ВЛ	2	1	ЖБ	120	Оренбургская	ВЛ	1	ЖБ	150	5АН	25	Элегазовый ОРУ	Вакуумный	Вакуумный	244159.80	930.77	87.20	814	0.08	1.00
Каргалинская	ВЛ	2	1	ЖБ	120	Оренбургская	ВЛ	1	ЖБ	150	4Н	25	Элегазовый ОРУ	Вакуумный	Вакуумный	244159.80	929.67	92.66	799	0.08	1.00
Каргалинская	ВЛ	2	1	ЖБ	120	Оренбургская	ВЛ	1	ЖБ	150	5Н	25	Элегазовый ОРУ	Элегазовый	Элегазовый	251884.23	930.77	105.00	814	0.08	1.00
Каргалинская	ВЛ	2	1	ЖБ	120	Оренбургская	ВЛ	1	ЖБ	150	5АН	25	Элегазовый ОРУ	Элегазовый	Элегазовый	251884.23	930.77	89.75	814	0.08	1.00
Каргалинская	ВЛ	2	1	ЖБ	120	Оренбургская	ВЛ	1	ЖБ	150	4Н	25	Элегазовый ОРУ	Элегазовый	Элегазовый	251884.23	929.67	95.88	799	0.08	1.00
Каргалинская	ВЛ	2	1	ЖБ	120	Оренбургская	ВЛ	1	ЖБ	150	5Н	25	Вакуумный	Вакуумный	Вакуумный	247650.05	930.77	95.46	814	0.22	0.78
Каргалинская	ВЛ	2	1	ЖБ	120	Оренбургская	ВЛ	1	ЖБ	150	5АН	25	Вакуумный	Вакуумный	Вакуумный	247650.05	930.77	82.88	814	0.22	0.78
Каргалинская	ВЛ	2	1	ЖБ	120	Оренбургская	ВЛ	1	ЖБ	150	5Н	25	Вакуумный	Маломасляный	Маломасляный	248364.70	930.77	97.00	814	0.22	0.78
Каргалинская	ВЛ	2	1	ЖБ	120	Оренбургская	ВЛ	1	ЖБ	150	5АН	25	Вакуумный	Маломасляный	Маломасляный	248364.70	930.77	84.40	814	0.22	0.78
Каргалинская	ВЛ	2	1	ЖБ	120	Оренбургская	ВЛ	1	ЖБ	150	4Н	25	Вакуумный	Вакуумный	Вакуумный	247650.05	929.67	86.40	799	0.22	0.78
Каргалинская	ВЛ	2	1	ЖБ	120	Оренбургская	ВЛ	1	ЖБ	150	4Н	25	Вакуумный	Маломасляный	Маломасляный	248364.70	929.67	88.33	799	0.22	0.78
Каргалинская	ВЛ	2	1	ЖБ	120	Оренбургская	ВЛ	1	ЖБ	150	5Н	25	Вакуумный	Элегазовый	Элегазовый	255374.48	930.77	98.12	814	0.22	0.77
Каргалинская	ВЛ	2	1	ЖБ	120	Оренбургская	ВЛ	1	ЖБ	150	5АН	25	Вакуумный	Элегазовый	Элегазовый	255374.48	930.77	85.43	814	0.22	0.77
Каргалинская	ВЛ	2	1	ЖБ	120	Оренбургская	ВЛ	1	ЖБ	150	4Н	25	Вакуумный	Элегазовый	Элегазовый	255374.48	929.67	89.56	799	0.22	0.77
Каргалинская	ВЛ	2	1	ЖБ	120	Оренбургская	ВЛ	1	ЖБ	150	5Н	25	Элегазовый ОРУ	Маломасляный	Маломасляный	244874.45	930.77	103.88	814	0.56	0.00
Каргалинская	ВЛ	2	1	ЖБ	120	Оренбургская	ВЛ	1	ЖБ	150	5АН	25	Элегазовый ОРУ	Маломасляный	Маломасляный	244874.45	930.77	88.72	814	0.56	0.00
Каргалинская	ВЛ	2	1	ЖБ	120	Оренбургская	ВЛ	1	ЖБ	150	4Н	25	Элегазовый ОРУ	Маломасляный	Маломасляный	244874.45	929.67	94.71	799	0.56	0.00

Выбор лучшей альтернативы Параметры интеллектуального выбора Сохранить

Рис. 5. Интерфейс окна результатов формирования, оценки и ранжирования сгенерированных альтернатив развития

Полученные на выходе программы характеристики сгенерированных альтернатив и критерии их оценки являются входными для реализации глобального уровня принятия решения по развитию СЭС района области.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложена двухуровневая структурная схема принятия решения по развитию систем электроснабжения района области, содержащая: локальный уровень принятия решения по выбору предпочтительных альтернатив развития каждого объекта СЭС; глобальный уровень принятия решения по выбору приоритетной альтернативы развития СЭС района, формируемой из предпочтительных альтернатив развития объектов СЭС. На каждом уровне выделены следующие этапы: формирование альтернативы; оценка альтернатив; выбор наилучшей альтернативы.

2. Предложено для оценки альтернатив по развитию объектов СЭС использовать следующие частные критерии: экономический (суммарных дисконтированных затрат); технический (годовой потери электроэнергии); технико-экономический (экономических потерь от нарушения в электроснабжении); социально-экологический (площадь изымаемых земель); технико-

эксплуатационный (унификации оборудования).

3. Предложено осуществлять расчет технико-экономического критерия с помощью ИНС. Для этого существующие решения типизируются с помощью самоорганизующихся карт Кохонена. Затем сгенерированные альтернативы классифицируются по получившимся кластерам с помощью однослойной искусственной нейронной сети, обученной методом обратного распространения ошибки.

4. Ранжирование альтернатив по развитию объектов СЭС предложено осуществлять посредством искусственной нейронной сети, обученной алгоритмом обратного распространения ошибки. Для этого была экспериментально определена архитектура ИНС посредством метрики эффективности принятия решения - F-мера. Наилучший результат составил  $F=0,98$  для алгоритма тренировки Левенберга-Марквардта при числе нейронов в трех скрытых слоях 6, 18 и 26 соответственно.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ada S., Ghaffarzadeh M. Decision making based on management information system and decision support system // European Researcher. 2015. Vol. 93. Iss. 4. Pp. 260-269. doi:10.13187/er.2015.93.260.

2. Бердин А.С., Семенова Л.А. Интеграция технoценoлoгическoгo пoдxoдa и теoрии нечетких мнoжеств в зaдaчax oптимизaции систем электроснабжения // Известия вузов. Проблемы энергетикa. 2010. №3-4. С. 151-156.
3. Лещинская Т.Б., Глазунов А.А., Шведов Г.В. Алгоритм решения многокритериальных задач оптимизации с неопределенной информацией на примере выбора оптимальной мощности глубокого ввода высокого напряжения // Электричество. 2004. № 10. С. 8-14.
4. Application of decision support system to three gorges cascade hydropower station/ J. Liao, L. He, X. Yuan, H. Li // Second International Conference on Genetic and Evolutionary Computing. IEEE, 2008. Vol. 2. Pp. 500-503. doi:10.1109/WGEC.2008.80.
5. Andervazh M.R., Javadi S., Aliabadi M.H. Decision support system for multicriteria reconfiguration of power distribution systems using CSO and efficient graph traversal and repository management techniques // International Transaction Electrical Energy Systems. 2018. Iss. 8. e2579. doi:10.1002/ETEP.2579.
6. Flores W.C., Mombell E.E., Jardini J.A. Expert system for the assessment of power transformer insulation condition based on type 2 fuzzy logic systems // Expert Systems with Applications. 2011. Vol. 38. Iss. 7. Pp. 8119-8127. doi:10.1016/j.eswa.2010.12.153.
7. Fuzzy neural networks' application for substation integral state assessment / A.I. Khalyasmaa, S.A. Dmitriev, S.E. Kokin, S.A. Eroshenko // WIT Transactions on Ecology and the Environment. 2014. Vol. 190. Pp. 599-605. doi: 10.2495/EQ140581.
8. UV Spectrophotometer Based AI Techniques for Remnant Life Estimation of Power Transformers/ S. Ram, A. Chandel, G. Singh, M. Mondal // IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering (IOSR-JEEE). 2012. Vol. 3. Pp. 46-55. doi:10.9790/1676-0334655.
9. Khal'yasmaa A.I., Dmitriev S.A., Kokin S.E. An automated system for taking decisions to assess the actual state of electrical equipment // Power technology and Engineering. 2016. Vol. 49. Pp. 389-392. doi:10.1007/S10749-016-0634-6.
10. Khalyasmaa A.I., Dmitriev S.A. Power equipment technical state assessment principles // Applied Mechanics and Materials. 2014. Vol. 492. Pp. 531-535. doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.492.531.
11. Development of 110-220 kV power transformer model for equipment functional state assessment system / A.I. Khal'yasmaa, S.A. Dmitriev, S.E. Kokin, D.A. Glushkov, P. Kuzin // Advanced Materials Research. 2014. Vol. 960-961. Pp. 1347-1351. doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.960-961.1347.
12. A decision support system for planning and operation of maintenance and customer services in electric power distribution systems/ C.H. Barriquello, V.J. Garcia, M. Schmitz, D. Bernardon, J.S. Fonini // System Reliability (London: IntechOpen). 2017. Pp. 355-370. doi:10.5772/intechopen.69721.
13. Jones L.E. Strategies and decision support systems for integrative variable energy resources in control centers for reliable grid operations. Washington DC: Alstom Grid, 2012. 222 p.
14. A decision support system for electricity distribution network refurbishment projects / B. Ramsay, A. McPherson, R. Eastwood, C. Ozveren, S. Glare, J. Oatley // Electric Power Systems Research. 1997. Vol. 40. Pp. 27-35. doi:10.1016/S0378-7796(96)01129-7.
15. Алтунин А.Е., Семухин М.В. Модели и алгоритмы принятия решений в нечетких условиях: монография. Тюмень: Изд-во Тюменского государственного университета, 2000. 352 с.
16. Семенова Н.Г., Чернова, А.Д. Выбор предпочтительного решения по развитию электрических сетей на основе нейросетевых технологий // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». 2018. Т. 18, № 3. С. 38-45. doi: 10.14529/power180305.
17. Приказ Министерства энергетики РФ от 26 июля 2017 г. № 676 «Об утверждении методики оценки технического состояния основного технологического оборудования и линий электропередачи электрических станций и электрических сетей». URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71679722/> (дата обращения 12.04.2021)
18. Постановление Правительства РФ от 19.12.2016 №1401 «О комплексном определении показателей технико-экономического состояния объектов электроэнергетики, в том числе показателей физического износа и энергетической эффективности объектов электросетевого хозяйства, и об осуществлении мониторинга таких показателей». URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_209223/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_209223/) (дата обращения 12.04.2021)
19. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2017611536. Программа расчета критериев оценки альтернатив развития систем электроснабжения / Чернова А.Д.; правообладатель ФГБОУ ВО «Оренбург. гос. ун-т»; заявл. 22.02.2017, опубл. 10.04.2017.

Поступила в редакцию 12 апреля 2021 г.

## INFORMATION IN ENGLISH

### ALGORITHM FOR MAKING A DECISION ON THE DEVELOPMENT OF AN OBJECT OF POWER SUPPLY SYSTEMS

Natalya G. Semenova

Doctor of Education, Ph.D. (Engineering), Professor, Department of Automated Electric Drive, Electromechanics and Electrical Engineering, Orenburg State University, Orenburg, Russia. E-mail: [ng\\_sem@mail.ru](mailto:ng_sem@mail.ru). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6539-4616>.

Anastasia D. Chernova

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Department of Electric Power and Heat Power Engineering, Orenburg State University, Orenburg, Russia. E-mail: [Fiara@inbox.ru](mailto:Fiara@inbox.ru). ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5123-9220>.

A block diagram of the decision-making process for choosing the preferred alternative for the development of the power supply system of the district of the region is proposed. It consists of local and global levels. The algorithm of the decision-making process for the development of an object of the power supply system at the local level is presented. Its main stages and operational actions are outlined. The choice of a scenario for the development of an object of the power supply system is to be

made based on the index of the technical condition of the equipment and the value of the maximum load of the equipment. Multi-criteria evaluation and ranking of alternatives for the development of objects of the power supply system are proposed to be carried out by means of an artificial neural network (ANN). The ANN is trained by the error back propagation algorithm. For this purpose, the ANN architecture based on the F-measure is defined. The best result was  $F=0.98$  for the Levenberg -

Marquardt training algorithm with the number of neurons in the three hidden layers 6, 18, and 26, respectively. The results of a software-implemented decision-making algorithm for the development of a power supply system facility are presented.

**Keywords:** power supply system, alternative development, decision-making.

# REFERENCES

1. Ada S., Ghaffarzadeh M. Decision making based on management information system and decision support system. *European Researcher*. 2015. Vol. 93. Iss. 4. Pp. 260-269. doi:10.13187/er.2015.93.260.
2. Berdin A.S., Semenova L.A. Integration of the technocological approach and the theory of fuzzy sets in the problems of optimization of power supply systems. *IzvestiyaVuzov. Problemyenergetiki* [Power engineering: research, equipment, technology], 2010, vol 3-4, pp. 151-156. (In Russian).
3. Leshchinskaya T.B., Glazunov A.A., Shvedov G.V. Algorithm for solving multicriteria optimization problems with uncertain information on the example of choosing the optimal power of high-voltage deep input. *Elektrichestvo* [Electricity], 2004, vol. 10, pp. 8-14. (In Russian).
4. Liao J., He L., Yuan X., Li H. Application of decision support system to three gorges cascade hydropower station. *Second International Conference on Genetic and Evolutionary Computing. IEEE*, 2008, vol. 2, pp. 500-503. doi:10.1109/WGEC.2008.80
5. Andervazh M.R., Javadi S., Aliabadi M.H. Decision support system for multicriteria reconfiguration of power distribution systems using CSO and efficient graph traversal and repository management techniques. *International Transaction Electrical Energy Systems*. 2018. Iss. 8. e2579. doi:10.1002/ETEP.2579.
6. Flores W.C., Mombell E.E., Jardini J.A. Expert system for the assessment of power transformer insulation condition based on type 2 fuzzy logic systems. *Expert Systems with Applications: An International Journal*. 2011. Vol. 38. Iss. 7. Pp. 8119-8127. doi:10.1016/j.eswa.2010.12.153
7. Khalyasmaa A.I., Dmitriev S.A., Kokin S.E., Eroshenko S.A. Fuzzy neural networks' application for substation integral state assessment. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*. 2014. Vol. 190. Pp. 599-605. doi: 10.2495/EQ140581
8. Ram S., Chandel A., Singh G., Mondal M. UV Spectrophotometer Based AI Techniques for Remnant Life Estimation of Power Transformers. *IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering (IOSR-JEEE)*. 2012. Vol. 3. Pp. 46-55. doi:10.9790/1676-0334655
9. Khalyasmaa A.I., Dmitriev S.A., Kokin S.E. An automated system for taking decisions to assess the actual state of electrical equipment. *Power technology and Engineering*. 2016. Vol. 49. Pp. 389-392. doi:10.1007/S10749-016-0634-6
10. Khalyasmaa A.I., Dmitriev S.A. Power equipment technical state assessment principles. *Applied Mechanics and Materials*. 2014. Vol. 492. Pp. 531-535. doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.492.531
11. Khalyasmaa A.I., Dmitriev S.A., Kokin S.E., Glushkov D.A., Kuzin P. Development of 110-220 kV power transformer model for equipment functional state assessment system. *Advanced Materials Research*. 2014. Vol. 960-961. Pp.1347-1351. doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.960-961.1347
12. Barriquello C.H., Garcia V.J., Schmitz M., Bernardon D., Fonini J.S. A decision support system for planning and operation of maintenance and customer services in electric power distribution systems. *System Reliability. IntechOpen*, 2017. Pp.355-370. doi:10.5772/intechopen.69721
13. Jones L.E. Strategies and decision support systems for integrative variable energy resources in control centers for reliable grid operations. Washington DC, Alstom Grid, 2012. 222 p.
14. Ramsay B., McPherson A., Eastwood R., Ozveren C., Glare S., Oatley J. A decision support system for electricity distribution network refurbishment projects. *Electric Power Systems Research*. 1997. Vol. 40. Pp. 27-35. doi:10.1016/S0378-7796(96)01129-7
15. Altunin A.Y., Semukhin M.V. *Modeli i algoritmy prinyatiya resheniy v nechetkikh usloviyakh* [Decision Models and Algorithms in Fuzzy Conditions]. Tyumen: Publishing house of Tyumen State University, 2000, 352p. (In Russian).
16. Semenova N.G., Chernova A.D. Selecting the Preferred Solution on Development of Electrical Supply System Based on Technology of Neural Networks. *VestnikYUrGU Seriya: Energetika* [Bulletin of South Ural State University. Series "Power Engineering"], 2018, vol. 18, no 3, pp. 38-45. doi: 10.14529/power180305. (In Russian).
17. *Prikaz Ministerstva jenergetiki RF ot 26 ijulja 2017 g. № 676 "Ob utverzhdenii metodiki ocenki tehničeskogo sostojanija osnovnogo tehnologičeskogo oborudovanija i linij jelektricheskij jelektricheskij stancij i jelektricheskij setej"* [Order of the Ministry of Energy of the Russian Federation of July 26, 2017 No. 676 "On approval of the methodology for assessing the condition of the main technological equipment and power transmission of stations and electric networks"]. Available at: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71679722/> (accessed 12 April 2021)
18. *Postanovlenie Pravitel'stva RF ot 19.12.2016 №1401 "O kompleksnom opredelenii pokazatelej tehniko-jekonomičeskogo sostojanija ob'ektov jelektricheskij jelektricheskij stancij i jelektricheskij setej"* [Decree of the Government of the Russian Federation of December 19, 2016 No. 1401 "On the comprehensive determination of indicators of the technical and economic condition of electric power facilities, including indicators of physical deterioration and energy efficiency of power grid facilities, and on monitoring such indicators"]. Available at: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_209223/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_209223/) (accessed 12 April 2021)
19. Chernova A.D. *Programma rasčeta kriteriev ocenki al'ternativ razvitija sistem jelektricheskij stancij i jelektricheskij setej* [Program for calculating criteria for evaluating alternatives for the development of power supply systems]. Computer program RF, no. 2017611536, 2017.

Семенова Н.Г., Чернова А.Д. Алгоритм принятия решения по развитию объекта систем электроснабжения // Электротехнические системы и комплексы. 2021. № 2(51). С. 12-18. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-2\(51\)-12-18](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-2(51)-12-18)

Semenova N.G., Chernova A.D. Algorithm for Making a Decision on the Development of an Object of Power Supply Systems. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2021, no. 2(51), pp. 12-18. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-2\(51\)-12-18](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-2(51)-12-18)

## ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

УДК 621.311+621.34.001

[https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-2\(51\)-19-29](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-2(51)-19-29)Радионов А.А.<sup>1</sup>, Гасияров Р.В.<sup>1</sup>, Логинов Б.М.<sup>2</sup>, Гартлиб Е.А.<sup>1</sup>, Гасиярова О.А.<sup>1</sup><sup>1</sup> Южно-Уральский государственный университет (НИУ), г. Челябинск<sup>2</sup> ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат»

## РАЗРАБОТКА ЦИФРОВОГО НАБЛЮДАТЕЛЯ УПРУГОГО МОМЕНТА ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ КЛЕТИ ПРОКАТНОГО СТАНА

Обоснована задача разработки наблюдателя упругого момента приводного вала (шпинделя) и скорости вала электромеханической системы клетки толстолистового прокатного стана. Рассмотрена конструкция главной линии горизонтальной клетки стана 5000 ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (ПАО «ММК»). Приведены осциллограммы, подтверждающие колебательный характер упругого момента на шпинделе в момент захвата металла валками. Показано, что его амплитуда в несколько раз превышает установившийся момент прокатки. Рассмотрена структура модели двухмассовой электромеханической системы с упругой связью и угловым зазором в соединениях. Записаны уравнения в пространстве состояний, на основе которых разработан наблюдатель координат второй массы (валка) и момента упругого вала по параметрам первой массы: моменту и скорости двигателя электропривода. Представлена структура наблюдателя, основной проблемой при его настройке является обеспечение высокого быстродействия для восстановления переходных процессов в режиме ударного приложения нагрузки. Отмечено, что известные наблюдатели, являющиеся вычислителями координат со сложными алгоритмами, не обладают необходимым быстродействием. Предложен подход, суть которого заключается в симуляции процессов на модели с последующей прямой настройкой на объекте. Рассмотрены переходные процессы восстановленных координат двухмассовой системы при отработке захвата металла валками. Дано сравнение с экспериментальными осциллограммами, полученными на стане. Подтверждено совпадение процессов с удовлетворительной точностью. Представлены обобщенные результаты, полученные при анализе восстановленных зависимостей и экспериментально снятых осциллограмм упругого момента при прокатке заготовок различной толщины. Сделаны выводы о существенном влиянии толщины раската и составляющей, обусловленной упругими свойствами вала, на амплитуду момента на шпинделе. Рекомендовано применение разработанного наблюдателя в системах замкнутого регулирования упругого момента, определены направления их разработки. Отмечено, что необходимым условием эффективной работы таких систем является обеспечение захвата металла при предварительно замкнутых угловых зазорах.

**Ключевые слова:** прокатный стан, электромеханическая система, двухмассовая модель, координаты, наблюдатель, динамические процессы, восстановление, осциллограммы, анализ, рекомендации.

## ВВЕДЕНИЕ

Согласно определению, данному в [1], наблюдатель состояния – это модель, подключенная параллельно объекту управления и получающая непрерывную информацию об изменениях регулирующего воздействия и регулируемой координаты. Это определение соответствует понятию «цифровая тень», которое в публикации [2] названо частным случаем цифрового двойника. При использовании наблюдателя в систему не добавляются новые информационные каналы, только в регулятор вводится корректирующее устройство, в результате чего образуется новый регулятор, работающий в обычной одноконтурной системе [1].

В публикациях [3–5] отмечается, что задача разработки наблюдателей координат двухмассовых электромеханических систем изначально была поставлена для электроприводов прокатных станов. Однако эту задачу нельзя считать до конца решенной. Например, с развитием технологии толстолистовых станов возникают проблемы, обусловленные недостаточным исследованием колебательных процессов в двухмассовых системах главных линий клетей, оснащенных сверхмощными индивидуальными электроприводами. К исследуемым процессам относятся:

– ударные нагрузки, приводящие к усталостному

разрушению механического оборудования;

– вибрации, возникающие как в валопроводах клетей, так и в электромеханических системах, жестко связанных через прокатываемый металл;

– неустойчивая работа систем управления, обусловленная выходом электроприводов в режим ограничения по моменту, и другие неприятные явления.

В представленной публикации выполняется разработка наблюдателя координат электромеханических систем реверсивной клетки толстолистового стана 5000 ПАО «ММК» (далее – стан 5000). Передача вращения от двигателей на валки осуществляется с помощью универсальных шпинделей слипперного (выдвижного) типа, показанных на **рис. 1, а**. Непосредственно сочленение вала со шпинделем осуществляется с помощью головки специальной конструкции, которая крепится к рабочему валу. Аналогичная головка устанавливается со стороны двигателя. Вал шпинделя имеет шлицевую конструкцию с балансировочными цилиндрами для компенсации осевого смещения при сдвиге валков *CVCplus* [6, 7]. Опорный подшипник расположен в районе середины вала.

Главные электроприводы верхнего и нижнего валков (ВГП и НГП) выполнены индивидуальными с синхронными двигателями и частотным регулированием скорости. Упрощенная структурная схема системы автоматического регулирования (САР) скоростей приведена на **рис. 1, б** [8].

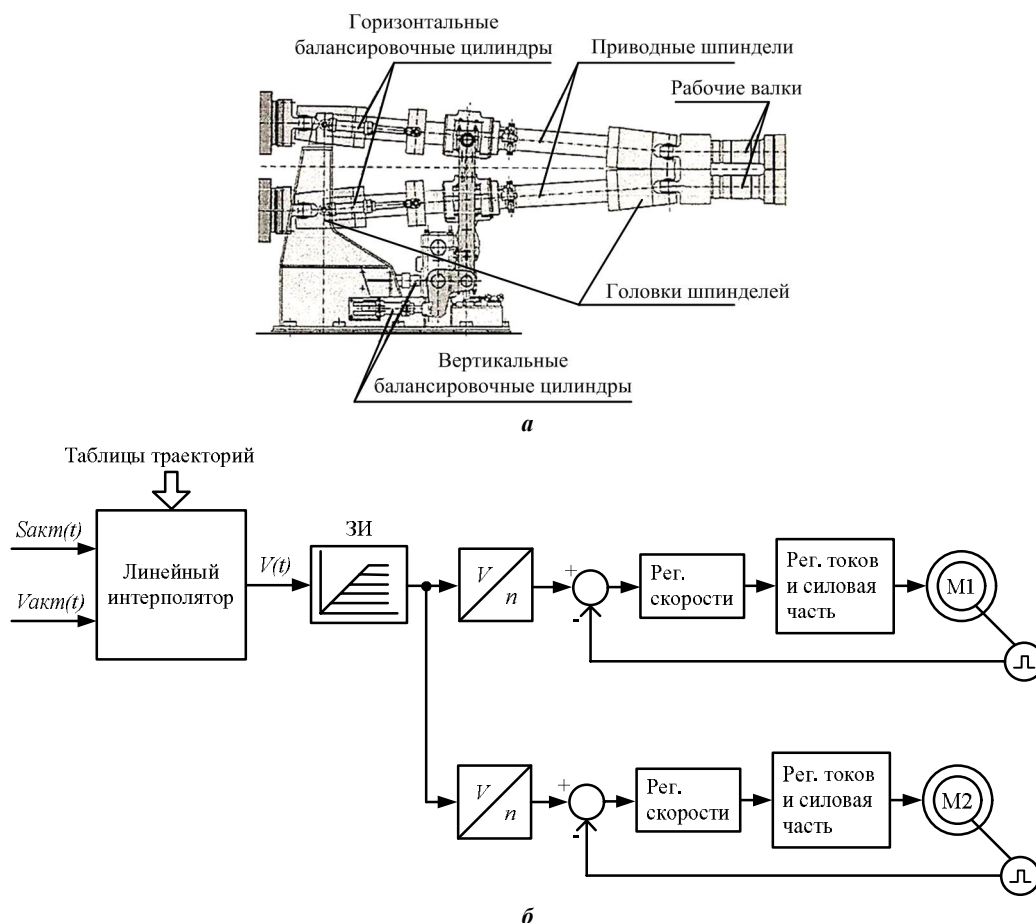


Рис. 1. Конструкция главной линии (а) и структурная схема системы управления ВПП и НПП (б) горизонтальной клетки стана 5000

Линии электроприводов (главные линии) представляют собой двухмассовые электромеханические системы с упругими связями и угловыми зазорами в шпиндельных соединениях [9]. Первой (управляемой) массой является ротор двигателя, второй (неуправляемой) массой является валок. Они имеют значительные моменты инерции, которые представлены ниже, в табл. 1 (момент ротора практически в 3 раза больше момента валка). В неустановившихся режимах скорости первой и второй масс различаются, и вал испытывает крутящий момент.

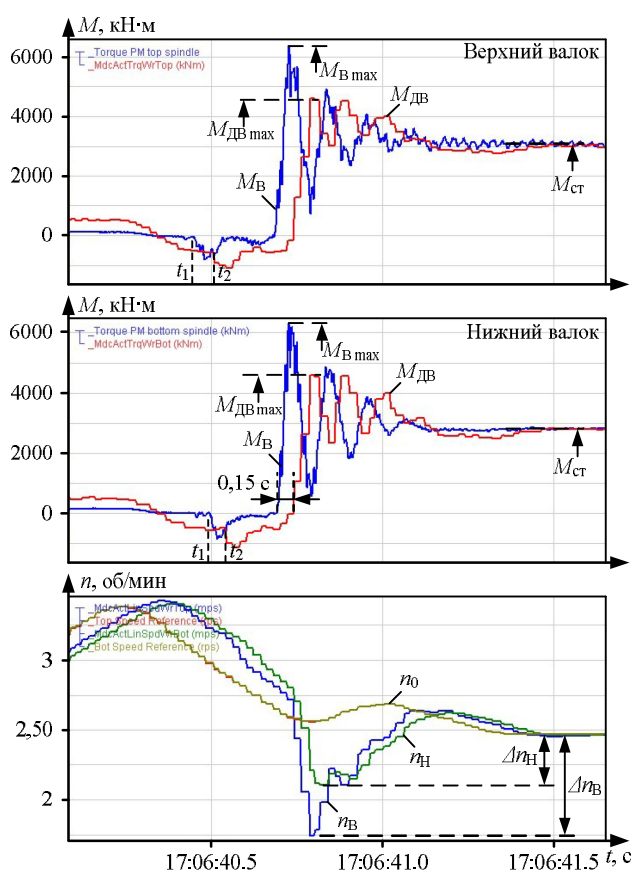
Основной причиной возникновения динамических перегрузок шпинделей является ударное приложение нагрузки в момент захвата металла валками. Это подтверждают осциллограммы, представленные на рис. 2 [10]. Они получены с помощью системы мониторинга крутящего момента, разработанной фирмой SMS (Германия), которая установлена на шпинделях стана 5000.

Захват металла происходит в момент времени  $t_2$  в режиме торможения электропривода, т.е. при полностью открытых угловых зазорах в шпиндельных соединениях. Размыкание зазоров подтверждают кратковременные отрицательные «всплески» моментов в интервале  $t_1-t_2$ . Динамические моменты обоих шпинделей имеют колебательный характер, их амплитудные значения  $M_{B_{max}}$  более чем в 1,5 превышают ограничение момента  $M_{дв_{max}}$  двигателя, установленное на уровне 4200 кН·м. Колебания демпфируются медленно, т.к. разомкнут регулятор скорости, механическая часть при этом представляется двумя интеграторами, по сути, это колебательное звено.

Таблица 1  
Параметры модели двухмассовой системы

Параметр	Обозначение	Размерность	Значение
Момент инерции 1-й массы	$J_1$	кг·м <sup>2</sup>	125000
Момент инерции 2-й массы	$J_2$	кг·м <sup>2</sup>	40570
Жесткость шпинделя	$C_{12}$	Н·м/рад	76489587
Коэффициент усиления регулятора скорости	$k_{pc}$	-	19,5
Постоянная времени регулятора скорости	$T_{pc}$	с	0,0041

Динамические нагрузки негативно влияют на эксплуатационные характеристики электрического и механического оборудования. Наименее долговечным узлом являются головки шпиндельных соединений со стороны валка (рис. 1, а). Их поломка приводит к длительным простоям и большим затратам на устранение последствий. Это подтверждает актуальность снижения динамических нагрузок при захвате, которое должно осуществляться средствами автоматизированного электропривода. Для этого необходимо, прежде всего, осуществлять непрерывный контроль упругого момента шпинделя и скорости второй массы (валка) двухмассовой электромеханической системы.



**Рис. 2. Осциллограммы упругих моментов на валах шпинделей верхнего и нижнего валков в режиме захвата металла**

#### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Определение упругого момента в *on-line*-режиме по электрическим параметрам приводных двигателей не позволяет получить пиковые динамические нагрузки на частотах собственных колебаний механической системы (10–25 Гц), показанные на **рис. 2**. К тому же данный метод не обеспечивает приемлемой точности в частотно-регулируемых приводах [11]. В связи с этим применяются системы прямых измерений упругих колебаний, датчики которых устанавливаются непосредственно на шпинделях. При этом наряду с моментом регистрируются координаты двигателя (скорость вращения, ток) и усилие прокатки.

Однако системы прямого измерения упругого момента валопровода не являются надежными устройствами. Это подтверждает тот факт, что упомянутая система мониторинга момента фирмы *SMS* является третьей по счету со времени ввода стана 5000 в эксплуатацию в 2009 году. Причинами низкой долговечности являются тяжелые условия эксплуатации и плановые замены шпинделей, после которых возникают сложности с повторной установкой датчиков.

Перспективным направлением ограничения динамических нагрузок является разработка замкнутых систем регулирования координат двухмассовых электромеханических систем с наблюдателями координат неуправляемой массы. В исследуемом случае такими координатами являются скорость валка и упругий момент шпинделя. Преимуществом наблюдателей является возможность построения систем регулирования

без применения дополнительных информационно-измерительных устройств (датчиков, считывающих устройств, средств передачи сигналов) [12, 13].

Анализ литературных источников, посвященных разработке и исследованию наблюдателей динамических процессов в двухмассовых системах, выявил два их существенных недостатка:

1. Значительная часть разработок относится к системам, в которых осуществляется контроль параметров обеих масс, которые являются электрическими машинами [14–17]. Соответственно, ограничение динамических нагрузок осуществляется регулированием координат этих машин. Экспериментальные исследования таких систем выполняются на специальных лабораторных установках с электрическими машинами малой мощности и специальными упругими валами. Очевидно, что такой подход для электроприводов прокатного стана неприемлем.

2. Известные системы управления на основе наблюдателей координат неуправляемой массы по параметрам электропривода сложны и требуют синтеза многомерных регуляторов, которые, по существу, являются вычислителями координат [18–23]. Недостатком таких систем является недостаточное быстродействие при отслеживании режимов ударного изменения нагрузки.

Это потребовало разработки относительно простого наблюдателя упругого момента главной линии клети прокатного стана и замкнутой системы автоматического регулирования координат на его основе (здесь не рассматривается). Критериями создания являются высокое быстродействие при обработке динамического процесса в момент захвата металла валками и возможность реализации алгоритмов в программном обеспечении промышленных контроллеров действующего стана. В системе и наблюдателе не должны применяться сложные алгоритмы регулирования координат, в частности генетические алгоритмы, фильтры Калмана и т.п. [4, 5], поскольку в этом случае не будет обеспечено необходимого быстродействия. Поэтому требованиями, предъявляемыми к создаваемому наблюдателю, являются относительная простота и возможность внедрения в промышленных условиях.

#### ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

##### Структура двухмассовой системы

Исследуемая система «электропривод-валок» может быть представлена в виде замкнутой двухконтурной структуры (**рис. 3**). Блоки 3, 5–7 являются типовыми блоками модели двухмассовой системы [10, 24]. Они определяют характер переходных процессов в механической части, в том числе естественное затухание колебаний (блок 7), блок 5 моделирует зазоры в передачах. Обратная связь по скорости моделируется блоком 9 с коэффициентом  $k_{oc}$ . Замкнутый контур регулирования момента представлен звеном 2.

На схеме (**рис. 3**) обозначены:  $T_\mu$  – некомпенсируемая постоянная времени;  $J_1, J_2$  – моменты инерции 1-й и 2-й масс;  $C_{12}$  – коэффициент упругости механической передачи;  $\beta$  – коэффициент, отвечающий за естественное демпфирование (типа вязкого трения);  $M_1$  – момент двигателя;  $M_{12}$  – упругий момент шпинделя;  $\omega_1, \omega_2$  – скорости двигателя и валка (1-й и 2-й масс соответственно).

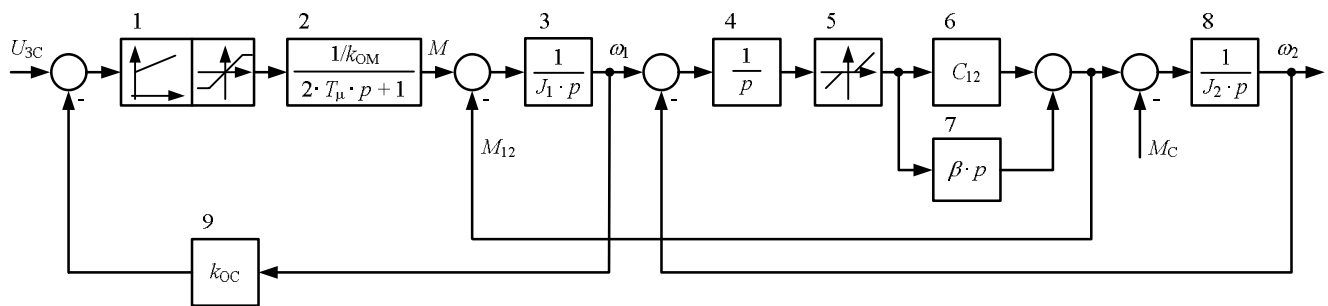


Рис. 3. Структурная схема двухмассовой электромеханической системы

Методика и расчет параметров динамических звеньев модели по данным электрооборудования и осциллограммам, полученным на стане, приведены в работе [25]. Параметры модели, в том числе регуляторов, приведены в табл. 1.

*Разработка наблюдателя координат неуправляемой массы*

При разработке наблюдателя из структуры, представленной на рис. 3, исключены нелинейный блок 5, моделирующий зазоры, и блоки 1, 8, реализующие контур регулирования скорости [10]. Полученная схема представлена на рис. 4, а.

Матричной структуре (рис. 4, б) соответствует уравнение в пространстве состояний:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} M_1 \\ \omega_1 \\ M_{12} \\ \omega_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_m} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{J_1} & 0 & -\frac{1}{J_1} & 0 \\ \frac{\beta}{J_1} & C_{12} & -\beta \frac{J_1 + J_2}{J_1 J_2} & -C_{12} \\ 0 & 0 & \frac{1}{J_2} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_1 \\ \omega_1 \\ M_{12} \\ \omega_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{T_m K_{OM}} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{\beta}{J_2} \\ 0 & -\frac{1}{J_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_{1ref} \\ M_c \end{bmatrix},$$

где  $M_{1ref}$  – заданный момент двигателя;  $T_m$  – электромеханическая постоянная времени.

Для нее записаны вектор состояния  $X = [M_1, \omega_1, M_{12}, \omega_2]$  и матрицы:

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_m} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{J_1} & 0 & -\frac{1}{J_1} & 0 \\ \frac{\beta}{J_1} & C_{12} & -\beta \frac{J_1 + J_2}{J_1 J_2} & -C_{12} \\ 0 & 0 & \frac{1}{J_2} & 0 \end{bmatrix};$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{1}{T_m K_{OM}} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{\beta}{J_2} \\ 0 & -\frac{1}{J_2} \end{bmatrix}; C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Соответственно, справедлива система дифференциальных уравнений:

$$\frac{dM_1}{dt} = -\frac{1}{T_m} M_1 + \frac{1}{T_m K_{OM}} M_{1ref};$$

$$\frac{d\omega_1}{dt} = \frac{1}{J_1} M_1 - \frac{1}{J_1} M_{12};$$

$$\frac{dM_{12}}{dt} = C_{12} \omega_1 - C_{12} \omega_2 + \frac{\beta}{J_1} M_1 - \beta \frac{J_1 + J_2}{J_1 J_2} M_{12} + \frac{\beta}{J_2} M_c;$$

$$\frac{d\omega_2}{dt} = \frac{1}{J_2} M_{12} - \frac{1}{J_2} M_c.$$

На основе этих уравнений разработан наблюдатель упругого момента, скорости 2-й массы и момента нагрузки, структура которого представлена на рис. 5. Схема наблюдателя в пакете *Matlab Simulink* с указанием параметров модели приведена на рис. 5, б (в этой программе для обозначения оператора Лапласа используется символ  $s$ ).

В соответствии с рис. 4, а необходимо обеспечить восстановление скорости  $\omega_2$  при задании момента  $U_{3m}$ . Для непосредственного измерения доступны момент двигателя  $M$  и скорость  $\omega_1$  первой массы, возмущающим воздействием является момент нагрузки  $M_c$ . Сложность настройки заключается в том, что наблюдатель должен обеспечивать восстановление переходных процессов при изменении статического момента  $M_c$  практически скачком. В замкнутой системе регулирования координат неуправляемой массы отработка этого режима без перерегулирования и колебаний требует больших коэффициентов усиления регуляторов (в пределах тысяч – десятков тысяч единиц), что в реальных условиях невозможно. К тому же такая настройка неизбежно приводит к потере устойчивости системы.



$n_B$ . Также приведены реальные кривые  $M_{B(измер)}$  упругого момента, полученные от датчиков на стане. Их них следует, что сигнал статического момента нарастает за время  $\Delta t \approx 0,07$  с. Это облегчает настройку разрабатываемого наблюдателя.

На рис. 6, а переходные процессы упругих моментов, восстановленного  $M_{B(восст)}$  и полученного экспериментально  $M_{B(измер)}$ , совпадают как по характеру, так и по амплитудам. Погрешность не превышает 5%. Кривые скорости проверяются только на модели, т.к. на стане скорость вала не измеряется. Эти зависимости

получены для случая, когда угловые зазоры в шпиндельных соединениях предварительно замкнуты. Поэтому динамический удар, вызванный их замыканием в момент захвата отсутствует (и не вносит погрешности в восстановление момента).

Как будет показано ниже, на реальном объекте принимаются специальные меры, чтобы в момент захвата зазоры были замкнуты. Поэтому модель и объект являются адекватными, и рассматриваемые переходные процессы совпадают.

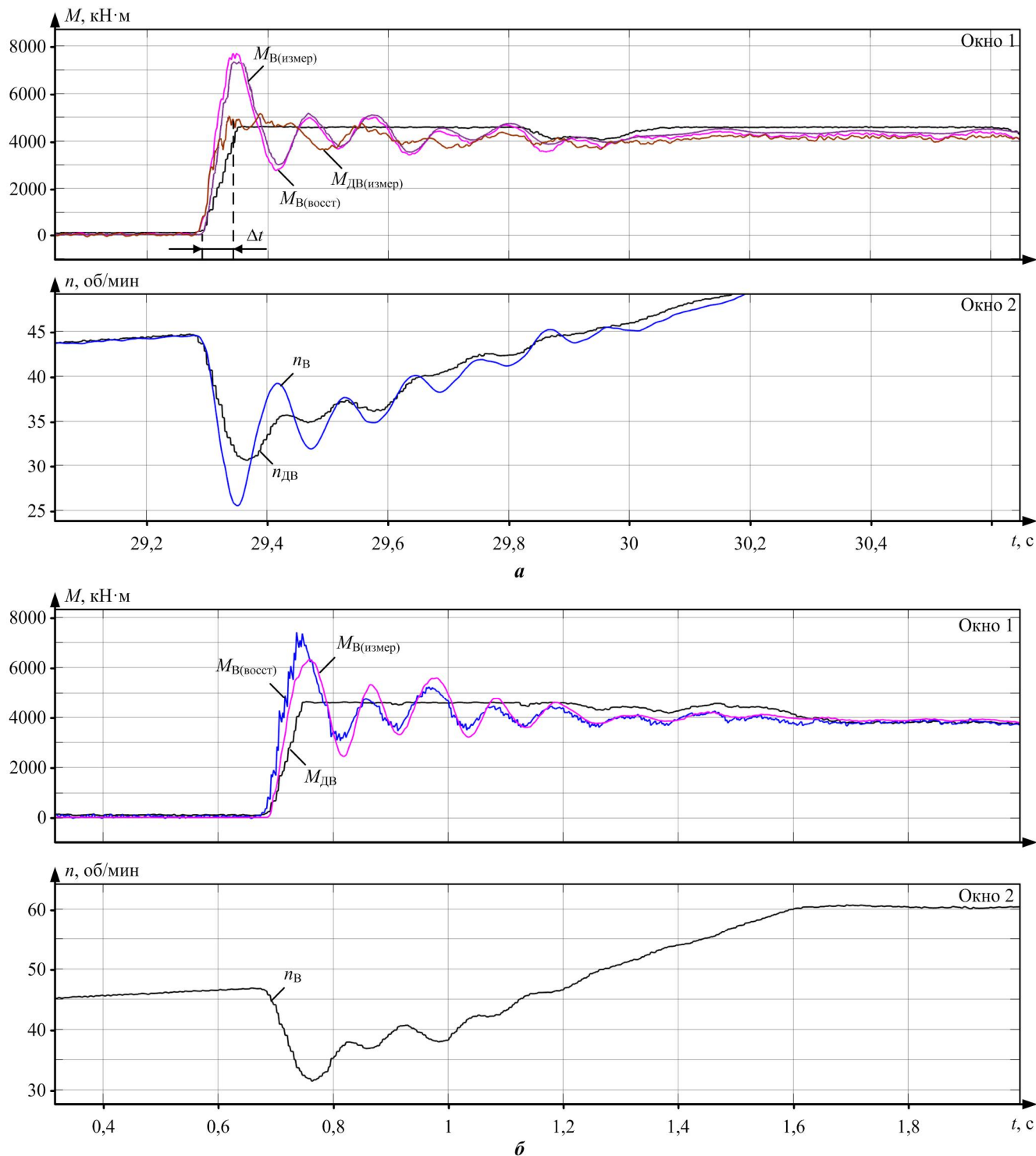


Рис. 6. Переходные процессы измеренных и восстановленных координат при отработке захвата в виртуальной системе (а) и непосредственно на стане (б)

По существу, представленные временные зависимости иллюстрируют подход к настройке цифровых двойников, который применяется при виртуальном вводе систем управления в эксплуатацию [26]. Согласно этому подходу осуществляется отладка алгоритмов управления (в данном случае алгоритма восстановления наблюдаемых сигналов) в пакете *Matlab Simulink*. Это позволяет выполнить отладку наблюдателя с использованием сигналов не из АСУ реального стана, а поступающих от его виртуальной модели (цифрового двойника системы приводов).

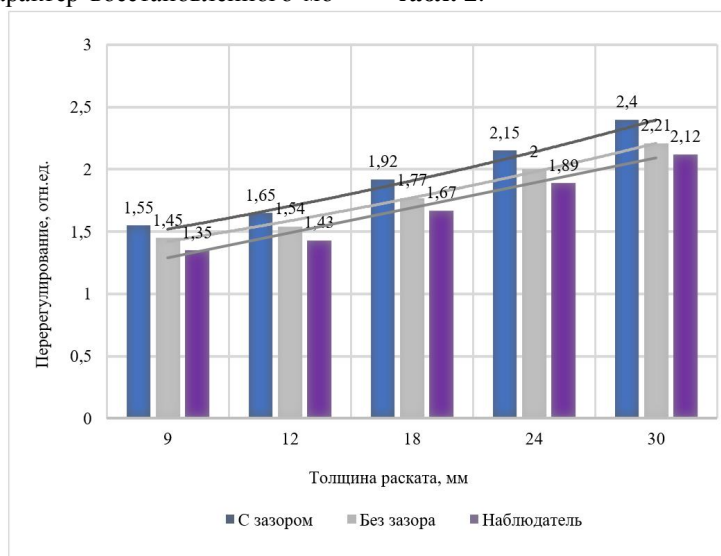
Далее отлаженные виртуальные модели наблюдателя были «перенесены» в контроллеры второго уровня АСУ ТП стана. Результаты проверки работы наблюдателя при подключении реальных сигналов приведены на **рис. 6, б**. Сопоставление зависимостей на **рис. 6, а** и **б** позволяет сделать вывод об их идентичности. Принятый подход, согласно которому наблюдатель отлажен на модели, а затем подключен к реальным системам на стане, значительно облегчил его настройку и ввод в работу.

В ходе проведенных экспериментов было получено большое количество осциллограмм захвата металла при полностью открытых угловых зазорах в шпиндельных соединениях. Они аналогичны представленным на **рис. 6, б** и здесь не приводятся. В этом случае возникает дополнительная составляющая динамического момента, вызванная непосредственно ударом при замыкании зазора. За счет этого сигнал упругого момента  $M_{B(измер)}$ , поступающий от датчика, увеличивается, в то время как характер восстановленного мо-

мента  $M_{B(восст)}$  остается прежним. В результате погрешность восстановления возрастает и составляет 8-10%, при этом амплитуда восстановленного момента превышает амплитуду момента на реальной осциллограмме.

Эксперименты, проведенные при прокатке заготовок одного сортамента в одинаковых проходах, позволили сделать вывод, что замыкание зазоров оказывает существенное влияние на динамический момент шпинделя. Поэтому необходимым условием успешного применения систем регулирования координат на основе разработанного наблюдателя является обеспечение замыкания угловых зазоров в шпинделе перед входом металла в клеть.

Обобщенные результаты, полученные при анализе восстановленных зависимостей и экспериментально снятых осциллограмм упругого момента для раскатов различной толщины, представлены на **рис. 7**. Показаны диаграммы амплитудных значений момента на шпинделе при замкнутых и разомкнутых зазорах в соединениях (диаграммы «с зазором» и «без зазора» соответственно). Предварительное замыкание зазора обеспечивалось за счет захвата в режиме ускорения электропривода. Данный режим подробно рассмотрен в публикациях [27–29]. Захват при разомкнутых зазорах обеспечивался путем торможения электропривода, характерные осциллограммы показаны выше, на **рис. 2**. Также на **рис. 7** приведены диаграммы, построенные по осциллограммам, восстановленным с помощью наблюдателя. Результаты обобщения приведены в **табл. 2**.



**Рис. 7.** Диаграммы максимальных значений моментов в режиме захвата, полученные экспериментально и при восстановлении наблюдателем

**Таблица 2**

**Максимальные отклонения момента в режиме захвата**

Толщина, мм	Измеренные				Восстановленные				
	$M_{\max}$ (зазор)	$M_{\max}$ (без)	$\Delta M_{\max}$ (заз./без)		$M_{\max}$ (восст)	$ \Delta M_{\max} $ (вос./зазор)		$ \Delta M_{\max} $ (вос./без)	
	о.е.	о.е.	о.е.	%	о.е.	о.е.	%	о.е.	%
9	1,55	1,45	0,1	6,9	1,35	0,2	13,8	0,1	6,9
12	1,65	1,54	0,11	7,1	1,43	0,22	14,3	0,11	7,1
18	1,92	1,77	0,15	8,5	1,67	0,25	14,1	0,1	5,6
24	2,15	2	0,15	7,5	1,89	0,26	12,1	0,11	5,5
30	2,4	2,21	0,19	8,6	2,12	0,28	11,7	0,09	4,1

Анализ представленных результатов позволил сделать следующие выводы:

1. С увеличением толщины раската перерегулирование момента увеличивается. Так, при толщине 9 мм, т.е. в последних проходах, амплитуда при захвате «без зазора» составляет 35%, а «с зазором» – 45%. При толщине 30 мм (в первых проходах) – 240 и 212% соответственно.

2. Влияние составляющей момента, обусловленной непосредственно ударом при замыкании зазора, относительно невелико – 6,9% при толщине 9 мм (разница амплитуд 1,55 и 1,45 о.е.) и 8,6% при толщине раската 30 мм (соответственно 2,4 и 2,21 о.е.). Это косвенно подтверждает, что максимальное влияние на перерегулирование момента оказывает «упругая» составляющая момента [30].

3. Относительная разница реально измеренных и восстановленных значений с увеличением толщины уменьшается. Так, при толщине 9 мм она составляет 6,9%, при толщине 18 мм – 5,6%, а при 30 мм – 4,1% (дать однозначное объяснение этому выводу сложно).

#### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Представленный наблюдатель служит основой для разработки замкнутых систем регулирования координат второй массы двухмассовой системы прокатного стана. В настоящее время выполняется разработка САР, теоретические основы которых рассмотрены в работах А.Р. Колганова [18, 31, 32]. К таким системам относятся:

1. Замкнутая двухконтурная САР скорости валка и упругого момента шпинделя с наблюдателем координат и регулятором состояния. Она обеспечивает лучшие показатели в системах с жесткой механикой. Недостатком является сложность настройки вычислителя регулируемых координат.

2. Треконтурная система регулирования скорости валка с подчиненными контурами регулирования упругого момента и скорости двигателя. Ее преимуществом является возможность ограничения сигналов на входах регуляторов внутренних контуров. Недостатком является то, что введение дополнительного (в данном случае третьего) контура в 2 либо в 4 раза снизит быстродействие замкнутой системы по каналу регулирования возмущения [33].

Очевидно, что каждая из этих систем и каждый из названных принципов имеют право на развитие. Однако в многомассовых системах с зазорами лучшие динамические свойства обеспечивает система с регулятором состояния. По этому принципу могут быть построены замкнутые системы с ограничителями выходов регуляторов и более сложные системы с переключающимися структурами [31].

Предложенный алгоритм настройки наблюдателя является конкретным примером применения цифровых двойников для виртуального ввода систем управления электроприводами в эксплуатацию. Данное направление подробно рассмотрено в публикации [26] и названо перспективным для создания и совершенствования электротехнических и мехатронных систем прокатных станов. Там же обоснована методика, согласно которой выполняется настройка систем и алгоритмов управления с помощью моделей в среде виртуального модели-

рования *Matlab Simulink*. Далее структуры моделей «переносятся» из пакета Simulink в программу промышленных контроллеров, осуществляющих управление объектом.

Цифровые двойники, создаваемые для виртуального ввода в эксплуатацию, должны решать в реальном времени уравнения объекта управления с необходимой точностью. Этому требованию соответствует разработанный наблюдатель координат двухмассовой системы. Временные зависимости, представленные на рис. 7, подтверждают, что он обеспечивает удовлетворительную точность восстановления параметров и может быть применен при разработке замкнутых САР упругого момента на шпинделе.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный наблюдатель обеспечивает достоверное восстановление момента упругого вала и скорости неуправляемой массы двухмассовой электромеханической системы. В настоящее время алгоритм наблюдателя исполнен в программном обеспечении контроллеров электроприводов горизонтальной клетки стана 5000 и находится в работе. Проводится длительный пассивный эксперимент, целями которого являются анализ влияния неучтенных факторов и оценка возможных рисков. По итогам будет принято решение об исследовании и реализации вышеуказанных замкнутых систем ограничения динамического момента на стане.

Представленные разработки выполнены на примере электропривода реверсивной клетки стана 5000. Они могут быть применены на других агрегатах, электроприводы которых работают с ударным приложением нагрузки. К ним относятся станы горячей прокатки и черновые группы клетей сортовых станов.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках субсидии на финансовое обеспечение выполнения государственного задания (фундаментальное научное исследование), договор №FENU-2020-0020 (2020071ГЗ).*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Калачев Ю.Н. Наблюдатели состояния в векторном электроприводе. М.: ЭФО, 2015. 61 с.
2. Digital twin in manufacturing: a categorical literature review and classification / W. Kritzinger, M. Karner, G. Traar, J. Henjes, W. Sihn // IFAC-PapersOnLine. 2018. Vol. 51. Iss. 11. Pp. 1016-1022. doi: 10.1016/j.ifacol.2018.08.474.
3. Sugiura K., Hori Y. Vibration suppression in 2- and 3-mass system based on the feedback of imperfect derivative of the estimated torsional torque // IEEE Trans. on Industrial Electronics. 1996. Vol. 43. No. 2. Pp. 56-64. doi: 10.1109/41.481408.
4. Ji J. K. & Sul S. K. Kalman Filter and LQ Based Speed Controller for Torsional Vibration Suppression in a 2-Mass Motor Drive System, IEEE Trans. on Industrial Electronics, 1995, vol. 42, no. 6, pp. 564-571.
5. Szabat K., Orłowska-Kowalska T. Vibration suppression in two-mass drive system using PI speed controller and additional feedbacks – comparative study // IEEE Trans. on Industrial Electronics. 2007. Vol. 54. No. 2. Pp. 1193-1206. doi: 10.1109/41.475496.
6. Setting automated roll axial shifting control system of plate mill / A.S. Karandaev, B.M. Loginov, A.A. Radionov,

- V.R. Gasiyarov // *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 206. Pp. 1753-1750. doi: 10.1016/j.proeng.2017.10.709.
7. Force limiting at roll axial shifting of plate mill / A.S. Karandaev, B.M. Loginov, V.R. Gasiyarov, V.R. Khrumshin // *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 206. Pp. 1780-1786. doi: 10.1016/j.proeng.2017.10.713.
8. Обоснование способов ограничения динамических нагрузок электромеханических систем клетки прокатного стана / А.Г. Шубин, Б.М. Логинов, В.Р. Гасияров, Е.А. Маклакова // *Электротехнические системы и комплексы*. 2018. № 1(38). С. 14-25. doi: 10.18503/2311-8318-2018-1(38)-14-25.
9. Constraining the Dynamic Torque of a Rolling Mill Stand Drive / V.R. Khrumshin, V.R. Gasiyarov, A.S. Karandaev, S.N. Baskov, B.M. Loginov // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика»*. 2018. Т. 18. № 1. С. 101-111. doi: 10.14529/power180109.
10. Гасияров В.Р. Совершенствование электротехнических систем реверсивной клетки толстолистного прокатного стана: дис. ... докт. техн. наук / Гасияров Вадим Рашинович. Челябинск: ЮУрГУ, 2021. 358 с.
11. Крот П.В. Телеметрические системы мониторинга динамических нагрузок в линиях привода прокатных станов // *Вибрация машин: измерение, снижение, защита: научно-технический и производственный сборник статей*. Донецк: ДонНТУ, 2008. Вып. 1. С. 46-53.
12. Implementation of telemetric on-line monitoring system of elastic torque of rolling mill line of shafting / A.A. Radionov, V.R. Gasiyarov, M.M. Tverskoi, V.R. Khrumshin, B.M. Loginov // *2nd International Ural Conference on Measurements (UralCon)*. 2017. Pp. 450-455. doi: 10.1109/URALCON.2017.8120750.
13. Krot P.V. Nonlinear vibrations and backlashes diagnostics in the rolling mills drive trains // *Proc. of 6th EUROMECH Nonlinear Dynamics Conference (ENOC)*. 2008. doi: 10.13140/2.1.3353.1840.
14. Hori Yo., Sawada H., Chun Y. Slow resonance ratio control for vibration suppression and disturbance rejection in torsional system // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 1999. Vol. 46. Iss. 1. Pp. 162-168. doi: 10.1109/41.744407.
15. Bouheraoua M., Wang J., Atallah K. Influence of control structures and load parameters on performance of a pseudo direct drive // *Machines*. 2014. No. 2. Pp. 158-175. doi: 10.3390/machines2030158.
16. Szabat K., Orlowska-Kowalska T. adaptive control of the electrical drives with the elastic coupling using Kalman filter // *Open access peer-reviewed chapter*, 2009. doi: 10.5772/6507.
17. Orlowska-Kowalska T., Kaminski M., Szabat K. Implementation of a sliding-mode controller with an integral function and fuzzy gain value for the electrical drive with an elastic joint // *Industrial Electronics IEEE Transactions on*. 2010. Vol. 57. No. 4. Pp. 1309-1317. doi: 10.1109/TIE.2009.2030823.
18. Лебедев С.К., Колганов А.Р., Гнездов Н.Е. Электромехатронные системы позиционирования с наблюдателями нагрузки: монография. Иваново: ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», 2016. 340 с.
19. Лебедев С.К., Колганов А.Р., Гнездов Н.Е. Выбор модели динамики для систем векторного управления электроприводами переменного тока // *Электроприводы переменного тока: труды XVI междунар. науч.-техн. конф.* Екатеринбург: ФГАОУ ВПО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина». 2015. С. 103-106.
20. Szabat K., Orlowska-Kowalska T. Performance improvement of industrial drives with mechanical elasticity using nonlinear adaptive Kalman filter // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2008. Vol. 55. Iss. 3. Pp. 1075-1084. doi: 10.1109/TIE.2008.917081.
21. Cychowski M., Orlowska-Kowalska T. Constrained model predictive control of the drive system with mechanical elasticity // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2009. Vol. 56. Iss. 6. Pp. 1963-1973. doi: 10.1109/TIE.2009.2015753.
22. Orlowska-Kowalska T., Dybkowski M., Szabat K. Adaptive sliding-mode neuro-fuzzy control of the two-mass induction motor drive without mechanical sensors // *Industrial Electronics IEEE Transactions on*. 2010. Vol. 57. Iss. 2. Pp. 553-564. doi: 10.1109/TIE.2009.2036023.
23. Thomsen S., Hoffmann N., Wilhelm F. Fuchs PI control, PI-based state space control and model-based predictive control for drive systems with elastically coupled loads – a comparative study // *Industrial Electronics IEEE Transactions on*. 2011. Vol. 58. Iss. 8. Pp. 3647-3657. doi: 10.1109/TIE.2010.2089950.
24. Машины и агрегаты металлургических заводов. Машины и агрегаты для производства проката / А.И. Целиков, П.И. Полухин, В.М. Гребеник, Ф.К. Иванченко. М.: Металлургия, 1988. Т. 3. 680 с.
25. Calculating simulation model parameters for electromechanical system of rolling mill stand / A.S. Karandaev, S.N. Baskov, O.A. Gasiyarova, B.M. Loginov, V.R. Khrumshin // *International Ural Conference on Electrical Power Engineering (Ural-Con)*. 2020. Pp. 469-474. doi: 10.1109/UralCon49858.2020.9216265.
26. Концептуальные направления создания цифровых двойников электротехнических систем агрегатов прокатного производства / А.А. Радионов, А.С. Карандаев, Б.М. Логинов, О.А. Гасиярова // *Изв. вузов. Электромеханика*. 2021. Т. 64. № 1. С. 54-68. doi:10.17213/0136-3360-2021-1-54-68.
27. Обоснование способов ограничения динамических нагрузок электромеханических систем клетки прокатного стана / А.Г. Шубин, Б.М. Логинов, В.Р. Гасияров, Е.А. Маклакова // *Электротехнические системы и комплексы*. 2018. № 1(38). С. 14-25. doi: 10.18503/2311-8318-2018-1(38)-14-25.
28. Use of automated electric drives for limiting dynamic loads in shaft lines of roll mill stands / A.A. Radionov, V.R. Gasiyarov, A.S. Karandaev, V.R. Khrumshin // *Journal of Engineering*. 2019. Iss. 17. Pp. 3578-3581. doi: 10.1049/joe.2018.8135.
29. Гасияров В.Р. Способ ограничения динамических нагрузок мехатронных систем клетки толстолистного прокатного стана // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Сер.: Машиностроение*. 2019. Т. 19. № 2. С. 5-18.
30. Dynamic torque limitation principle in the main line of a mill stand: explanation and rationale for use / V.R. Gasiyarov, V.R. Khrumshin, S.S. Voronin, T.A. Lisovskaya, O.A. Gasiyarova // *Machines*. 2019. No. 7(4). 76. doi: 10.3390/machines7040076.
31. Колганов А.Р., Лебедев С.К., Гнездов Н.Е. Электромехатронные системы. Современные методы управления, реализации и применения: учебное пособие. Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2019. 256 с.
32. Колганов А.Р., Лебедев С.К., Гнездов Н.Е. Современные методы управления в электромехатронных системах. Разработка, реализация, применение. Иваново: ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», 2012. 256 с.
33. Ключев В.И. Теория электропривода: учеб. для вузов. М.: Энергоатомиздат, 2001. 760 с.

Поступила в редакцию 30 марта 2021 г.

INFORMATION IN ENGLISH

# DIGITAL CONTROLLER FOR ELASTIC MODULUS OF AN ELECTROMECHANICAL SYSTEM OF A ROLLING MILL STAND

Andrey A. Radionov

D.Sc. (Engineering), Professor, Vice-Rector, South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia. E-mail: radionovaa@susu.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3914-4429>

Vadim R. Gasiyarov

Ph.D. (Engineering), Head of the Department of Mechatronics and Automation, South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia. E-mail: gasiyarovvr@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9635-4716>.

Boris M. Loginov

Senior Maintenance and Test Engineer, Central Electric Laboratory, PJSC "Magnitogorsk Iron and Steel Works", Magnitogorsk, Russia. E-mail: lb18@yandex.ru.

Ekaterina A. Gartlib

Senior Lecturer of the Department of Mechatronics and Automation, South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia. E-mail: gartlibea@susu.ru.

Olga A. Gasiyarova

Junior Researcher, Senior Lecturer of the Department of Mechatronics and Automation, South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia. E-mail: gasiariovaao@susu.ru.

The paper is concerned with the justification of the task of a controller development for elastic modulus of the driver shaft (spindle) and the roll speed of the electromechanical system of a plate mill stand. The structure of the main line of the horizontal stand at the 5000 plate mill, PJSC "Magnitogorsk Iron and Steel Plant" (PJSC "MMK"), was considered. Oscillograph records are shown, which confirm the oscillating character of the elastic modulus on the spindle at the moment of gripping the metal by the rolls. It is shown that its amplitude is several times higher than the steady rolling torque. The model of a double-mass electromechanical system with an elastic coupling and an angular joint gap is analyzed. The recorded state-space equations are used to develop the controller of the second mass (roll) position and the elastic spindle torque by the following parameters of the first mass: the electric drive motor torque and velocity. The structure of the controller was presented, the main problem of adjustment is to provide the high rate of response to restore the transient processes in impact load mode. It was noted that the well-known controllers, which are coordinate calculators with complex algorithms, are not able to provide the necessary fast response. A new approach was proposed, the main idea of this approach is to simulate the processes using a model with further direct adjustment on the site. The research group carried out the analysis of transient processes of restored coordinates of the double-mass system during metal gripping by the rolls. The results were compared with the experimental oscillograph records obtained on the mill. The agreement of the processes with reasonable accuracy was confirmed. The paper presents the integrated results obtained in the process of analysis of the restored relationships and experimental oscillograph records of the elastic modulus in the process of rolling of slabs of various thickness. A conclusion was made about the significant influence of the slab thickness and the component defined by the elastic properties of the spindle on the torque amplitude on the spindle. It was recommended to apply the developed controller in closed-loop control systems of elastic modulus. It was noted that the necessary condition of effective operation of such systems provision of metal gripping at preset closed angular gaps.

**Keywords:** rolling mill, electromechanical system, double-mass model, coordinates, controller, dynamic processes, restoration, oscillograph records, analysis, recommendations.

## REFERENCES

1. Kalachev Yu.N. *Nablyudateli sostoyaniya v vektornom elektropivode* [State controllers in vector electric drive]. Moscow, EFO Publ., 2015. 61 p. (In Russian)
2. Kritzinger W., Karner M., Traar G., Henjes J., Sihn W. Digital twin in manufacturing: a categorical literature review and classification. IFAC-PapersOnLine. 2018. Vol. 51. Iss. 11. Pp. 1016-1022. doi: 10.1016/j.ifacol.2018.08.474.
3. Sugiura K., Hori Y. Vibration suppression in 2- and 3-mass system based on the feedback of imperfect derivative of the estimated torsional torque. IEEE Trans. on Industrial Electronics. IEEE, 1996. Vol. 43. No. 2. Pp. 56-64. doi: 10.1109/41.481408.
4. Ji J.K., Sul S.K. Kalman Filter and LQ Based Speed Controller for Torsional Vibration Suppression in a 2-Mass Motor Drive System. IEEE Trans. on Industrial Electronics. 1995. Vol. 42. No. 6. Pp. 564-571.
5. Szabat K., Orłowska-Kowalska T. Vibration suppression in two-mass drive system using PI speed controller and additional feedbacks – comparative study. IEEE Trans. on Industrial Electronics. 2007. Vol. 54. No. 2. Pp. 1193-1206. doi: 10.1109/41.475496.
6. Karandaev A.S., Loginov B.M., Radionov A.A., Gasiyarov V.R. Setting automated roll axial shifting control system of plate mill. Procedia Engineering. 2017. Vol. 206. Pp. 1753-1750. doi: 10.1016/j.proeng.2017.10.709.
7. Karandaev A.S., Loginov B.M., Gasiyarov V.R., Khrumshin V.R. Force limiting at roll axial shifting of plate mill. Procedia Engineering. 2017. Vol. 206. Pp. 1780-1786. doi: 10.1016/j.proeng.2017.10.713.
8. Shubin A.G., Loginov B.M., Gasiyarov V.R., Maklakova E.A. Justification of methods of dynamic load limitation in electromechanical systems of a rolling mill stand. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2018, no. 1(38), pp. 14-25. doi: 10.18503/2311-8318-2018-1(38)-14-25. (In Russian)
9. Khrumshin V.R., Gasiyarov V.R., Karandaev A.S., Baskov S.N., Loginov B.M. Constraining the Dynamic Torque of a Rolling Mill Stand Drive. *Vestnik YuUrGU. Seriya «Energetika»* [Bulletin of SUSU. Series "Power engineering"], 2018, vol. 18, no. 1, pp. 101-111. doi: 10.14529/power180109.

10. Gasiyarov V.R. *Sovershenstvovanie elektrotekhnicheskikh system reversivnoy kleti tololistovogo prokatnogo stana. Diss. Dokt. Tekhn. Nauk.* [Improvement of electrotechnical systems of plate mill reverse stand. D.Sc. Diss.]. Chelyabinsk, 2021. 358 p. (In Russian)
11. Krot P.V. Telemetric systems of dynamic load monitoring in rolling mill drives. *Vibratsiya mashin: izmerenie, snizhenie, zashchita: nauchno-tekhnicheskii i proizvodstvennyi sbornik statey* [Machine vibration: measuring, reduction, protection: scientific, technical and industrial collection of scientific papers]. Donetsk, DonNTU Publ., 2008. Iss. 1, pp. 46-53. (In Russian)
12. Radionov A.A., Gasiyarov V.R., Tverskoi M.M., Khramshin V.R., Loginov B.M. Implementation of telemetric on-line monitoring system of elastic torque of rolling mill line of shafting. 2<sup>nd</sup> International Ural Conference on Measurements (UralCon). IEEE, 2017. Pp. 450-455. doi: 10.1109/URALCON.2017.8120750.
13. Krot P.V. Nonlinear vibrations and backlashes diagnostics in the rolling mills drive trains. Proc. of 6th EUROMECH Nonlinear Dynamics Conference (ENOC). 2008. doi: 10.13140/2.1.3353.1840.
14. Hori Yo., Sawada H., Chun Y. Slow resonance ratio control for vibration suppression and disturbance rejection in torsional system. IEEE Transactions on Industrial Electronics. IEEE, 1999. Vol. 46. Iss. 1. Pp. 162-168. doi: 10.1109/41.744407.
15. Bouheraoua M., Wang J., Atallah K. Influence of control structures and load parameters on performance of a pseudo direct drive. Machines. 2014. No. 2. Pp. 158-175. doi: 10.3390/machines2030158.
16. Szabat K., Orlowska-Kowalska T. adaptive control of the electrical drives with the elastic coupling using Kalman filter. Open access peer-reviewed chapter, 2009. doi: 10.5772/6507.
17. Orlowska-Kowalska T., Kaminski M., Szabat K. Implementation of a sliding-mode controller with an integral function and fuzzy gain value for the electrical drive with an elastic joint. Industrial Electronics IEEE Transactions on. 2010. Vol. 57. No. 4. Pp. 1309-1317. doi: 10.1109/TIE.2009.2030823.
18. Lebedev S.K., Kolganov A.R., Gnezdov N.E. *Elektromekhatronnye sistemy pozitsionirovaniya s nablyudatelyami nagruzki* [Electrical and mechatronic positioning systems with load controllers]. Ivanovo, FGBOU VPO "Ivanovo V.I. Lenin State Power University" Publ., 2016. 340 p.
19. Lebedev S.K., Kolganov A.R., Gnezdov N.E. Selection of dynamic model for vector control systems of alternating current drives. *Elektroprivody peremennogo toka: trudy XVI mezhdunar. Nauch.-tekhn. Konf.* [Alternating current drives: collection of scientific papers of XVI international scientific and technical conference]. Yekaterinburg, FGAOU VPO "UrFU named after the first President of Russia B.N.Yeltsin" Publ., 2015, pp. 103-106. (In Russian)
20. Szabat K., Orlowska-Kowalska T. Performance improvement of industrial drives with mechanical elasticity using nonlinear adaptive Kalman filter. Industrial Electronics IEEE Transactions on. 2008. Vol. 55. Iss. 3. Pp. 1075-1084. doi: 10.1109/TIE.2008.917081.
21. Cychowski M., Orlowska-Kowalska T. Constrained model predictive control of the drive system with mechanical elasticity // Industrial Electronics IEEE Transactions on. 2009. Vol. 56. Iss. 6. Pp. 1963-1973. doi: 10.1109/TIE.2009.2015753.
22. Orlowska-Kowalska T., Dybkowski M., Szabat K. Adaptive sliding-mode neuro-fuzzy control of the two-mass induction motor drive without mechanical sensors. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2010. Vol. 57. Iss. 2. Pp. 553-564. doi: 10.1109/TIE.2009.2036023.
23. Thomsen S., Hoffmann N., Wilhelm F. Fuchs PI control, PI-based state space control and model-based predictive control for drive systems with elastically coupled loads – a comparative study. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2011. Vol. 58. Iss. 8. Pp. 3647-3657. doi: 10.1109/TIE.2010.2089950.
24. Tselikov A.I., Polukhin P.I., Grebenik V.M., Ivanchenko F.K. *Mashiny i agregaty metallurgicheskikh zavodov. Mashiny i agregaty dlya proizvodstva prokata* [Machines and equipment of metallurgical plants. Machines and equipment for rolling]. Moscow, Metallurgy Publ., 1988. vol. 3, 680 p. (In Russian)
25. Karandaev A.S., Baskov S.N., Gasiyarova O.A., Loginov B.M., Khramshin V.R. Calculating simulation model parameters for electromechanical system of rolling mill stand. International Ural Conference on Electrical Power Engineering (Ural-Con). IEEE, 2020. Pp. 469-474. doi: 10.1109/UralCon49858.2020.9216265.
26. Radionov A.A., Karandaev A.S., Loginov B.M., Gasiyarova O.A. Conceptual trends in development of digital twins of electrotechnical systems of rolling equipment. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika*. [Proceedings of Universities. Electrical engineering], 2021, vol. 64, no. 1, pp. 54-68. doi: 10.17213/0136-3360-2021-1-54-68. (In Russian)
27. Shubin A.G., Loginov B.M., Gasiyarov V.R., Maklakova E.A. Justification of methods of dynamic load limiting for electromechanical systems of a rolling mill stand. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical systems and complexes], 2018, no. 1(38), pp. 14-25. doi: 10.18503/2311-8318-2018-1(38)-14-25. (In Russian)
28. Radionov A.A., Gasiyarov V.R., Karandaev A.S., Khramshin V.R. Use of automated electric drives for limiting dynamic loads in shaft lines of roll mill stands. Journal of Engineering. 2019. Iss. 17. Pp. 3578-3581. doi: 10.1049/joe.2018.8135.
29. Gasiyarov V.R. The method of dynamic load limiting for mechatronic systems of a plate rolling mill stand. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of the South-Ural State University. Series "Machine-building"], 2019, vol. 19, no. 2, pp. 5-18. (In Russian)
30. Gasiyarov V.R., Khramshin V.R., Voronin S.S., Lisovskaya T.A., Gasiyarova O.A. Dynamic torque limitation principle in the main line of a mill stand: explanation and rationale for use. Machines. 2019. 7(4). 76. doi: 10.3390/machines7040076.
31. Kolganov A.R., Lebedev S.K., Gnezdov N.E. *Elektromekhatronnye sistemy. Sovremennyye metody upravleniya, realizatsii i primeneniya: uchebnoe gosobie* [Electromechatronic systems. Modern methods of control, implementation and application: study guide]. Moscow, Vologda, Infra-Inzheneriya Publ., 2019. 256 p. (In Russian)
32. Kolganov A.R., Lebedev S.K., Gnezdov N.E. *Sovremennyye metody upravleniya v elektromekhatronnykh sistemakh. Razrabotka, realizatsiya, primeneniye*. [Modern control methods in electromechatronic systems. Development, implementation, application]. Ivanovo, FGBOU VPO "Ivanovo V.I. Lenin State Power University" Publ., 2012. 256 p. (In Russian)
33. Klyuchev V.I. *Teoriya elektroprivoda* [Electric drive theory]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 2001. 760 p. (In Russian)

Разработка цифрового наблюдателя упругого момента электромеханической системы клетки прокатного стана / А.А. Радионов, Р.В. Гасияров, Б.М. Логинов, Е.А. Гартлиб, О.А. Гасиярова // Электротехнические системы и комплексы. 2021. № 2(51). С. 19-29. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-2\(51\)-19-29](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-2(51)-19-29)

Radionov A.A., Gasiyarov V.R., Loginov B.M., Gartlib E.A., Gasiyarova O.A. Digital Controller for Elastic Modulus of an Electromechanical System of a Rolling Mill Stand. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2021, no. 2(51), pp. 19-29. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-2\(51\)-19-29](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-2(51)-19-29)

Кашин Я.М., Копелевич Л.Е., Самородов А.В., Ким В.А., Мараховский Е.А.

Кубанский государственный технологический университет, г. Краснодар

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДВИГАТЕЛЯ СОВМЕЩЕННОЙ КОНСТРУКЦИИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА СЕПАРАТОРА

В статье рассмотрен двигатель совмещенной конструкции электропривода сепаратора, состоящий из статора электродвигателя и массивного ротора, который выполняет функцию рабочего органа электропривода сепаратора – барабана. Электропривод – это электромеханическая система, состоящая в общем случае из взаимодействующих преобразователей электроэнергии, электромеханических и механических преобразователей, управляющих и информационных устройств. Электропривод сепаратора с двигателем совмещенной конструкции содержит управляющее устройство и двигатель совмещенной конструкции. В статье представлена математическая модель двигателя совмещенной конструкции электропривода сепаратора на базе дифференциальных уравнений, описывающих электромагнитные и электромеханические процессы в двигателе совмещенной конструкции электропривода сепаратора, позволяющая получить функциональные связи между динамическими характеристиками и параметрами, разработанного двигателя совмещенной конструкции электропривода сепаратора. В статье рассмотрен вывод выражений момента сопротивления и момента инерции электропривода сепаратора, составной частью которого является двигатель совмещенной конструкции. В выражения момента сопротивления и момента инерции электропривода сепаратора с двигателем совмещенной конструкции введены переменные, учитывающие геометрические особенности подвижных элементов двигателя совмещенной конструкции электропривода сепаратора и изменения состава многофазного сепарируемого продукта. Данная математическая модель реализована в программном пакете *MatLab Simulink* и позволяет учитывать влияние параметров напряжения сети (амплитуды питающего напряжения, частоты питающего напряжения, степени искажения синусоидальной формы кривой питающего напряжения высшими гармониками напряжения, к примеру пятой или седьмой); изменения момента сопротивления и момента инерции, создаваемого сепарируемым продуктом, на электромагнитный момент двигателя совмещенной конструкции электропривода сепаратора и скорость вращения рабочего органа электропривода сепаратора с двигателем совмещенной конструкции.

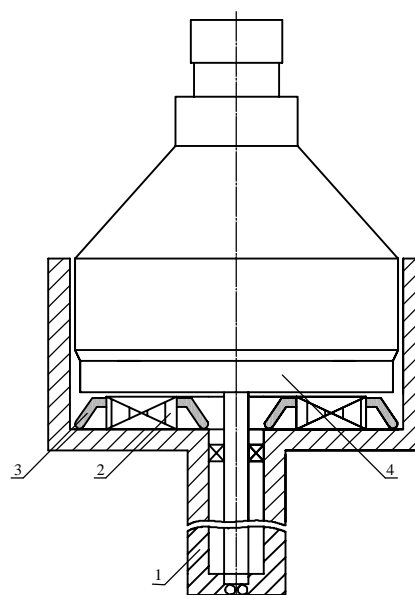
**Ключевые слова:** электропривод, сепаратор, энергосбережение, совмещенная конструкция, массивный ротор, математическая модель, блок-схема, момент сопротивления, момент инерции.

### ВВЕДЕНИЕ

Электропривод сепаратора с двигателем совмещенной конструкции [1-3] содержит управляющее устройство и двигатель совмещенной конструкции, состоящий из статора электродвигателя и массивного ротора, который выполняет функцию рабочего органа электропривода сепаратора – барабана (далее по тексту – ротор-барабан). В настоящей статье приведены исследования математической модели двигателя совмещенной конструкции электропривода сепаратора.

### ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ ИССЛЕДУЕМОГО ОБЪЕКТА

На **рис. 1** представлен сепаратор с двигателем совмещенной конструкции, содержащий корпус 1 и смонтированные в нем статор электродвигателя 2, 3 и массивный ротор-барабан 4. Статор электродвигателя установлен в корпусе 1 и содержит магнитопровод 2, в пазы которого уложена обмотка 3. Двигатель совмещенной конструкции электропривода сепаратора работает следующим образом. При подаче напряжения на обмотку, уложенную в пазы магнитопровода статора, возникает вращающееся магнитное поле статора, которое наводит вихревые токи в роторе-барабане, жестко связанном с осью, установленной в корпусе в подшипниковых опорах. Взаимодействие вращающегося магнитного поля, созданного током, протекающим в обмотках, и магнитного поля, созданного вихревыми токами в роторе-барабане, приводит к возникновению вращающего момента, под действием которого ротор-барабан приходит во вращение вокруг оси.



**Рис. 1. Сепаратор с двигателем совмещенной конструкции**

### ОПИСАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДВИГАТЕЛЯ СОВМЕЩЕННОЙ КОНСТРУКЦИИ И ЕЕ РЕАЛИЗАЦИЯ В *MATLAB SIMULINK*

Для проведения комплексных исследований двигателя совмещенной конструкции электропривода сепаратора была разработана математическая модель (1) двигателя совмещенной конструкции электропривода сепаратора (ДСК ЭС) на базе дифференциальных уравнений, описывающих электромагнитные и электромеханические процессы в ДСК ЭС, которая позво-

ляет получить функциональные связи между динамическими характеристиками и параметрами разработанной ДСК ЭС [4-7].

В формуле (1) приняты следующие маркировки  $X_{mi}$ , где индекс  $m = s, r$  указывает на принадлежность параметра  $X$  статору или ротору соответственно, а индекс  $i=1,2,3$  указывает на принадлежность параметра  $X$  одной из трех фаз и  $X_{ij}$ , где индекс  $i=1, 2, 3$  указывает на принадлежность параметра  $X$  одной из трех фаз, а индекс  $j=1, \dots, n$  указывает на номер параметра  $X$  относительно одной из фаз.

$$\begin{aligned}
 U_1(t) &= A_{11} \sin(\omega_f t) + \dots + A_{17} \sin(7\omega_f t); \\
 U_2(t) &= A_{21} \sin(\omega_f t - 120^\circ) + \dots + \\
 &+ A_{27} \sin(7\omega_f t - 120^\circ); \\
 U_3(t) &= A_{31} \sin(\omega_f t - 240^\circ) + \dots \\
 &+ A_{37} \sin(7\omega_f t - 240^\circ); \\
 U_1(t) &= R_s i_{s1}(t) + L_s \frac{di_{s1}(t)}{dt} + M \frac{di_{r1}(t)}{dt} - \\
 &- \frac{M}{2} \frac{d}{dt} (i_{s2}(t) + i_{r2}(t) + i_{s3}(t) + i_{r3}(t)); \\
 U_2(t) &= R_s i_{s2}(t) + L_s \frac{di_{s2}(t)}{dt} + M \frac{di_{r2}(t)}{dt} - \\
 &- \frac{M}{2} \frac{d}{dt} (i_{s1}(t) + i_{r1}(t) + i_{s3}(t) + i_{r3}(t)); \\
 U_3(t) &= R_s i_{s3}(t) + L_s \frac{di_{s3}(t)}{dt} + M \frac{di_{r3}(t)}{dt} - \\
 &- \frac{M}{2} \frac{d}{dt} (i_{s1}(t) + i_{r1}(t) + i_{s2}(t) + i_{r2}(t)); \\
 0 &= R_r i_{r1}(t) + L_r \frac{di_{r1}(t)}{dt} + M \frac{di_{s1}(t)}{dt} - \\
 &- \frac{M}{2} \frac{d}{dt} (i_{s2}(t) + i_{r2}(t) + i_{s3}(t) + i_{r3}(t)) + \\
 &+ \{L_r [i_{r2}(t) - i_{r3}(t)] + M [i_{s2}(t) - i_{s3}(t)] - \\
 &- \frac{M}{2} \frac{d}{dt} (i_{s3}(t) + i_{r3}(t) - i_{s2}(t) - i_{r2}(t))\} \frac{\omega_r(t)}{\sqrt{3}}; \\
 0 &= R_r i_{r2}(t) + L_r \frac{di_{r2}(t)}{dt} + M \frac{di_{s2}(t)}{dt} - \\
 &- \frac{M}{2} \frac{d}{dt} (i_{s1}(t) + i_{r1}(t) + i_{s3}(t) + i_{r3}(t)) + \\
 &+ \{L_r [i_{r3}(t) - i_{r1}(t)] + M [i_{s3}(t) - i_{s1}(t)] - \\
 &- \frac{M}{2} \frac{d}{dt} (i_{s1}(t) + i_{r1}(t) - i_{s3}(t) - i_{r3}(t))\} \frac{\omega_r(t)}{\sqrt{3}}; \\
 0 &= R_r i_{r3}(t) + L_r \frac{di_{r3}(t)}{dt} + M \frac{di_{s3}(t)}{dt} - \\
 &- \frac{M}{2} \frac{d}{dt} (i_{s1}(t) + i_{r1}(t) + i_{s2}(t) + i_{r2}(t)) +
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

$$\begin{aligned}
 &+ \{L_r [i_{r1}(t) - i_{r2}(t)] + M [i_{s1}(t) - i_{s2}(t)] - \\
 &- \frac{M}{2} \frac{d}{dt} (i_{s2}(t) + i_{r2}(t) - i_{s1}(t) - i_{r1}(t))\} \frac{\omega_r(t)}{\sqrt{3}};
 \end{aligned}$$

$$M_{\Sigma M}(t) = M_c(t) + M_{\text{дин}}(t);$$

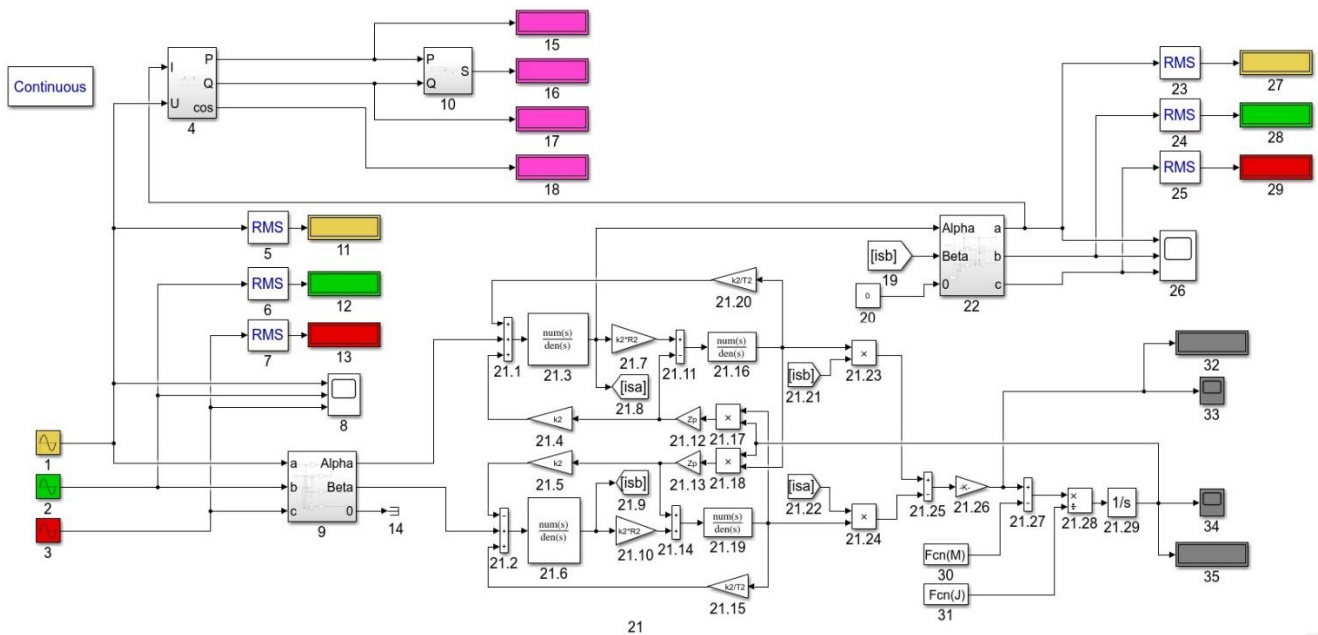
$$\begin{aligned}
 M_{\Sigma M}(t) &= \frac{p\sqrt{3}}{2} M_{i_{s1}}(t) i_{r3}(t) + \frac{p\sqrt{3}}{2} M_{i_{s2}}(t) \times \\
 &\times i_{r1}(t) + \frac{p\sqrt{3}}{2} M_{i_{s3}}(t) i_{r2}(t) - \frac{p\sqrt{3}}{2} M_{i_{s1}}(t) \times \\
 &\times i_{r2}(t) - \frac{p\sqrt{3}}{2} M_{i_{s2}}(t) i_{r3}(t) - \frac{p\sqrt{3}}{2} M_{i_{s3}}(t) \times \\
 &\times i_{r1}(t);
 \end{aligned}$$

$$M_c(t) = k_n f_{\tau} g \frac{d_6}{2} \frac{m_0 + m_6 + m(t)}{\eta_{\text{дв.мех}}};$$

$$M_{\text{дин}}(t) = \sum J(t) \frac{d\omega_r(t)}{dt},$$

где  $U_1(t)$ ,  $U_2(t)$ ,  $U_3(t)$  – фазное напряжение сети в функции времени, для возможности моделирования несинусоидальности питающего напряжения представлено в виде ряда Фурье, где  $A_{11}$ ,  $A_{12}$ , ...,  $A_{1n}$  – амплитудные значения 1-й, 2-й и последующих гармоник;  $\omega_f = 2\pi f$  – угловая скорость изменения напряжения сети, где  $f$  – частота сетевого напряжения;  $i_{s1}(t)$ ,  $i_{s2}(t)$ ,  $i_{s3}(t)$ ,  $i_{r1}(t)$ ,  $i_{r2}(t)$ ,  $i_{r3}(t)$  – токи, протекающие в цепях статора и ротора двигателя совмещенной конструкции электропривода сепаратора;  $R_s$  – активное сопротивление статорной обмотки двигателя совмещенной конструкции электропривода сепаратора, представленное по осям  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ;  $L_s$  – индуктивность статорной обмотки двигателя совмещенной конструкции электропривода сепаратора, представленная по осям  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ;  $\omega_r(t)$  – угловая скорость ротора;  $R_r$  – активное сопротивление ротора двигателя совмещенной конструкции электропривода сепаратора по осям  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ;  $L_r$  – индуктивность ротора двигателя совмещенной конструкции электропривода сепаратора по осям  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ;  $M$  – взаимоиנדукция;  $M_{\Sigma M}(t)$  – электромагнитный момент двигателя совмещенной конструкции электропривода сепаратора;  $M_c(t)$  – статический момент сопротивления двигателя совмещенной конструкции электропривода сепаратора;  $f_{\tau}$  – коэффициент трения подшипника;  $m_0$  – масса оси установки;  $m_6$  – масса барабана сепаратора;  $m(t)$  – масса сепарируемого продукта;  $d_3$  – диаметры вращения шариков подшипника, м;  $d_6$  – диаметр барабана;  $\eta_{\text{дв.мех}}$  – механический КПД двигателя;  $M_{\text{дин}}(t)$  – динамический момент двигателя совмещенной конструкции электропривода сепаратора;  $\Sigma J(t)$  – суммарный момент инерции двигателя совмещенной конструкции электропривода сепаратора.

Данная математическая модель была реализована в программном пакете *MatLab Simulink*. На рис. 2 представлен скриншот блок-схемы из программного пакета *MatLab Simulink* цифрового лабораторного стенда исследования режимов работы ДСК ЭС. Данные блок-схемы построены на базе стандартных блоков программного пакета *MatLab Simulink*, выполняющих математические операции, функции ввода и вывода данных [8].

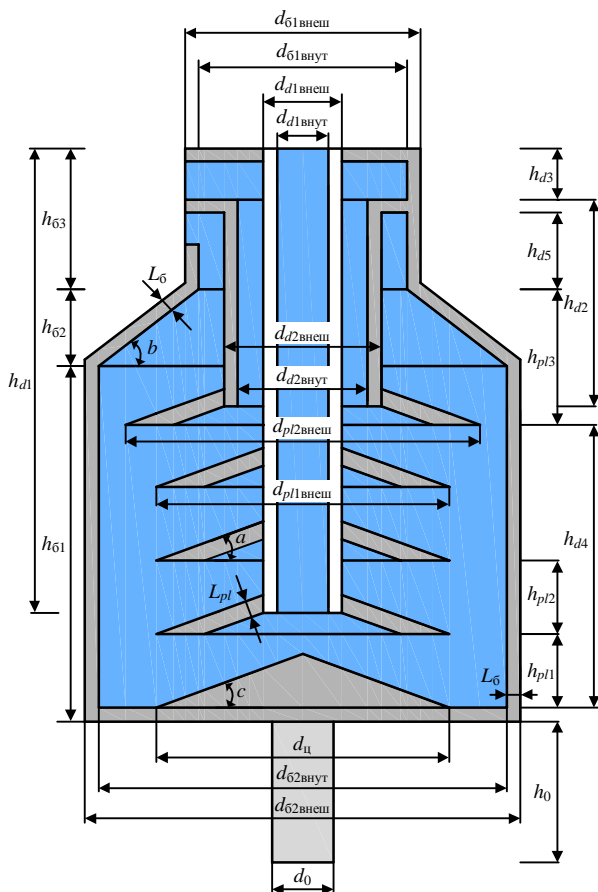


**Рис. 2. Блок-схема лабораторного стенда**

При анализе работы электромеханической системы двигателя совмещенной конструкции подробно рассмотрим моменты, входящие в уравнение движения двигателя:  $M_{\text{ЭМ}}(t)$  – вращающий момент электродвигателя;  $M_{\text{С}}(t)$  – статический момент сопротивления;  $M_{\text{дин}}(t)$  – динамический момент.

### ДОПУЩЕНИЯ, ПРИНЯТЫЕ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

На **рис. 3** представлена модель ротора-барабана сепаратора.



**Рис. 3. Модель ротора-барабана сепаратора**

При математическом описании двигателя совмещенной конструкции электропривода сепаратора, выводе формул для определения масс и моментов инерции элементов конструкции, для уточнения выражений статического момента сопротивления и динамического момента были приняты следующие допущения:

– корпус ротора-барабана состоит из трех частей: нижней, средней и верхней частей. Нижняя часть корпуса ротора-барабана состоит из основания, включающего сплошной однородный цилиндр (обозначение геометрических размеров на **рис. 3** и в математических выражениях:  $d_{62\text{внут}}$  – внутренний диаметр ротора-барабана,  $L_6$  – толщина стенки ротора-барабана) и центральный конус (обозначение геометрических размеров на **рис. 3** и в математических выражениях:  $d_{ц}$  – диаметр основания центрального конуса в основании ротора-барабана,  $c$  – угол между основанием и образующей конуса), и боковой стенки, являющейся полым однородным цилиндром (обозначение геометрических размеров на **рис. 3** и в математических выражениях:  $h_{61}$  – высота нижней части ротора-барабана,  $d_{62\text{внеш}}$  – внешний диаметр нижней части корпуса ротора-барабана), средняя часть корпуса ротора-барабана представляет из себя усеченный полый однородный конус (обозначение геометрических размеров на **рис. 3** и в математических выражениях:  $h_{62}$  – высота конической части ротора-барабана,  $b$  – угол между основанием и образующей конуса), в верхнюю часть корпуса ротора-барабана входят боковая стенка, являющаяся полым однородным цилиндром (обозначение геометрических размеров на **рис. 3** и в математических выражениях:  $h_{63}$  – высота верхней части ротора-барабана,  $d_{61\text{внеш}}$  – внешний диаметр верхней части корпуса/крышки ротора-барабана,  $d_{61\text{внут}}$  – внутренний диаметр верхней части корпуса ротора-барабана), крышка барабана, являющаяся толстостенным полым однородным цилиндром (обозначение геометрических размеров на **рис. 3** и в математических выражениях:  $d_{d1\text{внут}}$  – внутренний диаметр крышки ротора-барабана/ цен-

трального канала подачи сепарируемого продукта). Внутри корпуса ротора-барабана присутствуют центральный канал подачи сепарируемого продукта, являющийся толстостенным полым однородным цилиндром (обозначение геометрических размеров на **рис. 3** и в математических выражениях:  $h_{d1}$  – высота центрального канала подачи сепарируемого продукта,  $d_{d1\text{внеш}}$  – внешний диаметр центрального канала подачи сепарируемого продукта), канал вывода очищенного продукта, являющийся толстостенным полым однородным цилиндром (обозначение геометрических размеров на **рис. 3** и в математических выражениях:  $h_{d2}$  – высота канала вывода очищенного продукта,  $d_{d2\text{внеш}}$  – внешний диаметр канала вывода очищенного продукта,  $d_{d2\text{внут}}$  – внутренний диаметр канала вывода очищенного продукта), пакет тарелок, являющихся усеченными тонкостенными полыми однородными конусами, сопряженными с цилиндром центрального канала подачи сепарируемого продукта (обозначение геометрических размеров на **рис. 3** и в математических выражениях:  $d_{pl1\text{внеш}}$  – внешний диаметр пакета тарелок,  $L_{pl}$  – толщина тарелки,  $a$  – угол между основанием и образующей конуса тарелки), разделительная тарелка, являющаяся усеченным тонкостенным полым однородным конусом, сопряженным с цилиндром канала вывода очищенного продукта (обозначение геометрических размеров на **рис. 3** и в математических выражениях:  $d_{pl2\text{внеш}}$  – внешний диаметр разделительной тарелки);

– ось ротора-барабана является сплошным однородным цилиндром (обозначение геометрических размеров на **рис. 3** и в математических выражениях:  $d_o$  – диаметр оси сепаратора,  $h_o$  – высота оси сепаратора);

– многофазный сепарируемый продукт, протекающий через ротор-барабан, распределен однородно по всему объему ротора-барабана.

Формулы массы и момента инерции сплошных однородных объемных фигур по [9-11] следующие:

$$m_{\text{цилиндр}} = \pi \left( \frac{d_{\text{ц}}}{2} \right)^2 h_{\text{ц}} \rho_{\text{ц}}, \quad (2)$$

где  $d_{\text{ц}}$  – диаметр основания цилиндра;  $h_{\text{ц}}$  – высота цилиндра;  $\rho_{\text{ц}}$  – плотность материала цилиндра.

$$J_{\text{цилиндр}} = \frac{1}{2} m_{\text{цилиндр}} \left( \frac{d_{\text{ц}}}{2} \right)^2 = \frac{1}{2} \pi \left( \frac{d_{\text{ц}}}{2} \right)^2 \times h_{\text{ц}} \rho_{\text{ц}} \left( \frac{d_{\text{ц}}}{2} \right)^2 = \frac{1}{2} \pi \left( \frac{d_{\text{ц}}}{2} \right)^4 h_{\text{ц}} \rho_{\text{ц}}; \quad (3)$$

$$m_{\text{конус}} = \frac{1}{3} \pi \left( \frac{d_{\text{к}}}{2} \right)^2 h_{\text{к}} \rho_{\text{к}} = \frac{1}{3} \pi \left( \frac{d_{\text{к}}}{2} \right)^2 \times \left[ \frac{d_{\text{к}}}{2} \operatorname{tg} \alpha \right] \rho_{\text{к}} = \frac{1}{3} \pi \left( \frac{d_{\text{к}}}{2} \right)^3 \operatorname{tg} \alpha \rho_{\text{к}}, \quad (4)$$

где  $d_{\text{к}}$  – диаметр основания конуса;  $h_{\text{к}}$  – высота конуса,  $\alpha$  – угол между основанием и образующей конуса;  $\rho_{\text{к}}$  – плотность материала конуса.

$$J_{\text{конуса}} = \frac{3}{10} m_{\text{конус}} \left( \frac{d_{\text{к}}}{2} \right)^2 = \frac{3}{10} \cdot \frac{1}{3} \pi \times \left( \frac{d_{\text{к}}}{2} \right)^2 \frac{d_{\text{к}}}{2} \operatorname{tg} \alpha \rho_{\text{к}} \left( \frac{d_{\text{к}}}{2} \right)^2 = \frac{1}{10} \pi \times \left( \frac{d_{\text{к}}}{2} \right)^5 \operatorname{tg} \alpha \rho_{\text{к}}. \quad (5)$$

Многофазность сепарируемого продукта учитывается функцией плотности сепарируемого продукта  $\rho_{\text{ж}}(t)$ .

Введём для компактности коэффициент  $k$ :

$$k = k_{\text{п}} f_{\text{т}} g \frac{d_{\text{б}}}{2} \frac{1}{\eta_{\text{дв.мех}}}. \quad (6)$$

На основании принятых допущений с учетом конструкции (см. **рис. 3**) и (2), (4), (6), формула статического момента сопротивления [9, 12] из системы (1) математического описания двигателя совмещенной конструкции электропривода сепаратора имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} M_{\text{с}}(t) = & k \pi \left( \frac{d_o}{2} \right)^2 h_o \rho_{\text{ст}} + k \pi \left( \frac{d_{\text{б2внут}}}{2} \right)^2 L_{\text{б}} \rho_{\text{ст}} + \\ & + \frac{1}{3} k \pi \left( \frac{d_{\text{ц}}}{2} \right)^3 \operatorname{tg} \alpha \rho_{\text{ст}} + \\ & + \pi k \left[ \left( \frac{d_{\text{б2внеш}}}{2} \right)^2 - \left( \frac{d_{\text{б2внут}}}{2} \right)^2 \right] h_{\text{б1}} \rho_{\text{ст}} + \\ & + \pi k \left[ \left( \frac{d_{\text{б1внеш}}}{2} \right)^2 - \left( \frac{d_{\text{б1внут}}}{2} \right)^2 \right] h_{\text{б3}} \rho_{\text{ст}} + \\ & + \pi k \left[ \left( \frac{d_{\text{д1внеш}}}{2} \right)^2 - \left( \frac{d_{\text{д1внут}}}{2} \right)^2 \right] h_{\text{д1}} \rho_{\text{ст}} + \\ & + \pi k \left[ \left( \frac{d_{\text{д2внеш}}}{2} \right)^2 - \left( \frac{d_{\text{д2внут}}}{2} \right)^2 \right] h_{\text{д2}} \rho_{\text{ст}} + \\ & + \pi k \left[ \left( \frac{d_{\text{б1внут}}}{2} \right)^2 - \left( \frac{d_{\text{д1внеш}}}{2} \right)^2 \right] L_{\text{б}} \rho_{\text{ст}} + \\ & + \pi k \left[ \left( \frac{d_{\text{б1внут}}}{2} \right)^2 - \left( \frac{d_{\text{д2внеш}}}{2} \right)^2 \right] L_{\text{б}} \rho_{\text{ст}} + \\ & + \frac{1}{3} \pi k L_{\text{б}} \rho_{\text{ст}} A + n_{\text{pl}} \frac{1}{3} \pi k \rho_{\text{ст}} B - \\ & - \pi k \rho_{\text{ст}} \left( \frac{d_{\text{д1внеш}}}{2} \right)^2 \frac{L_{\text{б}}}{\sin a} \operatorname{tg} a + \frac{1}{3} \pi k \rho_{\text{ст}} C - \\ & - \pi k \rho_{\text{ст}} \left( \frac{d_{\text{д2внеш}}}{2} \right)^2 \frac{L_{\text{б}}}{\sin a} \operatorname{tg} a + \pi k \left( \frac{d_{\text{д1внут}}}{2} \right) h_{\text{д1}} \rho_{\text{ж}}(t) + \\ & - \frac{1}{3} \pi k \left( \frac{d_{\text{pl1внеш}}}{2} - \frac{L_{\text{pl}}}{\sin b} \right)^3 \operatorname{tg} a \rho_{\text{ж}}(t) - \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned}
 & -\frac{1}{3}\pi k \left( \frac{d_{d1\text{внеш}}}{2} \right)^3 \operatorname{tg} a \rho_{\text{ж}}(t) + \\
 & + \pi k \left( \frac{d_{pl1\text{внеш}}}{2} \right)^2 \left[ h_1 - \frac{d_{\text{ц}}}{2} \operatorname{tg} c \right] \rho_{\text{ж}}(t) - \\
 & -\frac{1}{3}\pi k \left( \frac{d_{\text{ц}}}{2} \right)^3 \operatorname{tg} c \rho_{\text{ж}}(t) + \\
 & + \frac{1}{3}\pi k (n_{pl} - 1) \left( \frac{d_{pl1\text{внеш}}}{2} - \frac{L_{pl}}{\sin a} \right)^3 \operatorname{tg} a \rho_{\text{ж}}(t) - \\
 & -\frac{1}{3}\pi k (n_{pl} - 1) \left( \frac{d_{d1\text{внеш}}}{2} \right)^3 \operatorname{tg} a \rho_{\text{ж}}(t) - \\
 & -\pi k (n_{pl} - 1) \left( \frac{d_{d1\text{внеш}}}{2} \right)^2 \left[ \frac{d_{pl1\text{внеш}}}{2} - \frac{L_{pl}}{\sin a} - \frac{d_{d1\text{внеш}}}{2} \right] \times \\
 & \times \operatorname{tg} a \rho_{\text{ж}}(t) + \pi k (n_{pl} - 1) \left[ \left( \frac{d_{pl1\text{внеш}}}{2} \right)^2 - \left( \frac{d_{d1\text{внеш}}}{2} \right)^2 \right] \times \\
 & \times \left[ h_{pl1} - \left( \frac{d_{pl1\text{внеш}}}{2} - \frac{d_{d1\text{внеш}}}{2} \right) \operatorname{tg} a \right] \rho_{\text{ж}}(t) + \\
 & -\pi k (n_{pl} - 1) \left[ \left( \frac{d_{pl1\text{внеш}}}{2} \right)^2 - \left( \frac{d_{d1\text{внеш}}}{2} \right)^2 \right] \times \\
 & \times \left( \frac{d_{pl1\text{внеш}}}{2} - \frac{d_{d1\text{внеш}}}{2} \right) \operatorname{tg} a \rho_{\text{ж}}(t) - \\
 & -\frac{1}{3}\pi k (n_{pl} - 1) \left( \frac{d_{pl1\text{внеш}}}{2} \right)^3 \operatorname{tg} a \rho_{\text{ж}}(t) + \\
 & + \frac{1}{3}\pi k (n_{pl} - 1) \left( \frac{d_{d1\text{внеш}}}{2} \right)^3 \operatorname{tg} a \rho_{\text{ж}}(t) + \\
 & + \frac{1}{3}\pi k \left( \frac{d_{pl2\text{внеш}}}{2} - \frac{L_{pl}}{\sin a} \right)^3 \operatorname{tg} a \rho_{\text{ж}}(t) - \\
 & -\frac{1}{3}\pi k \left( \frac{d_{d2\text{внеш}}}{2} \right)^3 \operatorname{tg} a \rho_{\text{ж}}(t) - \\
 & -\pi k \left( \frac{d_{d1\text{внеш}}}{2} \right)^2 \left[ \frac{d_{pl2\text{внеш}}}{2} - \frac{L_{pl}}{\sin a} - \frac{d_{d1\text{внеш}}}{2} \right] \operatorname{tg} a \rho_{\text{ж}}(t) + \\
 & + \pi k \left[ \left( \frac{d_{pl2\text{внеш}}}{2} \right)^2 - \left( \frac{d_{d1\text{внеш}}}{2} \right)^2 \right] \times \\
 & \times \left[ h_{pl2} - \left( \frac{d_{pl1\text{внеш}}}{2} - \frac{d_{d1\text{внеш}}}{2} \right) \operatorname{tg} a \right] \rho_{\text{ж}}(t) + \\
 & + \pi k \left[ \left( \frac{d_{pl1\text{внеш}}}{2} \right)^2 - \left( \frac{d_{d1\text{внеш}}}{2} \right)^2 \right] \times \\
 & \times \left( \frac{d_{pl1\text{внеш}}}{2} - \frac{d_{d1\text{внеш}}}{2} \right) \operatorname{tg} a \rho_{\text{ж}}(t) -
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & -\frac{1}{3}\pi k \left( \frac{d_{pl1\text{внеш}}}{2} \right)^3 \operatorname{tg} a \rho_{\text{ж}}(t) + \\
 & + \frac{1}{3}\pi k \left( \frac{d_{d1\text{внеш}}}{2} \right)^3 \operatorname{tg} a \rho_{\text{ж}}(t) + \\
 & + \pi k \left[ \left( \frac{d_{d2\text{внут}}}{2} \right)^2 - \left( \frac{d_{d1\text{внеш}}}{2} \right)^2 \right] h_{d2} \rho_{\text{ж}}(t) + \\
 & + \pi k \left[ \left( \frac{d_{d1\text{внут}}}{2} \right)^2 - \left( \frac{d_{d1\text{внеш}}}{2} \right)^2 \right] h_{d3} \rho_{\text{ж}}(t) + \\
 & + \pi k \left[ \left( \frac{d_{d2\text{внут}}}{2} \right)^2 - \left( \frac{d_{pl1\text{внеш}}}{2} \right)^2 \right] h_{d4} \rho_{\text{ж}}(t) + \\
 & + \frac{1}{3}\pi k \left( \frac{d_{d2\text{внут}}}{2} \right)^3 \operatorname{tg} b \rho_{\text{ж}}(t) - \\
 & -\frac{1}{3}\pi k \left( \frac{d_{d1\text{внут}}}{2} \right)^3 \operatorname{tg} b \rho_{\text{ж}}(t) - \\
 & -\pi k \left( \frac{d_{d1\text{внеш}}}{2} \right)^2 \left[ \frac{d_{d2\text{внут}}}{2} - \frac{d_{d1\text{внут}}}{2} \right] \operatorname{tg} b \rho_{\text{ж}}(t) + \\
 & + \pi k \left[ \left( \frac{d_{d2\text{внут}}}{2} \right)^2 - \left( \frac{d_{d1\text{внеш}}}{2} \right)^2 \right] \times \\
 & \times \left[ h_{pl3} - \left( \frac{d_{pl2\text{внеш}}}{2} - \frac{d_{d1\text{внеш}}}{2} \right) \operatorname{tg} b \right] \rho_{\text{ж}}(t) + \\
 & + \pi k \left[ \left( \frac{d_{d2\text{внут}}}{2} \right)^2 - \left( \frac{d_{d1\text{внеш}}}{2} \right)^2 \right] \times \\
 & \times \left( \frac{d_{pl2\text{внеш}}}{2} - \frac{d_{d1\text{внеш}}}{2} \right) \operatorname{tg} b \rho_{\text{ж}}(t) - \\
 & -\frac{1}{3}\pi k \left( \frac{d_{pl2\text{внеш}}}{2} \right)^3 \operatorname{tg} b \rho_{\text{ж}}(t) + \\
 & + \frac{1}{3}\pi k \left( \frac{d_{d1\text{внеш}}}{2} \right)^3 \operatorname{tg} b \rho_{\text{ж}}(t) + \\
 & + \pi k \left[ \left( \frac{d_{d1\text{внут}}}{2} \right)^2 - \left( \frac{d_{d2\text{внеш}}}{2} \right)^2 \right] h_{d5} \rho_{\text{ж}}(t); \\
 & A = \left( \frac{d_{d2\text{внеш}}}{2} \right)^3 \operatorname{tg} b - \left( \frac{d_{d2\text{внеш}}}{2} - \frac{L_{\text{б}}}{\sin b} \right)^3 \operatorname{tg} b - \\
 & - \left( \frac{d_{d1\text{внеш}}}{2} \right)^3 \operatorname{tg} b + \left( \frac{d_{d1\text{внеш}}}{2} - \frac{L_{\text{б}}}{\sin b} \right)^3 \operatorname{tg} b; \\
 & B = \left( \frac{d_{pl1\text{внеш}}}{2} \right)^3 \operatorname{tg} a - \left( \frac{d_{pl1\text{внеш}}}{2} - \frac{L_{pl}}{\sin a} \right)^3 \operatorname{tg} a; \\
 & C = \left( \frac{d_{pl2\text{внеш}}}{2} \right)^3 \operatorname{tg} a - \left( \frac{d_{pl2\text{внеш}}}{2} - \frac{L_{pl}}{\sin a} \right)^3 \operatorname{tg} a;
 \end{aligned}$$

где  $\rho_{ст}$  – плотность стали;  $n_{pl}$  – количество разделительных тарелок в барабане;  $\rho_{ж}(t)$  – плотность сепарируемого продукта. Остальные обозначения, принятые в формуле (7), пояснены выше при описании принятых допущений.

В переходном режиме двигатель совмещенной конструкции электропривода сепаратора переходит от одного установившегося режима к другому, при этом изменяются скорость, момент и ток электродвигателя. В случаях ускорения или замедления электропривода возникает инерционный или динамический момент, который двигатель должен преодолеть. Во время преодоления динамического момента двигатель находится в переходном режиме [12, 13].

В переходном режиме к электромагнитному моменту двигателя  $M_{ЭМ}$  и статическому моменту  $M_C$  в системе электропривода добавляется динамический момент  $M_{дин}$ .

Динамический момент увеличивает время пуска и остановки электропривода, а также время достижения установившейся скорости, поэтому для получения в результате моделирования реальных характеристик режимов работы сепаратора с двигателем совмещенной конструкции необходимо рассчитать суммарный момент инерции всех элементов привода:

$$\sum J(t) = J_o + J_k + \sum J_T + J_{ж}(t), \quad (8)$$

где  $J_o$  – момент инерции оси сепаратора;  $J_k$  – момент инерции корпуса барабана;  $J_T$  – момент инерции пакета тарелок;  $J_{ж}(t)$  – момент инерции сепарируемого продукта.

На основании принятых допущений с учетом конструкции (см. **рис. 3**) и (3), (5) формула суммарного момента инерции всех элементов привода двигателя совмещенной конструкции электропривода сепаратора (8) имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \sum J(t) = & \frac{1}{2} \pi \left( \frac{d_o}{2} \right)^4 h_o \rho_{ст} + \\ & + \frac{1}{2} \pi \left( \frac{d_{б2внут}}{2} \right)^4 L_6 \rho_{ст} + \frac{1}{10} \pi \left( \frac{d_{ц}}{2} \right)^5 \text{tg} c \rho_{ст} + \\ & + \frac{1}{2} \pi \left[ \left( \frac{d_{б2внеш}}{2} \right)^4 - \left( \frac{d_{б2внут}}{2} \right)^4 \right] h_{б1} \rho_{ст} + \\ & + \frac{1}{2} \pi \left[ \left( \frac{d_{б1внеш}}{2} \right)^4 - \left( \frac{d_{б1внут}}{2} \right)^4 \right] h_{б3} \rho_{ст} + \\ & + \frac{1}{2} \pi \left[ \left( \frac{d_{d1внеш}}{2} \right)^4 - \left( \frac{d_{d1внут}}{2} \right)^4 \right] h_{d1} \rho_{ст} + \\ & + \frac{1}{2} \pi \left[ \left( \frac{d_{d2внеш}}{2} \right)^4 - \left( \frac{d_{d2внут}}{2} \right)^4 \right] h_{d2} \rho_{ст} + \\ & + \frac{1}{2} \pi \left[ \left( \frac{d_{б1внут}}{2} \right)^4 - \left( \frac{d_{d1внеш}}{2} \right)^4 \right] L_6 \rho_{ст} + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & + \frac{1}{2} \pi \left[ \left( \frac{d_{б1внут}}{2} \right)^4 - \left( \frac{d_{d2внеш}}{2} \right)^4 \right] L_6 \rho_{ст} + \\ & + \frac{1}{10} \pi D + n_{pl} E + F + \frac{1}{2} \pi \left( \frac{d_{d1внут}}{2} \right)^4 h_{d1} \rho_{ж}(t) + \\ & + \frac{1}{10} \pi \left( \frac{d_{pl1внеш}}{2} - \frac{L_{pl}}{\sin a} \right)^5 \text{tg} a \rho_{ж}(t) - \\ & - \frac{1}{10} \pi \left( \frac{d_{d1внеш}}{2} \right)^5 \text{tg} a \rho_{ж}(t) - \\ & - \frac{1}{2} \pi \left( \frac{d_{pl1внеш}}{2} \right)^4 \left[ h_1 - \left( \frac{d_{ц}}{2} \right) \text{tg} c \right] \rho_{ж}(t) - \\ & - \frac{1}{10} \pi \left( \frac{d_{ц}}{2} \right)^5 \text{tg} c \rho_{ж}(t) + (n_{pl} - 1) G + \\ & + \frac{1}{10} \pi \left( \frac{d_{pl2внеш}}{2} - \frac{L_{pl}}{\sin a} \right)^5 \text{tg} a \rho_{ж}(t) - \\ & - \frac{1}{10} \pi \left( \frac{d_{d2внеш}}{2} \right)^5 \text{tg} a \rho_{ж}(t) - \\ & - \frac{1}{2} \pi \left( \frac{d_{d1внеш}}{2} \right)^4 \left( \frac{d_{pl2внеш}}{2} - \frac{L_{pl}}{\sin a} - \frac{d_{d1внеш}}{2} \right) \text{tg} a \rho_{ж}(t) + \\ & + \frac{1}{2} \pi \left[ \left( \frac{d_{pl2внеш}}{2} \right)^4 - \left( \frac{d_{d1внеш}}{2} \right)^4 \right] \times \\ & \times \left[ h_{pl2} - \left( \frac{d_{pl1внеш}}{2} - \frac{d_{d1внеш}}{2} \right) \text{tg} a \right] \rho_{ж}(t) + \\ & + \frac{1}{2} \pi \left[ \left( \frac{d_{pl1внеш}}{2} \right)^4 - \left( \frac{d_{d1внеш}}{2} \right)^4 \right] \times \\ & \times \left( \frac{d_{pl1внеш}}{2} - \frac{d_{d1внеш}}{2} \right) \text{tg} a \rho_{ж}(t) - \\ & - \frac{1}{10} \pi \left( \frac{d_{pl1внеш}}{2} \right)^5 \text{tg} a \rho_{ж}(t) + \frac{1}{10} \pi \left( \frac{d_{d1внеш}}{2} \right)^5 \text{tg} a \rho_{ж}(t) + \\ & + \frac{1}{2} \pi \left[ \left( \frac{d_{d2внут}}{2} \right)^4 - \left( \frac{d_{d1внеш}}{2} \right)^4 \right] h_{d2} \rho_{ж}(t) + \\ & + \frac{1}{2} \pi \left[ \left( \frac{d_{б1внут}}{2} \right)^4 - \left( \frac{d_{d1внеш}}{2} \right)^4 \right] h_{d3} \rho_{ж}(t) + \\ & + \frac{1}{2} \pi \left[ \left( \frac{d_{б2внут}}{2} \right)^4 - \left( \frac{d_{pl1внеш}}{2} \right)^4 \right] h_{d4} \rho_{ж}(t) + \\ & + \frac{1}{10} \pi \left( \frac{d_{б2внут}}{2} \right)^5 \text{tg} b \rho_{ж}(t) - \frac{1}{10} \pi \left( \frac{d_{б1внут}}{2} \right)^5 \text{tg} b \rho_{ж}(t) - \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned}
 & + \frac{1}{2} \pi \left( \frac{d_{d1\text{внеш}}}{2} \right)^4 \left[ \frac{d_{b2\text{внут}}}{2} - \frac{d_{b1\text{внут}}}{2} \right] \operatorname{tg} b \rho_{\text{ж}}(t) + \\
 & + \frac{1}{2} \pi \left[ \left( \frac{d_{b2\text{внут}}}{2} \right)^4 - \left( \frac{d_{d1\text{внеш}}}{2} \right)^4 \right] \times \\
 & \times \left[ h_{pl3} - \left( \frac{d_{pl2\text{внеш}}}{2} - \frac{d_{d1\text{внеш}}}{2} \right) \operatorname{tg} b \right] \rho_{\text{ж}}(t) + \\
 & + \frac{1}{2} \pi \left[ \left( \frac{d_{b2\text{внут}}}{2} \right)^4 - \left( \frac{d_{d1\text{внеш}}}{2} \right)^4 \right] \times \\
 & \times \left( \frac{d_{pl2\text{внеш}}}{2} - \frac{d_{d1\text{внеш}}}{2} \right) \operatorname{tg} b \rho_{\text{ж}}(t) - \\
 & - \frac{1}{10} \pi \left( \frac{d_{pl2\text{внеш}}}{2} \right)^5 \operatorname{tg} b \rho_{\text{ж}}(t) + \frac{1}{10} \pi \left( \frac{d_{d1\text{внеш}}}{2} \right)^5 \operatorname{tg} b \rho_{\text{ж}}(t) + \\
 & + \frac{1}{2} \pi \left[ \left( \frac{d_{b1\text{внут}}}{2} \right)^4 - \left( \frac{d_{d2\text{внеш}}}{2} \right)^4 \right] h_{d5} \rho_{\text{ж}}(t); \\
 D &= \left( \frac{d_{b2\text{внеш}}}{2} \right)^5 \operatorname{tg} b - \left( \frac{d_{b2\text{внеш}}}{2} - \frac{L_6}{\sin b} \right)^5 \operatorname{tg} b - \\
 & - \left( \frac{d_{b1\text{внеш}}}{2} \right)^5 \operatorname{tg} b + \left( \frac{d_{b1\text{внеш}}}{2} - \frac{L_6}{\sin b} \right)^5 \operatorname{tg} b; \\
 E &= \frac{1}{10} \pi \rho_{\text{ст}} \left[ \left( \frac{d_{pl1\text{внеш}}}{2} \right)^5 \operatorname{tg} a - \left( \frac{d_{pl1\text{внеш}}}{2} - \frac{L_{pl}}{\sin a} \right)^5 \operatorname{tg} a \right] - \\
 & - \frac{1}{2} \pi \rho_{\text{ст}} \left( \frac{d_{d1\text{внеш}}}{2} \right)^4 \frac{L_6}{\sin a} \operatorname{tg} a; \\
 F &= \frac{1}{10} \pi \rho_{\text{ст}} \left[ \left( \frac{d_{pl2\text{внеш}}}{2} \right)^5 \operatorname{tg} a - \left( \frac{d_{pl2\text{внеш}}}{2} - \frac{L_{pl}}{\sin a} \right)^5 \operatorname{tg} a \right] - \\
 & - \frac{1}{2} \pi \rho_{\text{ст}} \left( \frac{d_{d2\text{внеш}}}{2} \right)^4 \frac{L_6}{\sin a} \operatorname{tg} a; \\
 G &= \frac{1}{10} \pi \rho_{\text{ст}} \left( \frac{d_{pl1\text{внеш}}}{2} - \frac{L_{pl}}{\sin a} \right)^5 \operatorname{tg} a \rho_{\text{ж}}(t) - \\
 & - \frac{1}{10} \pi \left( \frac{d_{d1\text{внеш}}}{2} \right)^5 \operatorname{tg} a \rho_{\text{ж}}(t) - \frac{1}{2} \pi \left( \frac{d_{d1\text{внеш}}}{2} \right)^4 \times \\
 & \times \left( \frac{d_{pl1\text{внеш}}}{2} - \frac{L_{pl}}{\sin a} - \frac{d_{d1\text{внеш}}}{2} \right) \operatorname{tg} a \rho_{\text{ж}}(t) + \\
 & + \frac{1}{2} \pi \left[ \left( \frac{d_{pl1\text{внеш}}}{2} \right)^4 - \left( \frac{d_{d1\text{внеш}}}{2} \right)^4 \right] \times \\
 & \times \left[ h_{pl} - \left( \frac{d_{pl1\text{внеш}}}{2} - \frac{d_{d1\text{внеш}}}{2} \right) \operatorname{tg} a \right] \rho_{\text{ж}}(t) +
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + \frac{1}{2} \pi \left[ \left( \frac{d_{pl1\text{внеш}}}{2} \right)^4 - \left( \frac{d_{d1\text{внеш}}}{2} \right)^4 \right] \times \\
 & \times \left( \frac{d_{pl1\text{внеш}}}{2} - \frac{d_{d1\text{внеш}}}{2} \right) \operatorname{tg} a \rho_{\text{ж}}(t) - \\
 & - \frac{1}{10} \pi \left( \frac{d_{pl1\text{внеш}}}{2} \right)^5 \operatorname{tg} a \rho_{\text{ж}}(t) + \\
 & + \frac{1}{10} \pi \left( \frac{d_{d1\text{внеш}}}{2} \right)^5 \operatorname{tg} a \rho_{\text{ж}}(t).
 \end{aligned}$$

Данная математическая модель двигателя совмещенной конструкции электропривода сепаратора позволяет повысить точность характеристик, получаемых в процессе математического моделирования, благодаря учету геометрических особенностей подвижных элементов двигателя совмещенной конструкции электропривода сепаратора и возможности определения изменяющихся параметров электропривода, как следствия изменения процентного соотношения фаз сепарируемого продукта.

На рис. 4 и 5 представлены регулировочные характеристики двигателя совмещенной конструкции электропривода сепаратора при разных значениях нагрузки, создаваемой многофазным сепарируемым продуктом, полученные в результате вычислительного эксперимента.

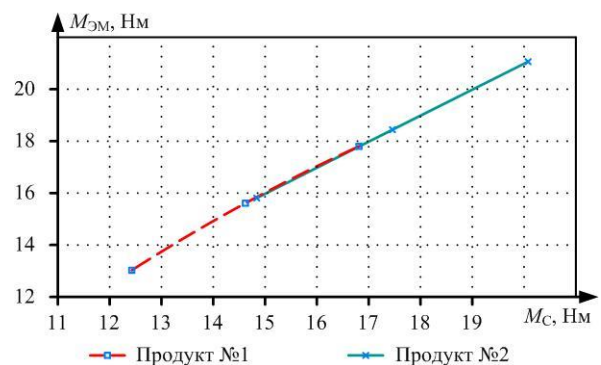


Рис. 4. График зависимости электромагнитного момента двигателя совмещенной конструкции электропривода сепаратора от момента сопротивления, создаваемого сепарируемым продуктом

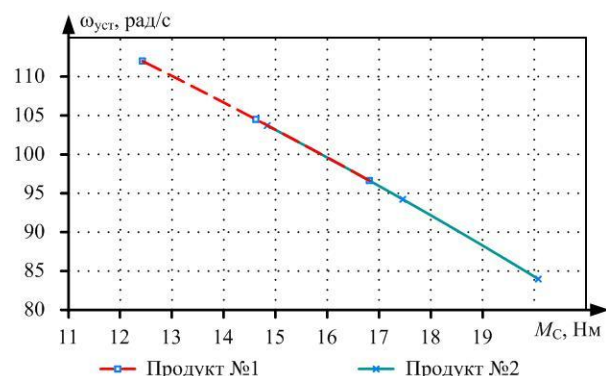


Рис. 5. График зависимости скорости вращения ротора от момента сопротивления, создаваемого сепарируемым продуктом

# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании уточненных значений статического момента сопротивления двигателя совмещенной конструкции электропривода сепаратора и его динамического момента представляется целесообразным дальнейшее проведение вычислительного эксперимента для получения рабочих и регулировочных характеристик электропривода сепаратора с двигателем совмещенной конструкции.

Результатом работы является:

– разработка математической модели двигателя совмещенной конструкции электропривода сепаратора на базе дифференциальных уравнений, описывающих электромагнитные и электромеханические процессы в двигателе совмещенной конструкции электропривода сепаратора, которая позволяет получить функциональные связи между динамическими характеристиками и параметрами, разработанного сепаратора с двигателем совмещенной конструкции;

– получение выражений статического момента сопротивления двигателя совмещенной конструкции электропривода сепаратора и его динамического момента, в выражения введены параметры, учитывающие геометрические особенности подвижных элементов двигателя совмещенной конструкции электропривода сепаратора и многофазность сепарируемого продукта;

– реализация математической модели двигателя совмещенной конструкции электропривода сепаратора в программном пакете *MatLab Simulink*.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. 1427501 СССР, H02K9/19, B04B9/02. Сепаратор для жидкости / Гайтов Б.Х., Копелевич Л.Е. Письменный В.Я., Быков Е.А., заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет». № 4228756/24-07, заявл. 09.03.1987, опублик. 30.09.1988.
2. Пат. 2593626 Российская Федерация, МПК7 B04B5/10, B03C5/02, B01D17/06, B01D43/00, B04B9/02. Установка для сепарирования нефти / Копелевич Л.Е.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет». № 2015110414/05, заявл. 23.03.2015, опублик. 10.08.2016.
3. Пат. 2706320 Российская Федерация, МПК7 B04B 9/02,

B04B 9/00, B04B 9/04, B04B 15/00. Сепаратор для полидисперсных жидких систем / Кашин Я.М., Копелевич Л.Е., Самородов А.В., Ким В.А.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет». № 2019111177, заявл. 12.04.2019, опублик. 15.11.2019.

4. Kashin Y.M., Kopelevich L.E., Kim V.A. Determination of the Parameters of the Electromagnetic System of the Installation for Oil Treatment // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). IEEE, 2020. Pp. 1-7. doi: 10.1109/ICIEAM48468.2020.9111990.
5. Копелевич Л.Е., Ким В.А., Артеян К.З. Математическая модель электромагнитных и электромеханических процессов установки для сепарирования нефти // Технические и технологические системы: материалы X Международной научной конференции. Краснодар, 2019. С. 60-63.
6. Сепаратор для переработки нефти совмещенной конструкции и его температурное поле / Я.М. Кашин, Л.Е. Копелевич, А.В. Самородов, В.А. Ким, К.З. Артеян // Научные труды КубГТУ. 2019. №5. С. 86-99.
7. Данилов П.Е., Барышников В.А., Рожков В.В. Теория электропривода: учебное пособие. М.; Берлин: Директ-Медиа, 2018. 415 с.
8. Ershov M., Sidorenko M. The Research of Frequency-Controlled Synchronous Drive Transient Processes // X International Conference on Electrical Power Drive Systems (ICEPDS). Novocherkassk, 2018. Pp. 1-4. doi: 10.1109/ICEPDS.2018.8571530.
9. Королев А.В. Исследование момента сопротивления вращению и статической грузоподъемности упорного подшипника качения // Вестник СГТУ. 2011. №2(56). Вып. 2. С. 84-92.
10. Масса сплошной детали // tvlad.ru: Математика для ювелиров. URL: <https://tvlad.ru/mass/massa-splushnoy-detal.html> (дата обращения: 21.01.2021).
11. Список моментов инерции // wikipedia.org: Свободная энциклопедия. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Список\\_моментов\\_инерции](https://ru.wikipedia.org/wiki/Список_моментов_инерции) (дата обращения: 21.01.2021).
12. К вопросу расчета температурного поля энергосберегающей установки для переработки нефти / Б.Х. Гайтов, Я.М. Кашин, Л.Е. Копелевич, А.В. Самородов, В.А. Ким // Энергосбережение и водоподготовка. 2020. № 4 (126). С. 7-16.
13. Дьяконов В.П. MatLab. Полный самоучитель. М.: ДМК Пресс, 2012. 768 с.

Поступила в редакцию 24 февраля 2021 г.

## INFORMATION IN ENGLISH

### MATHEMATICAL MODEL OF COMBINED CONFIGURATION MOTOR OF SEPARATOR ELECTRIC DRIVE

Yakov M. Kashin

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Department of Electrical Engineering and Electrical Machines, Kuban State Technological University, Krasnodar, Russia. E-mail: [jlms@mail.ru](mailto:jlms@mail.ru). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0055-3700>.

Lev E. Kopelevich

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Department of Electrical Engineering and Electrical Machines, Kuban State Technological University, Krasnodar, Russia. E-mail: [kklev@mail.ru](mailto:kklev@mail.ru). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4346-4836>.

Aleksandr V. Samorodov

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Department of Electrical Engineering and Electrical Machines, Kuban State Technological University, Krasnodar, Russia. E-mail: [alex.samorodoff@gmail.com](mailto:alex.samorodoff@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0465-6798>.

Vladislav A. Kim

Postgraduate student, Department of Electrical Engineering and Electrical Machines, Kuban State Technological University, Krasnodar, Russia. E-mail: vladk-kub@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0934-4374>.

Evgeniy A. Marakhovskiy

Student, Department of Electrical Engineering and Electrical Machines, Kuban State Technological University, Krasnodar, Russia. E-mail: zheka3334@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9152-2397>

The article is concerned with the engine combined design of the electric separator consisting of an electric motor stator and solid rotor that performs the function of the working body of the electric separator drum. An electric drive is an electromechanical system consisting, in general, of interacting electric power converters, electromechanical and mechanical converters, control and information devices. The electric drive of the separator with the motor of the combined design contains the control device and the motor of the combined design. The article presents a mathematical model of the engine combined design of the electric separator based on differential equations describing electromagnetic and Electromechanical processes in the engine combined design of the drive cage, making it possible to obtain a functional relationship between dynamic characteristics and parameters developed by the engine combined design of the electric separator. The article considers the derivation of the expressions of the moment of resistance and the moment of inertia of the electric drive of the separator, which is an integral part of the combined design motor. In the expression of the resistance moment and the moment of inertia of the electric separator combined with the engine design variables are introduced taking into account the geometric features of the mobile elements of the combined design engine of the electric separator and changes in the composition of the multiphase separated piece of the product. The mathematical model is implemented in the software package MatLab Simulink and makes it possible to consider the influence of the parameters of voltage (the supply voltage and frequency supply voltage, the degree of distortion of the sinusoidal waveform of the supply voltage, the highest voltage harmonics, for example, the fifth or seventh); change the torque and moment of inertia generated by the separated piece product, the electromagnetic torque of the motor combined design of the drive cage and the speed of rotation of the working body of the electric separator combined with the engine design.

**Keywords:** electric drive, separator, energy saving, combined construction, massive rotor, mathematical model, block diagram, moment of resistance, moment of inertia.

#### REFERENCES

- Gaitov B.Kh., Kopelevich L.E., Pismenny V.Y., Bykov E.A. *Separator dlya zhidkosti* [Separator for liquids]. Patent SU, no. 1427501, 1988.
- Kopelevich L.E. *Ustanovka dlya separirovaniya nefi* [Oil separation unit]. Patent RF, no. 2015110414/05, 2016.
- Kashin Y.M., Kopelevich L.E., Samorodov A.V., Kim V.A. *Separator dlya polidispersnykh zhidkikh system* [Separator for poly-dispersed liquid systems]. Patent RF, no. 2019111177, 2019.
- Kashin Yu.M., Kopelevich L.E., Kim V.A. Determination of parameters of the electromagnetic system of the oil treatment plant. 2020 International Conference on Industrial Engineering, Application and Production (ICIEAM). IEEE, 2020. Pp. 1-7. doi: 10.1109/ICIEAM48468.2020.9111990.
- Kopelevich L.E., Kim V.A., Artenyan K.Z. Mathematical model of electromagnetic and electromechanical processes of the oil separation unit. *Tekhnicheskie i tekhnologicheskie sistemy: materialy desiatoy Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii* [Technical and technological systems. Proceedings of the Tenth International Scientific Conference]. Krasnodar, 2019, pp. 60-63. (In Russian)
- Kashin Ya.M., Kopelevich L.E., Samorodov A.V., Kim V.A., Artenyan K.Z. Separator for oil refining of combined design and its temperature field. *Nauchnye trudy KubGTU* [Electronic network polythematic journal "Scientific Works of KubSTU"], 2019, no. 5, pp. 86-99. (In Russian)
- Danilov P.E., Baryshnikov V.A., Rozhkov V.V. *Teoriya elektroprivoda* [Theory of electric drive]. Moscow, Berlin, Direct-Media Publ., 2018. 415 p. (In Russian)
- M. Ershov, M. Sidorenko. The Research of Frequency-Controlled Synchronous Drive Transient Processes. 2018 X International Conference on Electrical Power Drive Systems (ICEPDS), Novocherkassk, 2018. Pp. 1-4. doi: 10.1109/ICEPDS.2018.8571530.
- Korolev A.V. Investigation of the moment of resistance to rotation and static load capacity of a thrust rolling bearing. *Vestnik SGTU* [Bulletin of SSTU], 2011, no. 2(56), iss. 2, pp. 84-92. (In Russian)
- Mass of a solid part. tvlad.ru: Mathematics for Jewelers. Available at: <https://tvlad.ru/mass/massa-splshnoy-detal.html> (accessed 21 January 2021). (In Russian)
- List of moments of inertia. Wikipedia.org. Free Encyclopedia Available at: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Spicata> (accessed: 21 January 2021). (In Russian)
- Gaitov B.Kh., Kashin Ya.M., Kopelevich L.E., Samorodov A.V., Kim V.A. On the issue of calculating the temperature field of an energy-saving installation for oil refining // *Energoberezhenie i vodopodgotovka* [Energy Saving and water treatment], 2020, no. 4 (126), pp. 7-16. (In Russian)
- Diakonov V. P. *MatLab. Polnyi samouchitel* [MatLab. Complete tutorial]. Moscow, DMC Press Publ., 2012. 768 p. (In Russian)

Математическая модель двигателя совмещенной конструкции электропривода сепаратора / Я.М. Кашин, Л.Е. Копелевич, А.В. Самородов, В.А. Ким, Е.А. Мараховский // *Электротехнические системы и комплексы*. 2021. № 2(51). С. 30-38. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-2\(51\)-30-38](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-2(51)-30-38)

Kashin Ya.M., Kopelevich L.E., Samorodov A.V., Kim V.A., Marakhovskiy E.A. Mathematical Model of Combined Configuration Motor of Separator Electric Drive. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2021, no. 2(51), pp. 30-38. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-2\(51\)-30-38](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-2(51)-30-38)

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ С УЧЕТОМ ДИНАМИЧЕСКИХ НЕЛИНЕЙНОСТЕЙ

В работе рассматриваются вопросы выбора оптимальных параметров регулятора систем автоматического управления с импульсными преобразователями напряжения с учетом их динамических нелинейностей. Импульсные преобразователи с обратной связью по напряжению являются нелинейными динамическими системами, в которых возможно возникновение нелинейных колебаний при неверном выборе параметров регулятора, что ухудшает качество выходного напряжения. Проектирование таких систем, как правило, ведется с использованием малосигнальных динамических моделей, позволяющих применять методы теории автоматического управления линейными системами, но не позволяющие учесть возможность возникновения нелинейных колебаний. При выборе оптимальных параметров регулятора наряду с линейными динамическими моделями предлагается использовать нелинейные динамические модели импульсных преобразователей напряжения, позволяющие учесть специфические особенности нелинейной динамики систем рассматриваемого класса. В работе на конкретном примере показана проблема линейного подхода к проектированию импульсных систем преобразования электроэнергии. Проведен дополнительный анализ системы с использованием предложенной автором в одной из ранних работ обобщенной математической модели импульсных преобразователей напряжения и выявлены области желаемого режима работы преобразователя в пространстве параметров регулятора. Показана значимость уточнения области оптимальных параметров регулятора с использованием нелинейных динамических моделей. Предложена методика выбора оптимальных параметров регулятора, исключающая возникновение нежелательных динамических режимов работы преобразователя в широком диапазоне изменения сопротивления нагрузки и входного напряжения преобразователя. Представленные результаты получены впервые и могут быть распространены на широкий класс импульсных преобразователей электроэнергии.

**Ключевые слова:** шаговый электродвигатель, мостовой преобразователь, двойная инверторная система, автономные инверторы напряжения, векторное управление, сдвоенные инверторы напряжения.

### ВВЕДЕНИЕ

Импульсные преобразователи напряжения достаточно давно применяются в различных сферах деятельности, но, несмотря на это, в настоящее время не решены все проблемы их проектирования [1–3].

Как известно, они представляют собой замкнутые системы автоматического управления с обратной связью по выходному напряжению, что позволяет обеспечивать точность его поддержания на энергетическом выходе в условиях внешних возмущений, к которым, как правило, относится изменение входного напряжения и сопротивления нагрузки [4–11].

Очевидно, что основной задачей в данном случае является выбор параметров регулятора, обеспечивающих устойчивость системы [1–3]. В настоящее время на практике для этого применяются метод осреднения пространства состояний [1], что позволяет получать линеаризованные малосигнальные модели, которые позволяют применять теорию линейных систем автоматического управления. Но при этом стоит помнить, что малосигнальная модель является лишь приближенной и не способна учесть специфические особенности нелинейной динамической системы. В частности, метод осреднения пространства состояний предполагает малость пульсаций фазовых переменных и, соответственно, исключение их из рассмотрения.

Системы автоматического управления (САУ) с импульсными преобразователями напряжения являются уникальными техническими объектами и могут быть отнесены к классу нелинейных динамических систем. Такие системы в своем составе, как правило, имеют тактовый генератор, задающий частоту широтно-импульсной модуляции (ШИМ), что позволяет их отнести к колебательным системам, в которых на выходе, даже при работе в желаемом режиме, наблюдаются колебания. Очевидно, что для наиболее полного учета свойств таких систем необходимо применять специализированные методы анализа, основанные на методе точечных отображений, теории бифуркаций и хаоса [4–6].

Характерной особенностью импульсных преобразователей напряжения является их склонность к переходу в нежелательные динамические режимы в результате бифуркаций при изменении одного или нескольких параметров системы [4–6]. При работе в нежелательных динамических режимах на выходе преобразователя, как правило, наблюдаются нелинейные колебания с большой амплитудой, частота которых в  $m$  раз ниже частоты ШИМ ( $m$ -кратность цикла), а также могут возникать хаотические колебания. Под желаемым динамическим режимом будем понимать так называемый 1-цикл ( $m = 1$ ) [4], когда частота колебаний выходного напряжения равна частоте ШИМ, определяемой задающим генератором в составе системы управления. В таком режиме амплитуда пульсаций минимальна. Нелинейные колебания связаны с наличием динамических нелинейностей системы, так что очевидно, что их

возникновение нельзя предсказать с использованием малосигнальных динамических моделей, что требует использования нелинейных динамических моделей, в полной мере учитывающих особенности систем рассматриваемого класса [5, 6].

Таким образом, можно отметить следующее:

1. Использование линеаризованных динамических моделей позволяет обеспечить устойчивость системы с заданными запасами устойчивости по фазе и амплитуде, но не позволяет учесть возникновение нелинейных колебаний.

2. Теория нелинейных динамических систем позволяет учитывать возможность возникновения нелинейных колебаний в системе, но при этом не позволяет применять теорию линейных систем.

На практике целесообразно использовать два указанных подхода совместно с целью достижения устойчивости САУ как линейной и ее работы в желаемом динамическом режиме (1-цикле).

В настоящее время существует достаточно много работ, посвященных как применению линеаризованных моделей [1-3], так и нелинейных динамических моделей [4-11], но ни в одной из этих работ не уделялось существенного внимания вопросам практического применения теории нелинейных динамических систем при выборе параметров регуляторов систем автоматического управления с импульсными преобразователями напряжения.

В данной работе предлагается методика совместного использования двух подходов с целью обеспечения работы замкнутой системы автоматического управления в желаемом режиме. Представленные результаты могут применяться на этапе проектирования.

#### ОПИСАНИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ НЕПОСРЕДСТВЕННОГО ПОВЫШАЮЩЕГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ

Функциональная схема замкнутой системы автоматического управления на основе непосредственного повышающего преобразователя напряжения с ПИ-регулятором представлена на **рис. 1**.

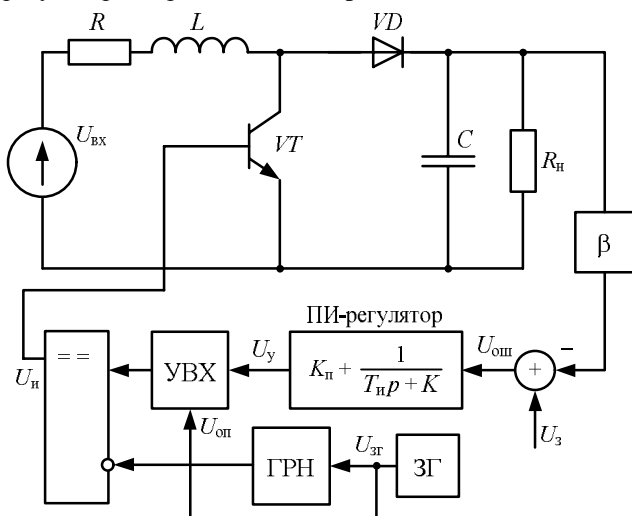


Рис. 1. Структурная схема преобразователя постоянного напряжения

Здесь приняты следующие обозначения: ЗГ – задающий генератор; ГРН – генератор пилообразного напряжения; УВХ – устройство выборки-хранения;  $\beta$  – усилитель обратной связи с коэффициентом  $\beta$ ;  $T_n$ ,  $K_n$ ,  $K$  – параметры ПИ-регулятора; VT – силовой транзистор; VD – силовой диод; L – дроссель выходного фильтра; C – конденсатор выходного фильтра; R – активное сопротивление дросселя;  $R_n$  – сопротивление нагрузки;  $U_{вх}$  – входное напряжение;  $U_z$  – сигнал задания;  $U_{ош}$  – сигнал ошибки;  $U_y$  – сигнал управления;  $U_{зг}$  – сигнал задающего генератора;  $U_{оп}$  – пилообразное развертывающее напряжение;  $U_i$  – импульсы управления силовым ключом.

Основная цель представленной на **рис. 1** системы управления – это стабилизация напряжения на нагрузке за счет применения широтно-импульсной модуляции.

В составе рассмотренной САУ используется реальный ПИ-регулятор, где коэффициент  $K$  учитывает сопротивление утечки конденсатора схемы регулятора на операционном усилителе как в работе [12]. При  $K=0$  ПИ-регулятор является идеальным.

Рассматриваемая система реализует так называемую ШИМ первого рода (ШИМ-I), когда ширина импульса на тактовом интервале определяется выборкой сигнала управления в начале тактового интервала с помощью УВХ, что поясняется на **рис. 2**.

Рассмотрим кратко принцип действия силовой части преобразователя в режиме прерывистого тока дросселя [1–3].

На интервале от  $(k-1)T$  до  $t_{k1}$  силовой ключ открыт и ток дросселя  $i_L$  нарастает по практически линейному закону, т.е. в сердечнике накапливается энергия.

На интервале от  $t_{k1}$  до  $t_{k2}$  силовой ключ закрыт и энергия, накопленная в дросселе, передается в нагрузку.

На интервале от  $t_{k2}$  до  $kT$  закрыт диод VD, поскольку в момент  $t_{k2}$  ток дросселя упал до нуля и выходной конденсатор разряжается в нагрузку.

Длительность интервала от  $(k-1)T$  до  $t_{k1}$  определяется величиной выходного напряжения преобразователя, что соответствует ШИМ. Момент  $t_{k1}$  зависит от величины напряжения управления в начале тактового интервала.

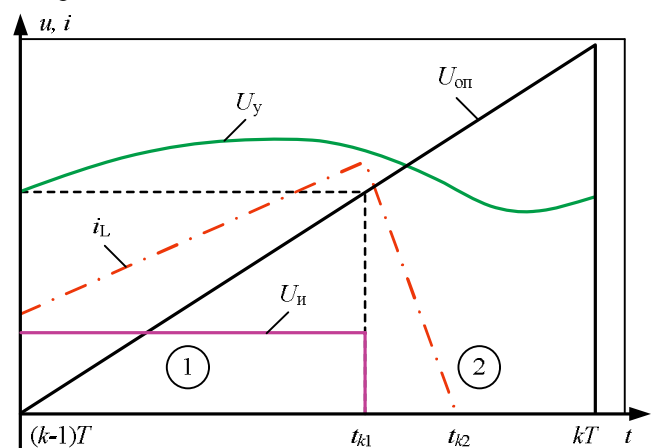


Рис. 2. К пояснению принципа действия непосредственного повышающего преобразователя

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ИМПУЛЬСНОГО  
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ

В данном разделе приводятся результаты расчета САУ на основе повышающего преобразователя напряжения, произведенные на основе стандартных методик с целью демонстрации проблемы нелинейных колебаний. При этом рассматривался преобразователь со следующими параметрами: максимальное входное напряжение  $U_{вх\ max}=20$  В, минимальное входное напряжение  $U_{вх\ min}=30$  В, выходное напряжение  $U_{вых}=48$  В, частота ШИМ  $f=100$  кГц, минимальная мощность нагрузки  $P_{н\ min}=150$  Вт, максимальная мощность нагрузки  $P_{н\ max}=400$  Вт, коэффициент обратной связи  $\beta=0,0416$ , допустимый размах колебаний выходного напряжения  $\Delta U_{вых}=1,44$  В. Данному диапазону мощностей нагрузки соответствуют диапазон сопротивлений нагрузки с границами  $R_{н\ min}=5$  Ом,  $R_{н\ max}=15,36$  Ом.

Параметры реактивных элементов силовой части могут быть найдены по выражениям [3]:

$$L = \frac{(U_{вых\ max} - U_{вх\ min})(1 - \gamma_{max})\gamma_{max}}{2\gamma_{max}fI_{н\ min}},$$

где  $\gamma_{max}=1-U_{вх\ min}/U_{вых}$  – максимальное значение коэффициента заполнения;  $I_{н\ min}$  – минимальное значение тока нагрузки;

$$C = \frac{I_{н\ max}\gamma_{max}}{2\Delta U_{вых}f},$$

где  $I_{н\ max}$  – максимальное значение тока нагрузки.

По результатам расчетов параметры реактивных элементов преобразователя составили:  $L=20$  мкГн,  $C=35$  мкФ.

Определим область устойчивости САУ в пространстве параметров регулятора. Для этого составляется характеристическое уравнение [13]:

$$1 + e^{-j\varphi}W_{oy}(p)W_{рег}(p)\beta = 0,$$

где  $\varphi$  – запас устойчивости по фазе;  $W_{oy}(p)$  – передаточная функция импульсного преобразователя [1],

$$W_{oy}(p) = \frac{b_1p + b_0}{a_2p^2 + a_1p + a_0},$$

где  $a_2 = U_{оп\ m}C(1-\gamma)LR_{н}$ ;

$$a_1 = U_{оп\ m}[(1-\gamma)L + C(1-\gamma)RR_{н}];$$

$$a_0 = U_{оп\ m}[(1-\gamma)R + (1-\gamma)^3R_{н}]; \quad b_1 = LU_{вх\ M};$$

$$b_0 = RU_{вх\ M} - R_{н}U_{вх\ M}(1-\gamma)^2; \quad M = 1/(1-\gamma),$$

$U_{оп\ m}$  – амплитуда развертывающего напряжения;  $\gamma$  – коэффициент заполнения в рабочей точке;  $W_{рег}(p)$  – передаточная функция регулятора,

$$W_{рег}(p) = K_{п} + \frac{K_{и}}{p},$$

где  $K_{и}=1/T_{и}$ .

На основе характеристического уравнения можно получить выражения для параметров ПИ-регулятора [13]:

$$K_{и}(\omega, \varphi) = \frac{N_1}{b_0^2 + b_1^2\omega^2};$$

$$N_1 = a_1b_0\omega^2\cos(\varphi) - a_0b_1\omega^2\cos(\varphi) + a_2b_1\omega^4\cos(\varphi) + a_1b_1\omega^3\sin(\varphi) - a_2b_0\omega^3\sin(\varphi) + a_0b_0\omega\sin(\varphi);$$

$$K_{п}(\omega, \varphi) = \frac{N_2}{b_0^2 + b_1^2\omega^2};$$

$$N_2 = a_2b_0\omega^2\cos(\varphi) - a_1b_1\omega^2\cos(\varphi) - a_0b_0\cos(\varphi) + a_2b_1\omega^3\sin(\varphi) - a_0b_1\omega\sin(\varphi) + a_1b_0\omega\sin(\varphi).$$

Изменяя частоту  $\omega$  от 0 до 10 МГц, можно построить границы областей устойчивости САУ с запасом устойчивости не менее  $\varphi=25^\circ$ . На **рис. 3** представлены границы для четырех наборов параметров системы, сформированных из граничных значений входного напряжения  $U_{вх}$  и сопротивления нагрузки  $R_{н}$ . Области желаемых значений параметров регулятора для каждого набора параметров лежат справа от этих границ. Очевидно, что пересечение 4-х областей желаемых параметров дает область желаемых параметров регулятора, которые обеспечивают запас устойчивости по фазе более  $25^\circ$ . Очевидно, что указанная область располагается ниже кривой  $L_1$  (на **рис. 3** заштрихована), соответствующей параметрам  $U_{вх\ min}$  и  $R_{н\ min}$ .

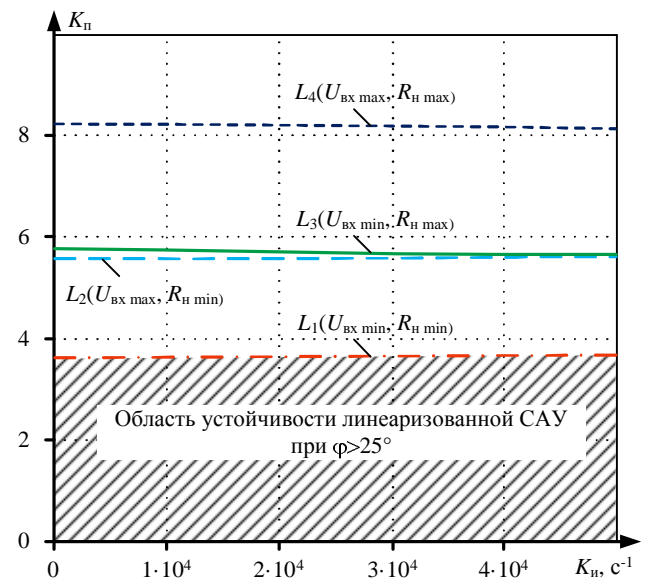


Рис. 3. Границы областей устойчивости линеаризованной САУ

## ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИКИ САУ

Результаты математического моделирования САУ с непосредственным повышающим преобразователем напряжения получены с использованием обобщенной математической модели, рассмотренной автором в работе [11].

На рис. 4 представлена карта динамических режимов и диаграмма размаха колебаний выходного напряжения. Диаграммы на рис. 4 построены в пространстве параметров регулятора  $K_n$  и  $K_{in}$  при  $U_{вх}=20$  В и  $R_n=5$  Ом.

На картах динамических режимов символами  $\Pi_i$  разными цветами отмечены области существования различных режимов, где символ  $i$  – кратность цикла  $m$ . Так, например,  $\Pi_1$  – это область существования желаемого 1-цикла. Области  $\Pi_x$  – соответствуют хаотическим режимам функционирования преобразователя ( $m \rightarrow \infty$ ).

Как видно из рис. 4, в области нежелательных режимов, располагающейся правее бифуркационной границы  $L_{n1}$ , размах колебаний выходного напряжения намного больше, чем в области желаемого режима  $\Pi_{1,1}$ , что делает невозможным выбор параметров регулятора из этой области. Данную ситуацию поясняет рис. 5, где приведены примеры временных диаграмм в точках  $P_1$  ( $K_n=0,9$ , а  $K_{in}=25000$ ) и  $P_2$  ( $K_n=0,9$ , а  $K_{in}=16666,66$ ) на карте динамических режимов. В нежелательном режиме работы в точке  $P_1$  (кривая 1 на рис. 5) размах колебаний выходного напряжения составляет 30 В, что в 21,4 раза больше, чем в желаемом режиме работы в точке  $P_2$  (кривая 2 на рис. 5).

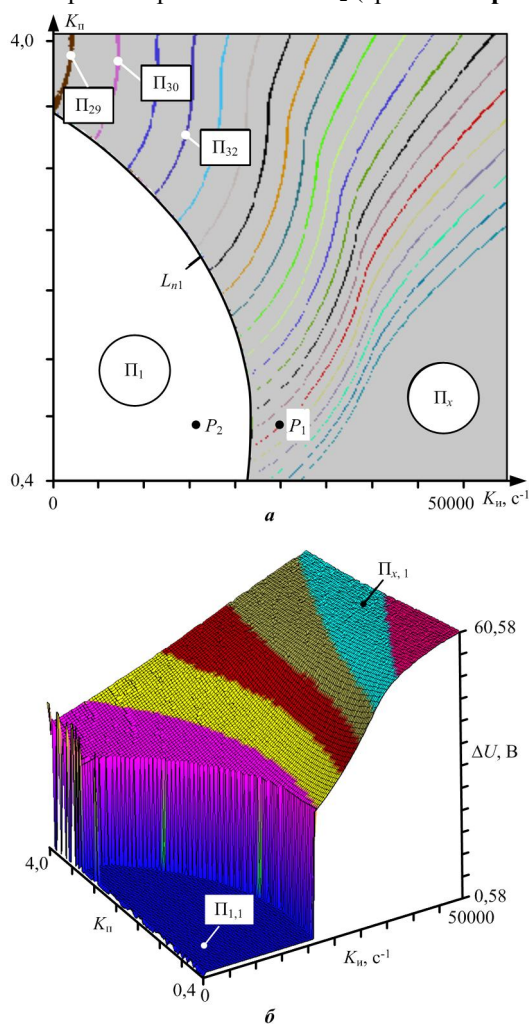


Рис. 4. Двухпараметрические диаграммы: а – карта динамических режимов; б – диаграмма размаха колебаний

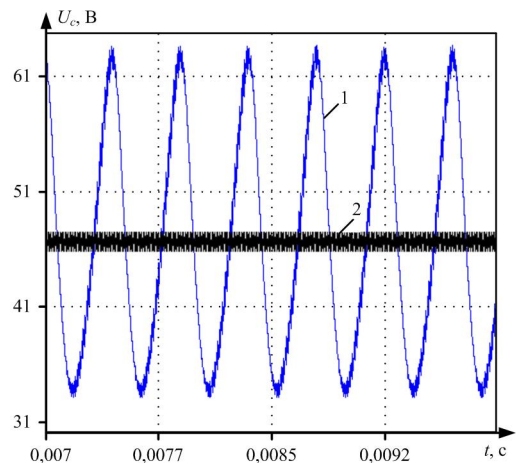


Рис. 5. Временные диаграммы выходного напряжения преобразователя: 1 – в точке  $P_1$ ; 2 – в точке  $P_2$

Также стоит заметить, что точка  $P_1$ , в которой наблюдаются нежелательные колебания, попадает в область устойчивости линеаризованной системы (см. рис. 3), причем находится на значительном удалении от границы  $L_1$ . Приведенный пример отчетливо показывает недостатки линеаризованных моделей при выборе параметров регулятора, которые не учитывают динамическую нелинейность САУ с импульсными преобразователями и возможность возникновения нежелательных режимов работы даже при корректных с точки зрения теории линейных систем параметрах регулятора.

## ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ РЕГУЛЯТОРА С УЧЕТОМ ДИНАМИЧЕСКОЙ НЕЛИНЕЙНОСТИ САУ

Результаты, полученные в предыдущих разделах, позволяют сформулировать методику проектирования САУ с импульсными преобразователями напряжения с учетом динамических нелинейностей.

Процесс проектирования состоит из следующих этапов:

1. Производится расчет параметров реактивных компонентов преобразователя по стандартной методике.
2. На основе малосигнальной передаточной функции, полученной при линеаризации системы в рабочей точке, строятся границы устойчивости  $L_i$  системы в пространстве параметров регулятора для четырех наборов параметров, включающих в себя параметры, изменяющиеся при работе преобразователя в широком диапазоне, а именно  $R_n$ ,  $U_{вх}$ . Причем при формировании указанных наборов используются граничные значения указанных параметров.

3. Строятся карты динамических режимов для использованных в п. 2 наборов параметров и определяются границы областей существования нежелательных динамических режимов с кратностью цикла  $m$  отличным от единицы ( $L_{ni}$ ).

4. Строится диаграмма с нанесенными на нее границами устойчивости линеаризованной модели САУ ( $L_i$ ) и бифуркационными границами нелинейной динамической модели ( $L_{ni}$ ) и ищется область, соответствующая пересечению областей устойчивости линеаризованной модели и областей существования желаемого динамического режима нелинейной динамической модели.

На рис. 6 представлена диаграмма, на которой представлена граница  $L_1$ , соответствующая минимальным значениям входного напряжения и сопротивления нагрузки, и бифуркационные границы  $L_{ni}$ , соответствующие четырем наборам параметров.

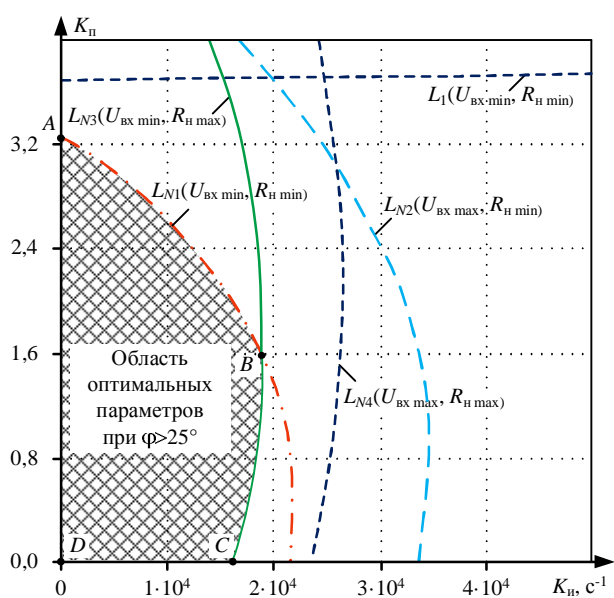


Рис. 6. Границы областей существования желаемых динамических режимов

Заштрихованная область параметров, ограниченная справа линиями  $ABC$  (рис. 6), является областью желаемых параметров регулятора, при выборе которых система будет работать в желаемом динамическом режиме (1-цикле) при изменении входного напряжения и сопротивления нагрузки в заданных диапазонах. Причем участок  $AB$  определяется бифуркационной границей  $L_{N1}$ , а участок  $BC$  – бифуркационной границей  $L_{N3}$ .

Приведенный пример не исчерпывает всех возможных конфигураций границ устойчивости линеаризованной модели и бифуркационных границ нелинейной динамической модели САУ, но в то же время предлагаемая методика выбора желаемых параметров регулятора является универсальной и может быть применена при проектировании импульсных преобразователей напряжения широкого класса.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенных исследований можно сделать выводы:

1. Линейные динамические модели импульсных преобразователей, являющиеся малосигнальными, не позволяют учитывать динамические нелинейности систем рассматриваемого класса, что может привести к неудовлетворительным результатам проектирования.
2. Использование нелинейных динамических моделей на этапе проектирования позволяет предотвратить возникновение нелинейных колебаний за счет уточнения области желаемых параметров регулятора.
3. Предложена методика выбора оптимальных па-

раметров регулятора в условиях изменения в широком диапазоне входного напряжения и сопротивления нагрузки с учетом динамических нелинейностей системы.

4. Предлагаемая методика может быть применена к широкому классу импульсных преобразователей напряжения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Севернс Р., Блум Г. Импульсные преобразователи постоянного напряжения для систем вторичного электропитания. М.: Энергоатомиздат, 1988. 294 с.
2. Белов Г.А. Теория импульсных преобразователей. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2016. 330 с.
3. Мелешин В.И. Транзисторная преобразовательная техника. М.: Техносфера, 2005. 632 с.
4. Нелинейная динамика полупроводниковых преобразователей / Кобзев А.В., Михальченко Г.Я., Андриянов А.И., Михальченко С.Г. Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиозлектроники, 2007. 224 с.
5. Zhusubaliyev Zh.T., Mosekilde E. Bifurcations and chaos in piece-wise-smooth dynamical systems. Singapore: World Scientific Pub Co Inc, 2003. 376 p. doi: 10.1142/5313.
6. High-feedback operation of power electronic converters / Z.T. Zhusubaliyev, E. Mosekilde, A.I. Andriyanov, G.Y. Mikhail'chenko // Electronics. 2013. No. 2. Pp. 113-167. doi: 10.3390/electronics2020113.
7. Instabilities in digitally controlled voltage-mode synchronous buck converter / D. Yu, H.H.C. Lu, H. Chen, E. Rodriguez, E. Alarcón, A. El Aroudi // International Journal of Bifurcation and Chaos. 2012. Vol. 22. No. 1. Pp. 1-12. doi: 10.1142/S0218127412500125.
8. Михальченко Г.Я., Михальченко С.Г., Обрусник В.П. Проблемы анализа динамических режимов функционирования устройств силовой электроники модульного типа // Ползуновский вестник. 2012. Т. 3. № 2. С. 107-116.
9. Охоткин Г.П. О бифуркациях периодических движений САУ тока с ШИМ-1 и ПИ-РТ // Труды академии электротехнических наук ЧР. 2002. № 1. С. 72-80.
10. Андриянов А.И. Исследование нелинейной динамики импульсных преобразователей напряжения. Брянск: БГТУ, 2016. 187 с.
11. Андриянов А.И., Булохов Н.М. Алгоритмы для бифуркационного анализа обобщенной модели преобразователей постоянного напряжения // Справочник. Инженерный журнал. 2013. № 10. С. 30-39.
12. Andriyanov A.I., Sachenko E.A. Study of nonlinear dynamics in a three-phase transistor controlled rectifier with a PI voltage controller in regeneration mode // Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics). IEEE, 2016. Pp. 1-8. doi: 10.1109/Dynamics.2016.7818966.
13. An approach for buck converter pi controller design using stability boundary locus / M.M. Garg, Y.V. Hote, M.K. Pathak, L. Behera // IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (TD). IEEE, 2018. Pp. 1-5. doi: 10.1109/TDC.2018.8440291.

Поступила в редакцию 3 апреля 2021 г.

#### INFORMATION IN ENGLISH

#### DESIGN OF PULSE-WIDTH DC/DC CONVERTERS TAKING INTO ACCOUNT DYNAMIC NONLINEARITY

Aleksey I. Andriyanov

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, the Department of Electronics, Radio electronics and Electrotechnical Systems, Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia. E-mail: mail@ahaos.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4083-040X>.

The paper considers the issues of choosing the optimal parameters of the regulator of automatic control systems with pulse-width converters taking into account their dynamic nonlinearity. Switching converters with voltage feedback are nonlinear dynamic systems in which nonlinear oscillations can occur if the controller parameters are incorrectly selected, which degrades the quality of the output voltage. The design of such systems, as a rule, is carried out using small-signal dynamic models that allow using the methods of the theory of automatic control of linear systems, but do not allow taking into account the possibility of nonlinear oscillations. When choosing the optimal parameters of the controller along with linear dynamic models, it is proposed to use nonlinear dynamic models of pulse-width converters, which make it possible to take into account the specific features of the nonlinear dynamics of systems of the class under consideration. In this work, using a specific example, the problem of a linear approach to the design of impulse power conversion systems is shown. An additional analysis of the system is carried out using the generalized mathematical model of pulse-width converters proposed by the author in one of the early works and the areas of the desired operating mode of the converter in the space of the controller parameters are identified. The importance of refining the region of optimal parameters of the controller using nonlinear dynamic models is shown. The method for choosing the optimal parameters of the regulator is proposed, which excludes the occurrence of undesirable dynamic modes of operation of the converter in a wide range of changes in the load resistance and input voltage of the converter. The presented results were obtained for the first time and can be extended to a wide class of pulse converters of electrical energy.

**Keywords:** pulse-width converter, boost converter, pulse-width modulation, small-signal model, nonlinear dynamics, nonlinear oscillations, bifurcation, proportional-integral controller, dynamic mode, stability margin.

#### REFERENCES

- Severns R., Bloom G. *Impulsnye preobrazovateli postoyannogo napryazheniya dlya system vtorichnogo elektropitaniya* [Switching DC voltage converters for secondary power supply systems]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1988. 294 p. (In Russian)
- Belov G.A. *Teoriya impulsnykh preobrazovateley* [Pulse converter theory]. Cheboksary, Chuvash State University Publ., 2016. 330 p. (In Russian)
- Meleshin V.I. *Tranzistornaya preobrazovatel'naya tekhnika* [Transistor converter technology]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2005. 632 p. (In Russian)
- Kobzev A.V., Mikhachenko G.Ya., Andriyanov A.I., Mikhachenko S.G. *Nelineynaya dinamika poluprovodnikovyykh preobrazovateley* [Nonlinear dynamics of semiconductor converters]. Tomsk, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics Publ., 2007. 224 p. (In Russian)
- Zhusubaliyev Zh.T., Mosekilde E. Bifurcations and chaos in piecewise-smooth dynamical systems. Singapore, World Scientific Pub Co Inc., 2003. 376 p. doi: 10.1142/5313.
- Zhusubaliyev Z.T., Mosekilde E., Andriyanov A.I., Mikhachenko G.Y. High-feedback operation of power electronic converters. *Electronics*. 2013. No. 2. Pp. 113-167. doi: 10.3390/electronics2020113.
- Yu D., Ju H.H.C., Chen H., Rodriguez E., Alarcón E., El Aroudi A. Instabilities in digitally controlled voltage-mode synchronous buck converter. *International Journal of Bifurcation and Chaos*. 2012. Vol. 22. no. 1. Pp. 1-12. doi: 10.1142/S0218127412500125.
- Mikhachenko G.Ya., Mikhachenko S.G., Obrusnik V.P. Problems of analysis of dynamic modes of operation of modular power electronics devices. *Polzunovskiy vestnik* [Polzunov Bulletin], 2012, vol. 3, no. 2, pp. 107-116. (In Russian)
- Okhotkin G.P. On bifurcations of periodic movements of the ACS current with PWM-1 and PI-CT. *Trudy akademii elektrotekhnicheskikh nauk chuvashskoy respubliki* [Proceedings of Academy of electrical engineering Sciences of the Chuvash Republic], 2002, no. 1, pp. 72-80. (In Russian)
- Andriyanov A.I. *Issledovanie nelineynoy dinamiki impulsnykh preobrazovateley napryazheniya* [Investigation of nonlinear dynamics of pulse voltage converters]. Bryansk, Bryansk State Technical University Publ., 2016. 187 p. (In Russian)
- Andriyanov A.I., Bulokhov N.M. The algorithms for bifurcation analyze the generalized model of dc/dc converters. *Spravochnik. Inzhenernyi zhurnal* [Handbook. An Engineering Journal], 2013, no. 10, pp. 30-39. (In Russian)
- Andriyanov A.I., Sachenko E.A. Study of nonlinear dynamics in a three-phase transistor controlled rectifier with a PI voltage controller in regeneration mode. 2016 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics). IEEE, 2016, pp. 7818966. doi: 10.1109/Dynamics.2016.7818966.
- Garg M.M., Hote Y.V., Pathak M.K., Behera L. An Approach for buck Converter PI controller design using stability boundary locus. 2018 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition.IEEE, 2018, pp. 1-5. doi: 10.1109/TDC.2018.8440291.

Андриянов А.И. Проектирование импульсных преобразователей постоянного напряжения с учетом динамических нелинейностей // Электротехнические системы и комплексы. 2021. № 2(51). С. 39-44. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-2\(51\)-39-44](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-2(51)-39-44)

Andriyanov A.I. Design of Pulse-width DC/DC Converters Taking into Account Dynamic Nonlinearity. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2021, no. 2(51), pp. 39-44. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-2\(51\)-39-44](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-2(51)-39-44)

## ИНФОРМАЦИОННОЕ, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 621.314

[https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-2\(51\)-45-51](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-2(51)-45-51)

Дунаев М.П., Довудов С.У.

Иркутский национальный исследовательский технический университет

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ В ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕ ЧАСТОТЫ

Представленный метод компьютерного моделирования статических и динамических потерь мощности в полупроводниковых диодах и транзисторах позволит с достаточной точностью определить составляющие потерь мощности преобразователя частоты. Цель исследования заключается в разработке компьютерной модели блока расчета потерь мощности силовых ключей преобразователя частоты, которая позволила бы адекватно определить статические и динамические потери мощности в транзисторах и диодах полупроводникового преобразователя *SIEMENS SINAMICS G110* мощностью 1,5 кВт. Для анализа полупроводниковых схем выпрямителя и автономного инвертора напряжения с широтно-импульсной модуляцией в статье применены методы имитационного моделирования в среде *Matlab/Simulink*. Приведены аналитические выражения, описывающие статические и динамические потери мощности в силовых полупроводниковых диодах и транзисторах. Методом полиномиальной аппроксимации силовых характеристик IGBT-транзисторов получены математические выражения, описывающие зависимости  $V_{ce}(I_c)$ ,  $V_f(I_f)$ ,  $E_{on}(I_c)$ ,  $E_{off}(I_c)$ ,  $E_{rec}(I_c)$ . На базе полученных выражений в среде *Matlab/Simulink* разработан блок расчета статических и динамических потерь мощности. Разработана компьютерная модель преобразователя частоты *SIEMENS SINAMICS G110* в среде *Matlab/Simulink* с использованием блоков из библиотеки *SimPowerSystem*. С помощью разработанного блока расчета потерь мощности получены зависимости потерь мощности от частоты коммутации и тока нагрузки. Верификация результатов проведена путем сопоставления данных моделирования с данными производителя преобразователя. Представленный метод моделирования статических и динамических потерь мощности применен в инженерных и научных исследованиях при оценке потерь мощности и коэффициента полезного действия преобразователей частоты и других типов полупроводниковых преобразователей. Преимущество данного метода заключается в том, что он позволил учесть характеристики конкретных диодов и транзисторов.

**Ключевые слова:** преобразователь частоты, неуправляемый выпрямитель, автономный инвертор напряжения, широтно-импульсная модуляция, статические потери, динамические потери, аппроксимация, характеристика, коэффициент полезного действия.

## ВВЕДЕНИЕ

Преобразование напряжения сети переменного тока с постоянной амплитудой и частотой в переменное напряжение с регулируемыми параметрами амплитуды и частоты может осуществляться с помощью преобразователя частоты, выполненного по схеме со звеном постоянного тока. Такой преобразователь частоты включает в себя входной неуправляемый выпрямитель, на выходе которого имеется сглаживающий фильтр, и автономный инвертор напряжения (АИН) с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) [1-7] на транзисторных модулях IGBT [8-12]. Одним из распространенных преобразователей этого типа является преобразователь частоты *SIEMENS SINAMICS G110*, силовая схема которого представлена на **рис. 1**.

Преобразователь частоты (см. **рис. 1**) питается от сети переменного тока с напряжением  $U_c$  220 В и частотой  $f_c = 50$  Гц. Преобразователь частоты содержит входной неуправляемый мостовой выпрямитель (НВ) на диодах VD7–VD10, сглаживающий фильтр (Ф) на конденсаторе  $C$  и трехфазный мостовой АИН на шести IGBT-транзисторах (VT1–VT6), к которым встречно-параллельно подключены диоды обратного тока (VD1–VD6). Нагрузка инвертора ( $R_n$ ,  $L_n$ ) включена в диагональ переменного тока АИН.

Значительная часть потерь, возникающих в ПЧ, возникают в выпрямителе, состоящем из диодов, и в модулях АИН, состоящих из IGBT-транзисторов и подключенных к ним обратных диодов. Потери, которые происходят в конденсаторе фильтра, системе охлаждения и системе управления, в данной статье не рассматриваются.

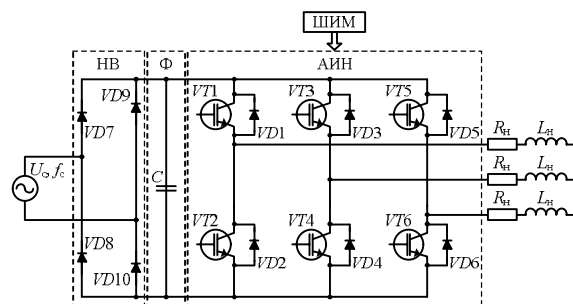


Рис. 1. Силовая схема преобразователя частоты

В ПЧ большой мощности потери, возникающие в неуправляемом выпрямителе и автономном инверторе напряжения, могут быть критическими [13, 14]. В этой статье рассматриваются потери в схемах выпрямителя и инвертора. В настоящее время для этих видов потерь существуют различные способы их точного расчета, но с довольно сложной формулой и сложными параметрами. Следовательно, эти методы расчета нелегко реализовать на практике. В статье методом моделирования определены потери в цепи выпрямителя и в цепи АИН. Достоверность предлагаемого метода моделирования потерь мощности оценивается путем сравнения результатов моделирования преобразователя частоты в среде *Matlab* и данных по потерям, приведенных в документации ПЧ *SIEMENS SINAMICS G110* мощностью 1,5 кВт.

Технические данные преобразователя частоты *SIEMENS SINAMICS G110* мощностью 1,5 кВт приведены в **табл. 1**.

В преобразователе частоты *SIEMENS SINAMICS G110* мощностью 1,5 кВт в качестве НВ используется модуль *GBPC2508W*, данные которого приведены в **табл. 2**, а в качестве АИН – модуль IGBT-транзисторов с обратными диодами типа *FS15R06XE3*, данные которого приведены в **табл. 3**.

Таблица 1

Основные данные ПЧ G110

Показатель	Технические характеристики
Напряжение сети, В	230
Частота сети, Гц	50
Выходная мощность, кВт	1,5
Мощность потерь, Вт	118
КПД (при частоте ШИМ 8 кГц)	0,927
Частота ШИМ, кГц	Заводская настройка – 8, диапазон регулирования 2 – 16 (с шагом 2кГц)

Таблица 2

Основные данные модуля FS15R06XE3 IGBT-транзисторов и обратных диодов

Параметр	Обозначение	Значение
Максимальное импульсное повторяющееся напряжение, В	$U_{RRM}$	800
Длительный постоянный ток, А	$I_o$	25
Максимальный пиковый неповторяющийся прямой ток за один цикл, А	$I_{FSM}$	400
Максимальное падение напряжения в прямом направлении, В	$U_{FM}$	1,1

Таблица 3

Основные данные модуля FS15R06XE3 IGBT-транзисторов и обратных диодов

Параметр	Условия	Обозначение	Значение
Максимальное напряжение коллектор-эмиттер, В	При температуре IGBT модуля $T_{vj}=25^{\circ}\text{C}$	$U_{CES}$	600
Ток коллектора, А	При температуре окружающей среды $T_c=80^{\circ}\text{C}$ , IGBT модуля $T_{vj}=175^{\circ}\text{C}$	$I_{cnom}$	15
Повторяющийся пиковый ток коллектора, А	При длительности импульса $tr = 1\text{ms}$	$I_{CRM}$	30
Напряжение насыщения коллектор-эмиттер, В	$I_C=15\text{ A}$ , $U_{GE}=15\text{ B}$ , $T_{vj}=25^{\circ}\text{C}$	$U_{CESat}$	1,55
	$I_C=15\text{ A}$ , $U_{GE}=15\text{ B}$ , $T_{vj}=125^{\circ}\text{C}$		1,7
	$I_C=15\text{ A}$ , $U_{GE}=15\text{ B}$ , $T_{vj}=150^{\circ}\text{C}$		1,8
Потери энергии при включении, мДж	$I_C=15\text{ A}$ , $U_{CE}=300\text{ B}$ , $T_{vj}=25^{\circ}\text{C}$	$E_{on}$	0,25
	$T_{vj}=125^{\circ}\text{C}$		0,32
	$T_{vj}=150^{\circ}\text{C}$		0,36
Потери энергии при выключении, мДж	$I_C=15\text{ A}$ , $U_{CE}=300\text{ B}$ , $T_{vj}=25^{\circ}\text{C}$	$E_{off}$	0,34
	$T_{vj}=125^{\circ}\text{C}$		0,44
	$T_{vj}=150^{\circ}\text{C}$		0,46
Повторяющееся пиковое обратное напряжение в диоде, В	$T_{vj}=25^{\circ}\text{C}$	$U_{RRM}$	600
Постоянный прямой ток обратного диода, А		$I_F$	15
Прямое напряжение, В	$I_F=15\text{ A}$ , $U_{GE}=0\text{ B}$ , $T_{vj}=25^{\circ}\text{C}$	$U_F$	1,60
	$I_F=15\text{ A}$ , $U_{GE}=0\text{ B}$ , $T_{vj}=125^{\circ}\text{C}$		1,55
	$I_F=15\text{ A}$ , $U_{GE}=0\text{ B}$ , $T_{vj}=150^{\circ}\text{C}$		1,50
Энергия обратного восстановления диода, мДж	$I_F=15\text{ A}$ , $U_R=300\text{ B}$ , $T_{vj}=25^{\circ}\text{C}$	$E_{rec}$	0,16
	$T_{vj}=125^{\circ}\text{C}$		0,28
	$T_{vj}=150^{\circ}\text{C}$		0,37

РАСЧЕТ СТАТИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ

Потери мощности при коммутации IGBT-транзистора для заданных форм сигналов тока и напряжения разделены на три части, как показано на рис. 2 [15, 16].

Суммарные потери энергии включают в себя статические и коммутационные потери в IGBT-транзисторе и в обратном диоде. Статические потери IGBT-транзисторов и диодов происходят при включенном состоянии. Потери  $P_{cond}$  можно рассчитать как произведение тока коллектора и напряжения коллектора-эмиттера по формуле

$$P_{cond.inv} = \int_{t_2}^{t_3} (U_{ce} (I_c) I_c) \cdot dt, \quad (1)$$

где  $I_c$  – ток коллектора;  $U_{ce}$  – напряжение коллектор-эмиттер.

Статические потери в диодном неуправляемом выпрямителе и в обратном диоде модуля IGBT-транзистора можно рассчитать, используя формулу (1). При включении и выключении диоды также имеют потери [13], которые называют коммутационными. Для диодного неуправляемого выпрямителя вследствие низкой частоты сети коммутационные потери малы и ими можно пренебречь. Потери проводимости в однофазном диодном мостовом неуправляемом выпрямителе в 4 раза превышают потери в одном диоде.

РАСЧЕТ ДИНАМИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ

Динамические потери в IGBT-транзисторах происходят при переходе из одного установившегося режима в другой (см. рис. 2), т.е. при переходе от выключенного состояния во включенное и наоборот [17-20]. Потери энергии при переключении устройства могут изменяться в зависимости от тока, напряжения, сопротивления затвора и температуры перехода [21].

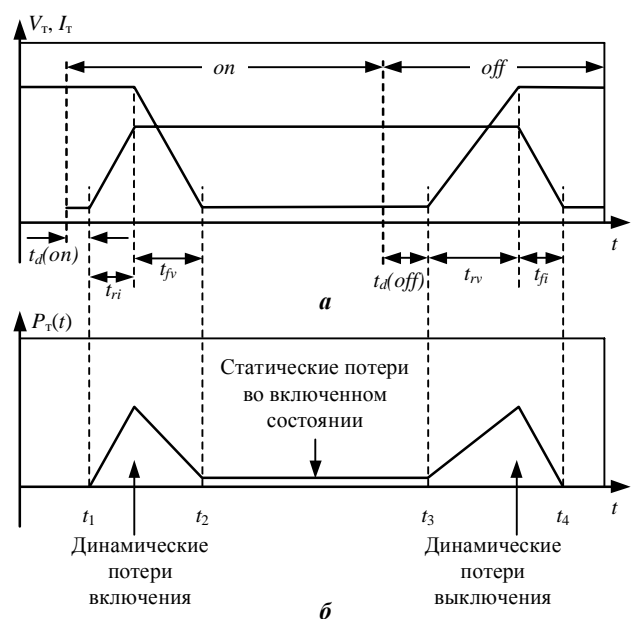


Рис. 2. Процесс коммутации IGBT-транзистора:  $t_1 - t_2$  – интервал включения,  $t_2 - t_3$  – интервал включенного состояния,  $t_3 - t_4$  – интервал выключения

Величина средней мощности коммутационных потерь определяется по формулам

$$P_{sw.inv} = [E_{on}(I_c) + E_{off}(I_c)] f, \quad (2)$$

или

$$P_{sw.inv} = \int_{t_1}^{t_2} (I_c U_{CE}) dt + \int_{t_3}^{t_4} (I_c U_{CE}) dt, \quad (3)$$

где  $E_{on}(I_c)$  – энергия при включения, которая зависит от величины тока коллектора;  $E_{off}(I_c)$  – энергия при выключения, которая тоже зависит от значения тока коллектора;  $f$  – частота коммутации.

Суммарные потери в ПЧ можно определить по выражению

$$P_{ПЧ} = P_{con.rec} + P_{con.inv} + P_{SW.inv}, \quad (4)$$

где  $P_{ПЧ}$  – потери мощности в ПЧ;  $P_{con.rec}$  – статические потери мощности в неуправляемом выпрямителе;  $P_{con.inv}$  – статические потери мощности в обратном диоде;  $P_{SW.inv}$  – коммутационные потери мощности в IGBT-транзисторе.

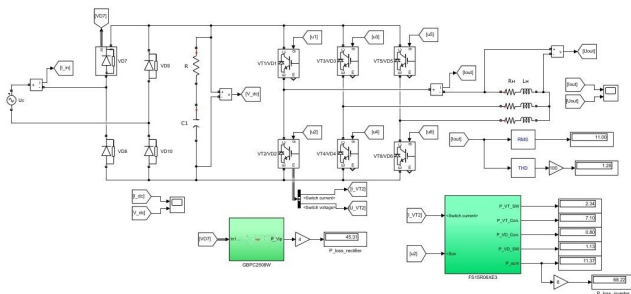
В ПЧ значительный вклад в общие потери вносят коммутационные потери, возникающие в АИН. Чтобы верно оценить коэффициент полезного действия (КПД) преобразователя частоты и надежность его конструкции, необходимо точно рассчитать коммутационные потери.

#### МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ПОТЕРЬ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ *SINAMICS G110*

В среде *MatlabR2019a* с использованием блоков из библиотеки *Simulink/Simscape* [4, 12, 22 - 24] смоделирована схема преобразователя частоты *SIEMENS SINAMICS G110* мощностью 1,5 кВт, которая приведена на **рис. 3**.

Модель содержит следующие блоки:

- Блок мостового неуправляемого выпрямителя на диодах *VD7–VD10*, включающий сглаживающий фильтр на конденсаторе *C1*.
- Блок автономного трехфазного мостового инвертора напряжения на шести IGBT/Diode-модулях *VT1(VD1)–VT6(VD6)*.
- Блок расчета потерь в выпрямителе и в инверторе.
- Блок нагрузки.
- Комплект измерительных приборов.



**Рис. 3. Модель преобразователя частоты  
*SIEMENS SINAMICS G110***

Методом аппроксимации определены математические функции, наиболее точно описывающие энергетические графики зависимостей  $V_{ce}(I_c)$ ,  $V_f(I_f)$ ,  $E_{on}(I_c)$ ,  $E_{off}(I_c)$ ,  $E_{rec}(I_c)$ , которые приведены на **рис. 4 и 5**.

Используя данный метод расчета, можно определить статические потери в неуправляемом выпрямителе, статические и динамические потери в IGBT-транзисторах и обратных диодах АИН, а также в целом можно количественно оценить КПД преобразователя частоты.

После аппроксимации графиков потерь мощности диодного неуправляемого выпрямителя типа *GBPC2508W* и IGBT-транзисторного модуля типа *FS15R06XE3* получены следующие уравнения:

– Уравнение для диодного неуправляемого выпрямителя типа *GBPC2508W*:

$$U_F(I_F) = 0,0277 \left( \frac{I_F}{100} \right)^5 - 0,2812 \left( \frac{I_F}{100} \right)^4 + 0,9917 \left( \frac{I_F}{100} \right)^3 - 1,4921 \left( \frac{I_F}{100} \right)^2 + 1,6057 \left( \frac{I_F}{100} \right) + 0,6551. \quad (5)$$

– Уравнения для IGBT-транзисторного модуля типа *FS15R06XE3*:

$$U_{CE}(I_C) = -102775 \left( \frac{I_C}{100} \right)^6 + 98467 \left( \frac{I_C}{100} \right)^5 - 36327 \left( \frac{I_C}{100} \right)^4 + 6505,8 \cdot \left( \frac{I_C}{100} \right)^3 - 590,76 \cdot \left( \frac{I_C}{100} \right)^2 + 32,772 \cdot \left( \frac{I_C}{100} \right) + 0,3152; \quad (6)$$

$$U_F(I_F) = -72672 \left( \frac{I_F}{100} \right)^6 + 71308 \left( \frac{I_F}{100} \right)^5 - 27122 \left( \frac{I_F}{100} \right)^4 + 5045,3 \left( \frac{I_F}{100} \right)^3 - 481,84 \cdot \left( \frac{I_F}{100} \right)^2 + 27,018 \cdot \left( \frac{I_F}{100} \right) + 0,4514; \quad (7)$$

$$E_{on}(I_C) = 4,8894 \left( \frac{I_C}{100} \right)^4 + 7,928 \left( \frac{I_C}{100} \right)^3 + 0,0715 \cdot \left( \frac{I_C}{100} \right)^2 + 1,8573 \cdot \left( \frac{I_C}{100} \right) + 0,0486; \quad (8)$$

$$E_{off}(I_C) = -15,198 \left( \frac{I_C}{100} \right)^4 + 16,984 \left( \frac{I_C}{100} \right)^3 - 8,0363 \left( \frac{I_C}{100} \right)^2 + 3,6428 \cdot \left( \frac{I_C}{100} \right) + 0,0456; \quad (9)$$

$$E_{rec}(I_F) = 5,4932 \left( \frac{I_F}{100} \right)^3 - 5,7025 \left( \frac{I_F}{100} \right)^2 + 2,6764 \left( \frac{I_F}{100} \right) + 0,0792. \quad (10)$$

Полученные математические зависимости достаточно точно описывают энергетические графики потерь мощности диодного неуправляемого выпрямителя и IGBT/Diode модулей АИН.

Для расчета статических и динамических потерь мощности IGBT-транзистора используются напряжение и ток транзистора.

На рис. 6 показан блок расчета статических и динамических потерь мощности обратного диода IGBT/Diode модуля типа FS15R06XE3.

На рис. 7 показан блок расчета статических и динамических потерь IGBT/Diode модуля типа FS15R06XE3.

Результаты моделирования статических и динамических потерь показаны на рис. 8 и 9.

Как видно из рис. 9, энергии включения и выключения зависят от величины тока транзистора. Для моделирования динамических потерь необходимо использовать метод моделирования с постоянным шагом расчета [17].

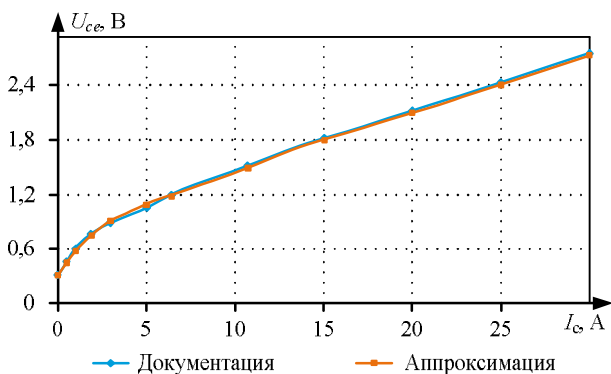


Рис. 4. Напряжение насыщения коллектор-эмиттера силового транзистора типа FS15R06XE3

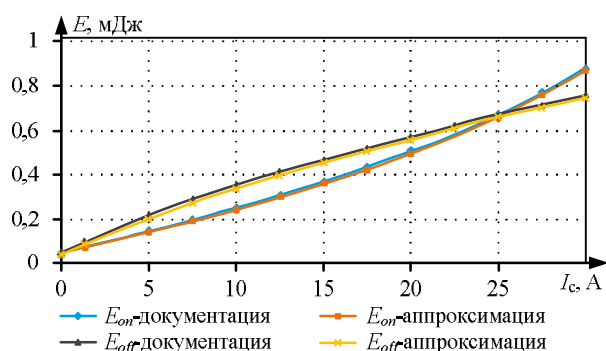


Рис. 5. Энергетические характеристики переключения силового транзистора типа FS15R06XE3

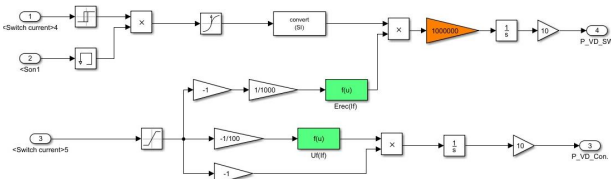


Рис. 6. Блок расчета потерь мощности обратного диода IGBT/Diode модуля типа FS15R06XE3

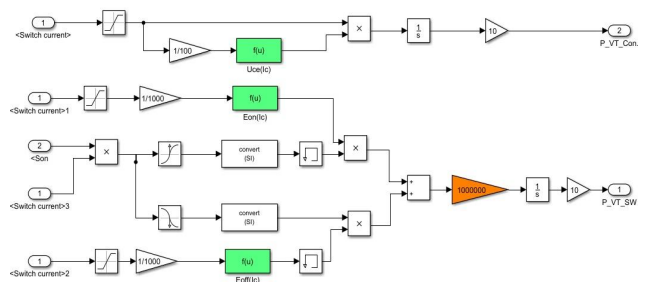


Рис. 7. Блок расчета потерь мощности IGBT/Diode модуля типа FS15R06XE3

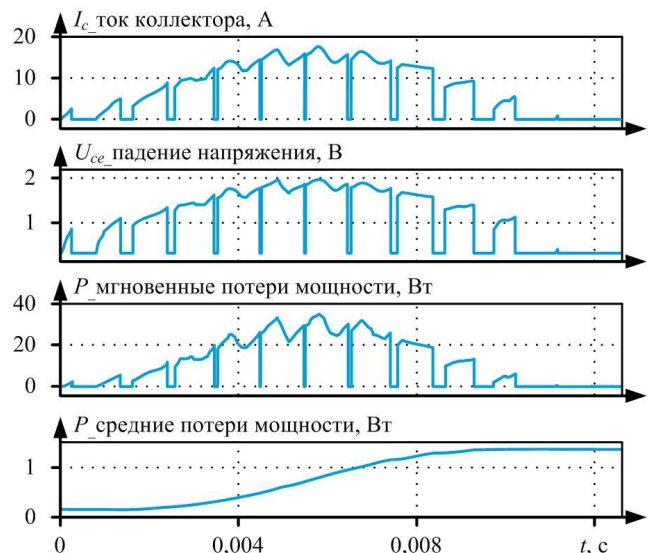


Рис. 8. Результаты моделирования статических потерь IGBT/Diode модуля типа FS15R06XE3

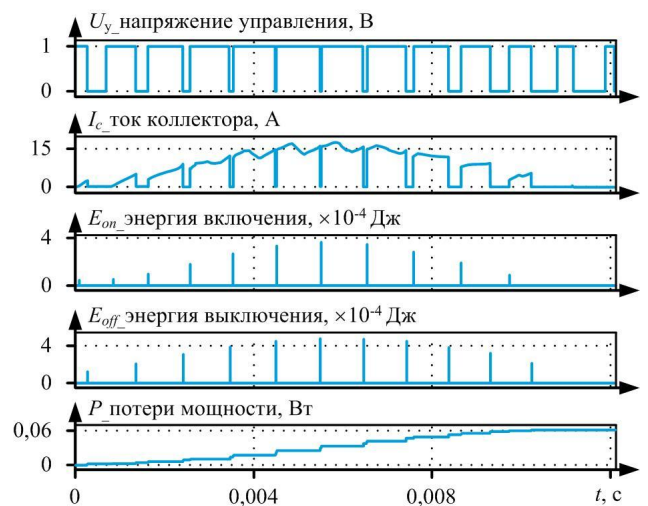


Рис. 9. Результаты моделирования динамических потерь IGBT/Diode модуля типа FS15R06XE3

#### ВЕРИФИКАЦИЯ МОДЕЛИ

В табл. 4 приведено сравнение между потерями, полученными при моделировании в Matlab/Simulink, и потерями, приведенными в документации на ПЧ SIEMENS SINAMICS G110 мощностью 1,5 кВт. Погрешность моделирования потерь составляет 3,78 %, что является показателем достаточной адекватности работы модели преобразователя частоты в Matlab/Simulink.

Таблица 4  
Результаты расчета потерь мощности ПЧ  
в *SIEMENS SINAMICS G110*

Параметры	Документация ПЧ	<i>Matlab</i>	Погреш- ность
Суммарные потери в ПЧ	118 Вт	113,53 Вт	3,78 %

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлен метод имитационного моделирования, позволяющий оценить потери мощности в силовых полупроводниковых преобразователях. Разработаны блоки модели, которые рассчитывают потери проводимости в неуправляемом выпрямителе и потери, возникающие в АИН преобразователя частоты. Для расчета потерь мощности методом аппроксимации определены математические уравнения, описывающие энергетические графики зависимостей  $V_{ce}(I_c)$ ,  $V_f(I_f)$ ,  $E_{on}(I_c)$ ,  $E_{off}(I_c)$ ,  $E_{rec}(I_c)$ . Полученные математические уравнения достаточно точно описывают графики потерь мощности. Достоверность предлагаемого метода моделирования расчета потерь мощности оценивалась путем сравнения результатов, приведенных в документации преобразователя частоты *SIEMENS SINAMICS G110*, и моделирования в среде *Matlab*. Данный метод дал погрешность 3,78% относительно данных, заявленных производителем. Представленный метод моделирования статических и динамических потерь мощности применен в инженерных и научных исследованиях при оценке потерь мощности и КПД преобразователей частоты и других типов полупроводниковых преобразователей. Преимущество данного метода заключается в том, что он позволяет учесть характеристики конкретных силовых диодов и транзисторов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Довудов С.У., Дунаев М.П. Анализ энергетических показателей импульсных преобразователей // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2020. Т. 24. № 2. С. 345-355.
2. Yao Y., Lu D.C., Verstraete D. Power loss modelling of MOSFET inverter for low-power permanent magnet synchronous motor drive // 1st International Future Energy Electronics Conference (IFEEEC). 2013. Pp. 849-854. doi: 10.1109/IFEEEC.2013.6687620.
3. Nguyen H.V., Lee D. Comparison of power losses in single-phase to three-phase AC/DC/AC PWM converters // 9th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE-ECCE Asia). 2015. Pp. 940-945. doi: 10.1109/ICPE.2015.7167894.
4. Perutka K. MATLAB for Engineers - Applications in Control, Electrical Engineering, IT and Robotics, Edited. 2011. 512 p.
5. Control of a single-phase cascaded H-bridge multilevel inverter for grid-connected photovoltaic systems / E. Villanueva, P. Correa, J. Rodriguez, M. Pacas // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2009. Vol. 56. Iss. 11. Pp. 4399-4406. doi: 10.1109/TIE.2009.2029579.
6. Wang C.M. A novel single-stage full-bridge buck-boost inverter // Eighteenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). 2003. Pp. 51-57. doi: 10.1109/APEC.2003.1179175.
7. Modular Cascaded H-Bridge Multilevel PV Inverter With Distributed MPPT for Grid-Connected Applications / B. Xiao, L. Hang, J. Mei, C. Riley, L.M. Tolbert,

- B. Ozpineci // IEEE Transactions on Industry Applications. 2015. Vol. 51. Iss. 2. Pp. 1722-1731. doi: 10.1109/TIA.2014.2354396.
8. Hafezi H., Faranda R. A New Approach for Power Losses Evaluation of IGBT/Diode Module // Electronics. 2021. Vol. 10. No. 280. doi: 10.3390/electronics10030280.
9. <https://mathworks.com/help/physmod/sps/ug/loss-calculation-in-a-three-phase-3-level-inverter.html> (accessed on 23 January 2021).
10. Дунаев М.П. Силовые электронные преобразователи электростанций: учеб. пособие. Иркутск: Изд-во ИрНТУ, 2016. 116 с.
11. Пронин М.В., Воронцов А.Г. Силовые полностью управляемые полупроводниковые преобразователи. СПб.: Электросила, 2003. 172 с.
12. Faiz J., Shahgholian G. Modeling and simulation of a three-phase inverter with rectifier-type nonlinear loads // Armenian Journal of Physics. 2009. Vol. 2. Iss. 4. Pp. 307-316.
13. Loss calculation of a frequency converter with a fixed-step circuit simulator / L. Aarniovuori, L. Laurila, M. Niemela, J. Pyrhonen // European Conference on Power Electronics and Applications. 2007. Pp. 1-9. doi: 10.1109/EPE.2007.4417355.
14. <https://www.semikron.com/service-support/downloads/detail/semikron-application-note-determining-switching-losses-of-semikron-igbt-modules-en-2014-08-19-rev-00.html> (accessed on 23 January 2021).
15. Blinov A., Vinnikov D., Jalakas T. Loss Calculation Methods of Half-Bridge Square-Wave Inverters // Elektronika Ir Elektrotehnika. 2011. Vol. 113. No. 7. Pp. 9-14. doi: 10.5755/j01.eee.113.7.604.
16. Ahmed M.M.R., Putrus G.A. A method for predicting IGBT junction temperature under transient condition // 34th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics. 2008. Pp. 454-459. Doi: 10.1109/IECON.2008.4757996.
17. Calculation of static and dynamic losses in power IGBT transistors by polynomial approximation of basic energy characteristics / O.A. Plakhtii, V.P. Nerubatskyi, D.A. Hordiienko, H.A. Khoruzhevskiy // Naukovy Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. 2020. No. 2. Pp. 82-88. doi: 10.33271/nvngu/2020-82.
18. Ivakhno V., Zamaruev V.V., Ilina O. Estimation of Semiconductor Switching Losses under Hard Switching using Matlab/Simulink Subsystem // Electrical, Control and Communication Engineering. 2013. No. 2. Pp. 20-26. doi: 10.2478/ecce-2013-0003.
19. Гуляев А. Визуальное моделирование в среде MatLab. Учебный курс. С.-Петербург; Москва; Харьков; Минск: Питер, 2000. 432 с.
20. Дунаев М.П., Довудов С.У. Моделирование схемы частотно-импульсного преобразователя // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2019. №3. С. 144-152.
21. Дунаев М.П., Довудов С.У. Моделирование схемы широтно-импульсного преобразователя // Повышение эффективности производства и использования электроэнергии в условиях Сибири: тр. Всерос. Науч.-практ. конф. Иркутск: Изд-во ИрНТУ, 2019. Т.1. С. 3-6.
22. Дьяконов В.П. MATLAB и Simulink для радиоинженера. М.: ДМК Пресс, 2011. 976 с.
23. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. М.: ДМК Пресс, 2008. 288 с.
24. Colak I., Kabalci E., Bayindir R. Review of multilevel voltage source inverter topologies and control schemes // Energy Conversion and Management. 2011. Vol. 52. Iss. 2. Pp. 1114-1128. doi: 10.1016/j.enconman.2010.09.006.

Поступила в редакцию 27 марта 2021 г.

# SIMULATION OF POWER LOSSES IN A FREQUENCY INVERTER

Mikhail P. Dunaev

D.Sc. (Engineering), Professor, Department of Electric Drive and Electric Transport, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia. E-mail: mdunaev10@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1523-5553>.

Sarfaro U. Dovudov

Postgraduate student, Department of Electric Drive and Electric Transport, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia. E-mail: dsu\_1991@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5600-4615>

The presented method of computer modeling of static and dynamic power losses in semiconductor diodes and transistors will make it possible to determine with sufficient accuracy of the components of the power losses of the frequency converter. The purpose of the study is to develop a computer model of the block for calculating the power losses of the power switches of the frequency converter, which would allow us to adequately determine the static and dynamic power losses in the transistors and diodes of the semiconductor converter SIEMENS SINAMICS G110 with a power of 1.5 kW. To carry out the analysis of semiconductor circuits of a rectifier and an autonomous voltage inverter with pulse-width modulation, the article uses simulation methods in the Matlab / Simulink environment. Analytical expressions describing static and dynamic power losses in power semiconductor diodes and transistors are given. Using the method of polynomial approximation of the power characteristics of IGBT transistors, mathematical expressions are obtained that describe the dependences  $V_{se}(I_c)$ ,  $V_f(I_f)$ ,  $E_{on}(I_c)$ ,  $E_{off}(I_c)$ ,  $E_{rec}(I_c)$ . On the basis of the obtained expressions in Matlab / Simulink, a block for calculating static and dynamic power losses has been developed. A computer model of the SIEMENS SINAMICS G110 frequency converter has been developed in the Matlab / Simulink environment using blocks from the SimPowerSystem library. Using the developed block for calculating power losses, the dependences of power losses on the switching frequency and load current are obtained. The results were verified by comparing the simulation data with the manufacturer data. The presented method for modeling static and dynamic power losses is applied in engineering and scientific research in assessing power losses and efficiency of frequency converters and other types of semiconductor converters. The advantage of this method is that it makes it possible to take into account the characteristics of specific diodes and transistors.

**Keywords:** frequency converter, uncontrolled rectifier, autonomous voltage inverter, pulse-width modulation, static losses, dynamic losses, approximation, characteristic, efficiency.

## REFERENCES

- Dovudov S.U., Dunayev M.P. Analysis of energy indicators of pulse converters. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Irkutsk State Technical University]. 2020, vol. 24, no 2, pp. 345-355. doi: 10.21285/1814-3520-2020-2-345-355 (In Russian)
- Yao Y., Lu D.C., Verstraete D. Power loss modelling of MOSFET inverter for low-power permanent magnet synchronous motor drive. 1<sup>st</sup> International Future Energy Electronics Conference (IFEEC). IEEE, 2013. Pp. 849-854. doi: 10.1109/IFEEC.2013.6687620.
- Nguyen H.V., Lee D. Comparison of power losses in single-phase to three-phase AC/DC/AC PWM converters. 9<sup>th</sup> International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE-ECCE Asia). IEEE, 2015. Pp. 940-945. doi: 10.1109/ICPE.2015.7167894.
- Perutka K. MATLAB for Engineers. Applications in Control, Electrical Engineering, IT and Robotics. InTechOpen, 2011. 512 p.
- Villanueva E., Correa P., Rodriguez J., Pacas M. Control of a single-phase cascaded H-bridge multilevel inverter for grid-connected photovoltaic systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2009. Vol. 56. Iss. 11. Pp. 4399-4406. doi: 10.1109/TIE.2009.2029579.
- Wang C.M. A novel single-stage full-bridge buck-boost inverter. Eighteenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). IEEE, 2003. Pp. 51-57. doi: 10.1109/APEC.2003.1179175.
- Xiao B., Hang L., Mei J., Riley C., Tolbert L.M., Ozpineci B. Modular Cascaded H-Bridge Multilevel PV Inverter with Distributed MPPT for Grid-Connected Applications. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2015. Vol. 51. Iss. 2. Pp. 1722-1731. doi: 10.1109/TIA.2014.2354396.
- Hafezi H., Faranda R. A New Approach for Power Losses Evaluation of IGBT/Diode Module. *Electronics*. 2021. Vol. 10. No. 280. doi: 10.3390/electronics10030280.
- Loss Calculation in a Three-Phase 3-Level Inverter. Available at: <https://mathworks.com/help/physmod/sps/ug/loss-calculation-in-a-three-phase-3-level-inverter.html> (accessed on 23 January 2021).
- Dunayev M.P. *Silovyye elektronnyye preobrazovateli v elektrostantsiy* [Power electronic converters in power plants]. Irkutsk, IRNITU Publ., 2016. 116 p. (In Russian)
- Pronin M.V., Vorontsov A.G. *Silovyye polnostyu upravlyayemye poluprovodnikovyye preobrazovateli* [Power turn-off semiconductor converters]. Saint Petersburg, Elektrosila Publ., 2003. 172 p. (In Russian)
- Faiz J., Shahgholian G. Modeling and simulation of a three-phase inverter with rectifier-type nonlinear loads. *Armenian Journal of Physics*. 2009. Vol. 2. Iss. 4. Pp. 307-316.
- Aarniovuori L., Laurila L., Niemela M., Pyrhonen J. Loss calculation of a frequency converter with a fixed-step circuit simulator. *European Conference on Power Electronics and Applications*. IEEE, 2007. Pp. 1-9. doi: 10.1109/EPE.2007.4417355.
- Semikron. Available at: <https://www.semikron.com/service-support/downloads/detail/semikron-application-note-determining-switching-losses-of-semikron-igbt-modules-en-2014-08-19-rev-00.html> (accessed on 23 January 2021).
- Blinov A., Vinnikov D., Jalakas T. Loss Calculation Methods of Half-Bridge Square-Wave Inverters. *Elektronika ir Elektrotehnika*. 2011. Vol. 113. No. 7. Pp. 9-14. doi: 10.5755/j01.eee.113.7.604.
- Ahmed M.M.R., Putrus G.A. A method for predicting IGBT junction temperature under transient condition // 34<sup>th</sup> Annual Conference of IEEE Industrial Electronics. IEEE, 2008. Pp. 454-459. doi: 10.1109/IECON.2008.4757996.
- Plakhtii O.A., Nerubatskyi V.P., Hordienko D.A., Khoruzhevskyi H.A. Calculation of static and dynamic losses in power IGBT transistors by polynomial approximation of basic energy characteristics. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2020. No. 2. Pp. 82-88. doi: 10.33271/nvngu/2020-82.

18. Ivakhno V., Zamaruev V.V., Ilina O. Estimation of Semiconductor Switching Losses under Hard Switching using Matlab/Simulink Subsystem. *Electrical, Control and Communication Engineering*. 2013. No. 2. Pp. 20-26. doi: 10.2478/ecce-2013-0003.
19. Gulyayev A. *Vizualnoye modelirovaniye v srede MatLab* [Visual modeling in MatLab]. St. Petersburg, Moscow-Kharkov-Minsk, 2000. 432 p. (In Russian)
20. Dunayev M.P., Dovudov S.U. Simulation of frequency-pulse converter circuit. *Informatsionnyye i matematicheskiye tekhnologii v nauke i upravlenii* [Information and mathematical technologies in science and management]. 2019. No. 3(15). Pp. 144-152. doi: 10.25729/2413-0133-2019-3-13. (In Russian)
21. Dunaev MP, Dovudov SU. Modeling a Pulse-Width Converter Circuit. *Povyshenie effektivnosti proizvodstva i ispolzovaniya elektroenergii v usloviyakh Sibiri: Trudy Vserossiyskoj nauchno-prakticheskoy konferencii* [Improving Efficiency of Electric Energy Production and Use in the Conditions of Siberia. Proceedings of All-Russian practical and scientific conference]. Irkutsk, Irkutsk National Research Technical University Publ., 2019, vol. 1, pp. 3-6. (In Russian)
22. Dyakonov V.P. *MATLAB i Simulink dlya radioinzhenera* [MATLAB and Simulink for a radio engineer]. M.: DMK Press, 2011. 976 p. (In Russian)
23. Chernykh I.V. *Modelirovaniye elektrotekhnicheskikh ustroystv v MATLAB, SimPowerSystems i Simulink* [Simulation of electrical devices in MATLAB, SimPowerSystems and Simulink]. Moscow, DMK Press Publ., 2008. 288 p. (In Russian)
24. Colak I., Kabalci E., Bayindir R. Review of multilevel voltage source inverter topologies and control schemes. *Energy Conversion and Management*. 2011. Vol. 52. Iss. 2. Pp. 1114-1128. doi: 10.1016/j.enconman.2010.09.006.

Дунаев М.П., Довудов С.У. Моделирование потерь мощности в преобразователе частоты // *Электротехнические системы и комплексы*. 2021. № 2(51). С. 45-51. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-2\(51\)-45-51](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-2(51)-45-51)

Dunaev M.P., Dovudov S.U. Simulation of Power Losses in a Frequency Inverter. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2021, no. 2(51), pp. 45-51. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-2\(51\)-45-51](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-2(51)-45-51)

Серебряков Н.А.

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, г. Барнаул

## ПРИМЕНЕНИЕ АНСАМБЛЯ ГЛУБОКИХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ В ЗАДАЧАХ КРАТКОСРОЧНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОЧАСОВОГО ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ ГАРАНТИРУЮЩЕГО ПОСТАВЩИКА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

В настоящее время около 60% генерирующего оборудования в энергосистеме России приходится на тепловые электрические станции. Для эффективного управления режимом функционирования энергосистемы, вследствие малой маневренности тепловой генерации, необходима прогнозная информация о почасовой электрической нагрузке всех потребителей. В связи с этим покупка электроэнергии на оптовом рынке электроэнергии и мощности (ОРЭМ) предполагает краткосрочное прогнозирование собственного почасового электропотребления. Гарантирующие поставщики закупают необходимые объемы электроэнергии на ОРЭМ для дальнейшей ее продажи конечным потребителям. Ошибки краткосрочного прогнозирования электропотребления ухудшают финансовые показатели гарантирующих поставщиков, а также увеличивают цену на электроэнергию для конечных потребителей за счет оплаты необоснованных пусков в работу и остановов генерирующего оборудования, а также дополнительных потерь электроэнергии, вызванных выбором неоптимальной схемы электрических сетей. Данная статья посвящена вопросам повышения точности краткосрочного прогнозирования почасового электропотребления групп точек поставки гарантирующего поставщика электроэнергии с помощью инструментов искусственных нейронных сетей, в том числе глубокого обучения. Новизна работы заключается в учете при краткосрочном прогнозировании почасового электропотребления гарантирующего поставщика предложенных автором дополнительных влияющих факторов, а также в подборе наиболее подходящего нейросетевого алгоритма прогнозирования. Произведено сравнение точности прогнозирования нейросетевых моделей, учитывающих различный набор факторов. Выполнен сравнительный анализ точности краткосрочного прогнозирования электропотребления многослойного персептрона, одномерной и двумерной сверточных нейросетей, рекуррентной нейросети, ансамбля глубоких нейросетей, а также метода экспертных оценок на ретроспективных и фактических данных. На тестовой выборке данных ансамбль нейронных сетей продемонстрировал среднюю ошибку прогнозирования величиной 1,05%, что на 1,99% ниже ошибки прогноза многослойного персептрона. Относительно фактических данных ансамблевый нейросетевой алгоритм продемонстрировал ошибку прогноза величиной 2,45% на годовом интервале, что на 0,14% ниже ошибки прогноза, полученного с помощью метода экспертных оценок.

**Ключевые слова:** искусственная нейронная сеть, краткосрочное прогнозирование электропотребления, ошибка прогнозирования, алгоритм прогнозирования, оптовый рынок электроэнергии и мощности, факторы, гиперпараметры, обучающая выборка, свободные параметры, стохастический градиентный спуск, обучение.

### ВВЕДЕНИЕ

Необходимым условием надежного функционирования энергосистемы любого уровня является поддержание постоянного баланса между выработкой и потреблением электрической энергии. Около 60% генерирующего оборудования в энергосистеме приходится на тепловые электрические станции. Так как пуск в работу теплового генерирующего оборудования занимает более шести часов [1], то для эффективного управления режимом работы энергосистемы необходим краткосрочный почасовой прогноз электропотребления всех потребителей (*Short-Term Load Forecasting – STLF*). В условиях функционирования рынка электроэнергии точность прогнозов потребления существенно влияет на технологические и экономические показатели энергосистемы [2]. Ошибки прогноза потребления электроэнергии ведут к необоснованным пускам и остановам генерирующего оборудования, а также выбору неоптимальной схемы электрических сетей.

Покупка электроэнергии на оптовом рынке электроэнергии и мощности (ОРЭМ) предполагает краткосрочное прогнозирование собственного почасового электропотребления. Отклонения фактического электропотребления от прогнозного торгуются на ОРЭМ по невыгодной цене. Гарантирующие поставщики (ГП)

закупают необходимые объемы электроэнергии на ОРЭМ с помощью зарегистрированных групп точек поставки (ГТП) для последующей ее продажи конечным потребителям. Ошибки краткосрочного прогнозирования почасового электропотребления ухудшают финансовые показатели самого ГП, а также увеличивают цену для конечных потребителей.

Новизна работы заключается в учете при краткосрочном прогнозировании почасового электропотребления ГТП ГП предложенных автором дополнительных факторов (факторы ГТП ГП) [3]:

- запаздывания изменений электропотребления по отношению к изменениям температуры наружного воздуха;
- отключений питающих электрических сетей 6–110 кВ;
- графика функционирования потребителей электроэнергии с максимальной мощностью свыше 670 кВт;
- наличия центрального отопления и водоснабжения в населенных пунктах, обслуживаемых данным ГП.

В связи с учетом дополнительных факторов при прогнозе электропотребления ГТП ГП остаются открытыми вопросы выбора оптимального алгоритма краткосрочного прогнозирования электропотребления. В условиях неопределенности традиционные методы математической статистики или имитационного моделирования не позволяют строить адекватные модели объектов [4]. В настоящее время активно развиваются

технологии искусственного интеллекта и машинного обучения. Рассмотренные информационные технологии являются высокоэффективным инструментом для решения широкого перечня задач, которые относятся к слабоформализуемым или неформализуемым [5].

Статистические подходы к *STLF* обычно нуждаются в математической модели, которая представляет электрическую нагрузку как функцию различных факторов, таких как время, погода и класс потребителей [6]. В работе [7] авторами предложено представить почасовую электрическую нагрузку ГП в виде матричного произведения столбца влияющих факторов и матрицы свободных коэффициентов. В этом случае задача краткосрочного прогнозирования электропотребления сводится к поиску значений матрицы свободных коэффициентов с помощью инструментов искусственных нейронных сетей.

В настоящее время разработано множество методов *STLF*, которые можно разделить на методы математической статистики, искусственного интеллекта и гибридные методы [8]. Несмотря на большое количество разработанных алгоритмов краткосрочного прогнозирования электропотребления, ни один из них не может быть назван универсальным. В работах [9-12] применены устаревшие методы машинного обучения, такие как трехслойные перцептроны, метод опорных векторов и главных компонент и т.д. В настоящее время передовые позиции в области машинного обучения занимают алгоритмы глубоких нейронных сетей: сверточные нейронные сети, рекуррентные нейронные сети, а также их ансамбли. Однако глубокие нейронные сети ввиду большого количества параметров, оптимизируемых в процессе обучения, склонны к эффекту переобучения и сходимости алгоритма к локальным минимумам на поверхности ошибки. Стандартные методы борьбы с переобучением, такие как случайное прореживание связей между нейронами (*Dropout*) [13] и пакетная нормализация входных данных (*Batchnormalization*) [14], при решении задачи краткосрочного прогнозирования почасового электропотребления гарантирующего поставщика позволили добиться увеличения точности прогнозирования. Действенными способами увеличения сходимости алгоритма обучения и уменьшения эффекта переобучения нейросетей являются методы ансамблирования нескольких нейронных сетей, а также ранняя остановка алгоритма обучения нейросети после достижения максимума обобщающей способности. Композиционные методы (или ансамбли) классификации формируют набор различных моделей классификации для достижения лучшей точности, чем у каждой модели в отдельности [15].

Целью данной работы является повышение точности краткосрочного прогнозирования почасового электропотребления ГП с помощью инструментов искусственных нейронных сетей, в том числе глубокого обучения.

Задачами исследования являются:

- разработка нейросетевого алгоритма краткосрочного прогнозирования почасового электропотребления ГТП ГП;
- оценка эффективности применения современных адаптивных оптимизаторов функции энергии ошибки для обучения глубоких нейронных сетей;

- сравнительный анализ точности краткосрочного прогнозирования электропотребления ГТП ГП нейросетевых моделей, учитывающих различный набор факторов;

- сравнительный анализ точности краткосрочного прогнозирования электропотребления разработанного ансамблевого нейросетевого алгоритма, одиночных нейронных сетей, а также метода экспертных оценок на фактических и ретроспективных данных;

- оценка величины экономического эффекта от увеличения точности краткосрочного прогнозирования почасового электропотребления ГП.

#### РАЗРАБОТКА АНСАМБЛЕВОГО НЕЙРОСЕТЕВОГО АЛГОРИТМА КРАТКОСРОЧНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОЧАСОВОГО ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ ГП

Разработка нейросетевого алгоритма краткосрочного прогнозирования почасового электропотребления гарантирующего поставщика предполагает оптимизацию в различных ее проявлениях. Свободные параметры нейросети оптимизируются в процессе обучения на статистических данных – обучающей выборке. Обучение современных глубоких искусственных нейронных сетей (ИНС) происходит на основании алгоритма обратного распространения ошибки. В данном случае имеется задача оптимизации, целевым параметром которой является функция энергии ошибки ИНС  $J$ .

В настоящее время наиболее успешным способом оптимизации сложных функций является алгоритм градиентного спуска (*Gradient Descent Algorithm*). Если целевая функция дифференцируема по своим параметрам, то градиентный спуск является относительно эффективным методом оптимизации [16]. Стохастический градиентный спуск работает без проблем при оптимизации выпуклых целевых функций. Однако функция энергии ошибки многослойной нейронной сети в большинстве случаев будет являться невыпуклой функцией. То есть данная функция имеет множество локальных минимумов, плато и седловых точек, в окрестности которых градиент принимает нулевое или положительные значения. Данное обстоятельство способствует замедлению сходимости алгоритма градиентного спуска в область глобального минимума поверхности ошибки.

Современные инструменты машинного обучения позволяют реализовать алгоритм обратного распространения ошибки с адаптивным, в процессе обучения, параметрами скорости обучения и момента инерции, такие как метод адаптивной инерции (*Adaptive Momentum Estimation – Adam*) [16]. Алгоритм *Adam* основан на идее коррекции параметра скорости обучения за счет накопления градиента функции потерь  $J$  в сочетании с импульсным методом. Во-первых, рассчитывается первый момент, который представляет собой экспоненциальное скользящее среднее значений градиента функции потерь  $J$  и его скорректированное значение:

$$\begin{cases} m(n) = \beta_1 m(n-1) + (1 - \beta_1) g(n); \\ \hat{m}(n) = \frac{m(n)}{1 - \beta_1^n}, \end{cases} \quad (1)$$

где  $m(n)$  – экспоненциальное скользящее среднее значений градиента функции потерь  $J$ ;  $\beta_1$  – сглаживающая

константа, значение которой по умолчанию равно 0,9;  $\hat{m}(n)$  – скорректированное значение экспоненциально-скользящего среднего значений градиента функции потерь  $J$ ;  $g(n) = \nabla J(n)$  – градиент функции потерь на шаге обучающего цикла  $n$ .

Далее рассчитывается второй момент, который представляет из себя среднюю нецентрированную дисперсию функции потерь  $J$  и ее скорректированное значение:

$$\begin{cases} v(n) = \beta_2 v(n-1) + (1 - \beta_2) g^2(n); \\ \hat{v}(n) = \frac{v(n)}{1 - \beta_2^n}, \end{cases} \quad (2)$$

где  $v(n)$  – нецентрированная дисперсия функции потерь  $J$ ;  $\beta_2$  – сглаживающая константа, значение которой по умолчанию равно 0,999;  $\hat{v}(n)$  – скорректированное значение нецентрированной дисперсии функции потерь  $J$ .

Корректировка моментов  $m(n)$  и  $v(n)$  производится для искусственного увеличения данных параметров на начальных итерациях обучающего цикла. Дельта-правило коррекции свободных параметров нейронной сети при использовании алгоритма *Adam* принимает вид

$$w_{ij}(n+1) = w_{ij}(n) - \frac{\eta}{\sqrt{\hat{v}(n)} + \epsilon} \hat{m}(n), \quad (3)$$

где  $w_{ij}(n)$  – вес синаптической связи между нейронами  $i$  и  $j$  на эпохе обучения  $n$ ;  $\eta$  – коэффициент скорости обучения сети;  $\epsilon$  – сглаживающая константа, значение которой по умолчанию равно 0,01.

Параметры нейросети, которые не могут быть оптимизированы в процессе обучения, относятся к категории гиперпараметров:

- количество и размер скрытых слоев ИНС;
- вид функции активации;
- коэффициенты скорости обучения и момента инерции;
- количество итераций обучающего цикла.

До недавнего времени единственным способом оптимизации гиперпараметров являлся простой перебор различных вариантов архитектур, типов нейронов, начальных условий, методов обучения и дальнейший выбор наиболее удачного решения [17]. Однако современные инструменты машинного обучения позволяют автоматизировать процесс оптимизации гиперпараметров. Одним из наиболее успешных алгоритмов оптимизации гиперпараметров нейронных сетей является алгоритм *Hyperband* [18]. В начале работы данного алгоритма задается набор оптимизируемых гиперпараметров, диапазон изменения каждого гиперпараметра и дискретность шага поиска. Далее моделируются нейросетевые модели всевозможной конфигурации гиперпараметров из заданного диапазона. Затем в процессе обучения после некоторого количества эпох отбрасывается половина конфигураций нейросетей, показавших худшую точность прогнозирования. Процесс продолжается, пока не останутся 2-3 наилучшие конфигурации нейросети. Например:

- искомый гиперпараметр: количество скрытых слоев;
- диапазон изменения гиперпараметра [1;10];
- шаг поиска 1.

На рис. 1 представлены кривые обучения многослойного персептрона с различным количеством скрытых слоев (*Hidden Layer*) на тестовой выборке данных.

Как видно из графиков на рис. 1, оптимальным количеством скрытых слоев в многослойном персептроне является два. Уменьшение или увеличение количества скрытых слоев ухудшает обобщающую способность данной ИНС.

Алгоритмы прогнозирования электропотребления могут быть классифицированы на две категории: одиночные модели прогнозирования и ансамбли из нескольких моделей [19]. С помощью алгоритма *Hyperband* определена оптимальная конфигурация для:

1. Многослойного персептрона (*MLP*), состоящего из:
  - входного слоя размером 336 сенсорных элементов;
  - первого скрытого слоя размером 96 нейронов с сигмоидальной функцией активации и 1 порога активации;
  - второго скрытого слоя размером 48 нейронов с сигмоидальной функцией активации и 1 порога активации;
  - выходного слоя размером 24 нейрона с сигмоидальной функцией активации.

Всего количество свободных параметров ИНС составляет 36363. Обучение модели происходит на основании метода адаптивной инерции *Adam* с начальной скоростью обучения  $\eta_0 = 0,02$ .

2. Одномерной сверточной нейросети (*CNN\_1D*), состоящей из:
  - входного слоя размером 336 сенсорных элементов (*Input Layer*);
  - слоя пересортировки входных данных к виду, необходимому для их обработки *CNN* (*Reshape*);
  - двух слоев одномерной свертки, состоящих из 22-х ядер свертки размером 2 элемента (*Conv1D*);
  - слоя одномерного пулинга (*MaxPooling1D*);
  - слоя преобразования входного массива данных в одномерный вектор-столбец (*Flatten*);
  - скрытого слоя размером 120 нейронов с кусочно-линейной функцией активации *RELU* и 1 порога активации;
  - выходного слоя размером 24 нейрона с сигмоидальной функцией активации.

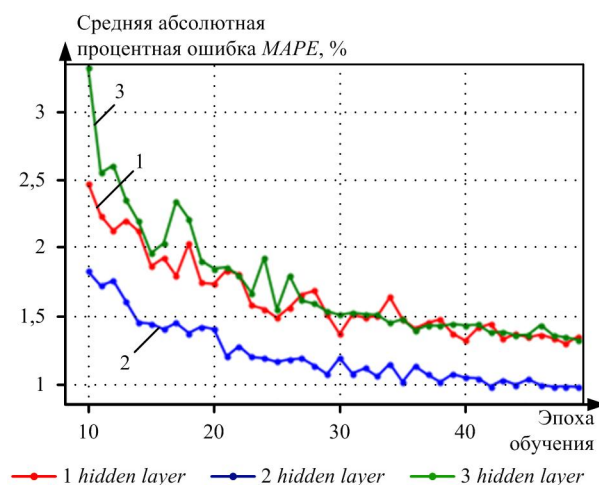


Рис. 1. Кривые обучения многослойного персептрона с различным количеством скрытых слоев (*Hidden Layer*) на тестовой выборке данных

Данная нейросеть имеет свободных 21089 параметров. Обучение модели происходит на основании алгоритма адаптивной инерции *Adam* с начальной скоростью обучения  $\eta_0 = 0,02$ .

3. Двухмерной сверточной нейросети (*CNN\_2D*), состоящей из:

- входного слоя размером 336 сенсорных элементов (*Input Layer*);
- слоя пересортировки входных данных к виду, необходимому для их обработки *CNN (Reshape)*;
- двух слоев двухмерной свертки (*Conv2D*);
- слоя двухмерного пулинга (*MaxPooling2D*);
- слоя преобразования входного массива данных в одномерный вектор-столбец (*Flatten*);
- скрытого слоя размером 84 нейронов с сигмоидальной функцией активации *RELU* и 1 порога активации;
- выходного слоя размером 24 нейрона сигмоидальной функцией активации.

Общее количество свободных параметров 70063. Обучение модели происходит на основании алгоритма *Adam* с начальной скоростью обучения  $\eta_0 = 0,01$ .

4. Сверточно-рекуррентной нейросети (*LSTM*), которая состоит из:

- входного слоя размером 336 сенсорных элементов (*Input Layer*);
- слоя пересортировки входных данных к виду, необходимому для их обработки сверточными слоями (*Reshape*);
- двух слоев одномерной свертки, состоящих из 22-х ядер свертки размером 2 элемента (*Conv1D*);
- слоя одномерного пулинга (*MaxPooling1D*);
- слоя преобразования входного массива данных в одномерный вектор-столбец (*Flatten*);
- рекуррентного слоя типа *LSTM* размером 120 нейронов с сигмоидальной функцией активации;
- выходного слоя размером 24 нейрона с сигмоидальной функцией активации.

Данная сверточно-рекуррентная нейронная сеть имеет 75 152 свободных параметров. Обучение модели происходит на основании алгоритма *Adam* с начальной скоростью обучения  $\eta_0 = 0,02$ .

5. Ансамбля нейронных сетей (*Ensemble*), состоящего из вышеперечисленных нейронных сетей, включенных на параллельную работу, и блока усреднения по ансамблю (*Average*). Данная нейросеть имеет 221 887 свободных параметров. Обучение модели происходит на основании алгоритма адаптивной инерции *Adam* с начальной скоростью обучения  $\eta_0 = 0,02$ .

Моделирование и прогнозирование осуществлялось с помощью библиотеки глубокого обучения *Keras* на языке программирования *Python 3.6*.

Входным вектором для данных нейросетей является одномерный вектор-столбец размером 336 элементов, соответствующий почасовым суточным величинам электропотребления и основных влияющих факторов [20]. Выходом моделей является вектор-столбец размером 24 элемента, соответствующий почасовому суточному прогнозу электропотребления гарантирующего поставщика. Основой для обучающей выборки являются статистические данные о почасовом электропотреблении группы точек поставки (ГТП) «Южная», зарегистрированной за гарантирующим поставщиков

АО «Алтайкрайэнерго», а также величине 14-ти влияющих факторов за период с 01.04.2016 по 30.12.2019 (1368 тренировочных примеров):

- фактическое электропотребление (случайная величина, распределенная по нормальному закону с математическим ожиданием (М.О.)  $M = 4,74$  и среднеквадратичным отклонением (СКО)  $\sigma = 11,22$ );
- порядковый номер дня в году;
- порядковый номер дня недели;
- порядковый номер часа суток;
- признак праздничного дня;
- признак каникул в образовательных учреждениях;
- признак наличия центрального отопления;
- признак наличия горячего водоснабжения;
- признак наличия холодного водоснабжения;
- относительная длительность светового дня;
- признак режима работы крупных потребителей;
- ветро-холодовой индекс (случайная величина, распределенная по нормальному закону с М.О.  $M = 4,7$  и СКО  $\sigma = 14,9$ );

- дисперсия суточных значений температуры воздуха, учитывающая динамику изменений температуры (случайная величина, распределенная по нормальному закону с М.О.  $M = 2,54$  и СКО  $\sigma = 19,7$ );
- количество осадков, выпавших в светлое время суток (случайная величина, распределенная по показательному закону с параметром  $\lambda = 0,71$ ).

27.03.2016 г. произошёл последний переход на летнее время в Алтайском крае, в связи с чем значительно изменилась форма суточного графика электропотребления. Использование данных за период до 01.04.2016 г. ухудшает точность прогнозирования почасового электропотребления данной ГТП.

Структурная схема ансамбля нейросетей, предназначенных для краткосрочного прогнозирования почасового электропотребления ГП представлена на рис. 2.

Ансамбль нейросетей, изображенный на рис. 2, имеет более 220 тыс. свободных параметров. Данная нейронная сеть, ввиду большого количества свободных параметров, будет склонна к сходимости к локальным минимумам на поверхности ошибки. Современные оптимизаторы функции энергии ошибки позволяют более эффективно достигать окрестности глобального минимума поверхности. На рис. 3 представлены кривые изменения средней абсолютной процентной ошибки прогнозирования почасового электропотребления гарантирующего поставщика (кривые обучения) при использовании различных оптимизаторов функции энергии ошибки на тестовой выборке данных. Средняя абсолютная процентная ошибка (*Mean Absolute Percentage Error – MAPE*) прогноза почасового электропотребления ГТП ГП вычислялась на основании выражения

Ансамбль нейросетей, изображенный на рис. 2, имеет более 220 тыс. свободных параметров. Данная нейронная сеть, ввиду большого количества свободных параметров, будет склонна к сходимости к локальным минимумам на поверхности ошибки. Современные оптимизаторы функции энергии ошибки позволяют более эффективно достигать окрестности глобального минимума поверхности. На рис. 3 представлены кривые изменения средней абсолютной процентной ошибки прогнозирования почасового электропотребления гарантирующего поставщика (кривые обучения) при использовании различных оптимизаторов функции энергии ошибки на тестовой выборке данных. Средняя абсолютная процентная ошибка (*Mean Absolute Percentage Error – MAPE*) прогноза почасового электропотребления ГТП ГП вычислялась на основании выражения

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^{24} \left| \frac{p_{ik}^{\text{факт}} - p_{ik}^{\text{прогноз}}}{p_{ik}^{\text{факт}}} \right| \cdot 100, \quad (4)$$

где  $p_{ik}^{\text{факт}}$  – фактическое электропотребление ГП в час  $i$  суток  $k$ ;  $p_{ik}^{\text{прогноз}}$  – прогнозное электропотребление ГТП ГП в час  $i$  суток  $k$ ;  $N$  – количество суток в выборке данных.

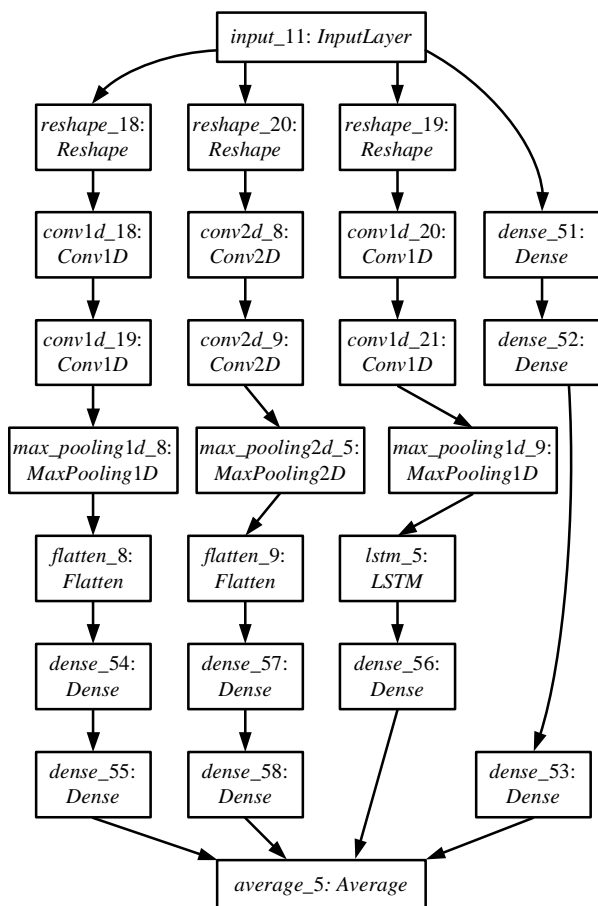


Рис. 2. Структурная схема ансамбля нейросетей, предназначенных для краткосрочного прогнозирования почасового электропотребления ГП

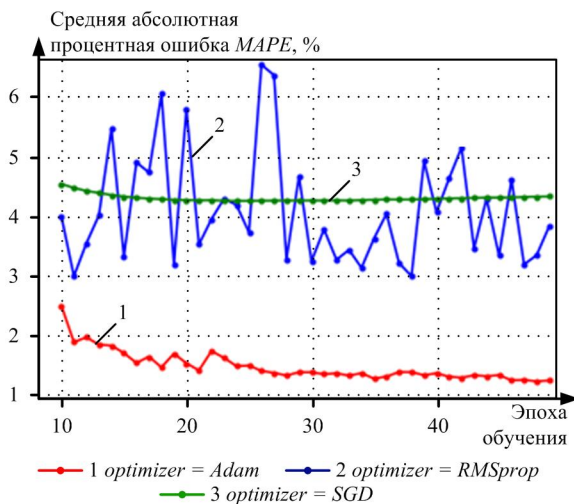


Рис. 3. Кривые изменения средней абсолютной процентной ошибки прогнозирования почасового электропотребления гарантирующего поставщика при использовании различных оптимизаторов функции энергии ошибки на тестовой выборке

Как видно из графиков на рис. 3, метод адаптивной инерции *Adam* демонстрирует наибольшую эффективность при оптимизации свободных параметров ансамбля нейронных сетей, предназначенного для краткосрочного прогнозирования электропотребления. Применение метода адаптивной инерции позволило снизить ошибку краткосрочного прогнозирования почасового электропотребления на тестовой выборке данных

по итогам 50-ти эпох обучающего цикла на 3,15% (с 4,36 до 1,21%) по сравнению с ошибкой прогноза нейросети, обученной с помощью метода стохастического градиентного спуска (*SGD*). Метод среднеквадратичного распространения (*RMSprop*) не продемонстрировал стабильной точности прогнозирования на тестовой выборке.

Также действенным способом борьбы с переобучением является ранний останов алгоритма обучения ИНС после достижения наибольшей обобщающей способности. Показателем достижения ИНС максимума обобщающей способности является факт малого изменения абсолютной ошибки в течение эпохи обучения:

$$\frac{1}{C} \sum_{j \in C} \Delta e_j(n) \leq 0,05\%, \quad (5)$$

где  $C$  – множество нейронов выходного слоя;  $\Delta e_j(n)$  – изменение абсолютной ошибки нейрона  $j$  выходного слоя в течение эпохи обучения  $n$ .

Точность алгоритмов краткосрочного прогнозирования почасового потребления электроэнергии ГП на фактических и ретроспективных данных оценивалась с помощью обратно-пропорциональной величины средней абсолютной процентной ошибки (*MAPE*) прогнозирования. Статистическая обработка результатов расчёта средних ошибок прогнозирования на актуальных и ретроспективных данных производилась с помощью числовых характеристик случайной величины:

1. Математического ожидания (*М.О.*):

$$M(\delta) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \delta_k, \quad (6)$$

где  $M(\delta)$  – математическое ожидание;  $\delta_k$  – среднесуточная абсолютная процентная ошибка прогнозирования почасового электропотребления ГП в сутки  $k$ .

2. Дисперсии:

$$D(\delta) = \frac{1}{N-1} \sum_{k=1}^N (\delta_k - M(\delta))^2. \quad (7)$$

3. Среднеквадратичного отклонения (*СКО*):

$$\sigma(\delta) = \sqrt{D(\delta)}. \quad (8)$$

#### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В данном исследовании произведен сравнительный анализ точности краткосрочного прогнозирования почасового электропотребления нейросетевых моделей, учитывающих различный набор факторов:

- модель 1 – учитывает факторы времени, метеорологических условий, дисперсии суточных значений температуры воздуха  $D_k$ , режима работы потребителей электроэнергии с присоединенной мощностью свыше 670 кВт, наличия центрального отопления и горячего (холодного) водоснабжения, каникул в образовательных учреждениях;
- модель 2 – учитывает только факторы времени и метеорологических условий;
- модель 3 – учитывает факторы времени, метеорологических условий, дисперсии суточных значений температуры воздуха  $D_k$ , режима работы потребителей электроэнергии с присоединенной мощностью свыше 670 кВт, наличия центрального отопления и горячего (холодного) водоснабжения, каникул в образовательных учреждениях;

рологических условий, дисперсии суточных значений температуры воздуха  $D_k$ .

Прогнозирование осуществлялось с помощью многослойного персептрона, конфигурация которого описана выше. Обучение и тестирование нейросети происходило в течение 50 эпох обучающего цикла с помощью метода адаптивной инерции *Adam*. На **рис. 4** представлены кривые изменения средней абсолютной процентной ошибки краткосрочного прогнозирования электропотребления ГПП нейросетевых моделей, учитывающих различный набор факторов на тестовой выборке данных за период 01.04.2016 г. – 30.12.2019 г.

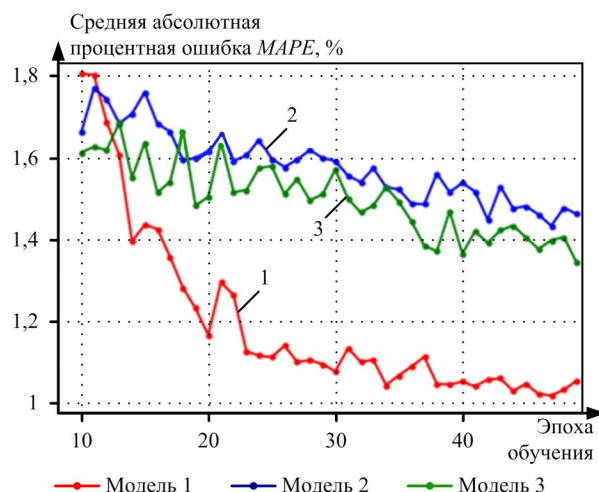
Из графиков на **рис. 4** видно, что применение нейросетевой модели 1, учитывающей факторы времени, метеорологических условий, приведенной дисперсии температуры, а также факторы ГТП ГПП, позволило снизить среднюю абсолютную процентную ошибку прогнозирования на тестовых данных по итогам 50-ти циклов обучения на 0,41% (с 1,46 до 1,05%) по сравнению с ошибкой прогноза, полученного с помощью модели 2, учитывающей только факторы времени и метеорологических условий. Модель 3, учитывающая факторы времени, метеорологических условий и приведенной дисперсии температуры, продемонстрировала ошибку прогнозирования величиной 1,35%.

В ходе данного исследования произведен сравнительный анализ точности краткосрочного прогнозирования почасового электропотребления ГТП ГПП, полученного с помощью метода экспертных оценок, многослойного персептрона (*MLP*), одномерной сверточной нейросети (*CNN\_1D*), двухмерной сверточной нейросети (*CNN\_2D*), рекуррентной нейросети типа долго- и краткосрочной памяти (*LSTM*) и ансамблевого нейросетевого алгоритма (*Ensemble*). В роли экспертов выступили специалисты отдела по работе на оптовом рынке электроэнергии и мощности АО «Алтайкрайэнерго», которые более 10-ти лет профессионально занимаются прогнозированием электропотребления в целях покупки электроэнергии на ОРЭМ. Отдел по работе на ОРЭМ Алтайкрайэнерго состоит из начальника отдела (эксперт 1) и двух ведущих инженеров (эксперт 2 и эксперт 3). Прогноз собственного электропотребления в данном случае получается на основании коллективной экспертной оценки, полученной на основании выражения

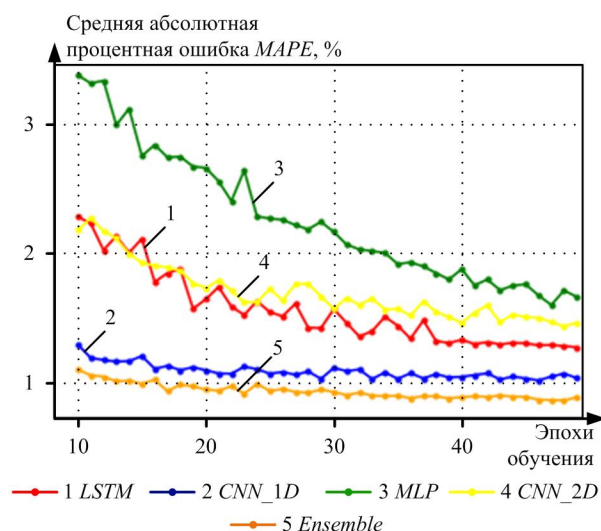
$$Y = k_1 Y_1 + k_2 Y_2 + k_3 Y_3, \quad (9)$$

где  $Y$  – итоговый прогноз почасового электропотребления;  $k_1 = 0,4$  – коэффициент доверия эксперту 1;  $k_2 = k_3 = 0,3$  – коэффициенты доверия эксперту 2 и эксперту 3 соответственно;  $Y_i$  – прогноз электропотребления эксперта  $i$ .

Для оценки эффективности применения, разработанного ансамблевого нейросетевого алгоритма краткосрочного прогнозирования почасового электропотребления ГТП ГПП произведено сравнение точности данного алгоритма и одиночных нейронных сетей на ретроспективных данных. На **рис. 5** представлены кривые изменения средней абсолютной процентной ошибки прогнозирования нейросетевых алгоритмов на тестовой выборке данных.



**Рис. 4.** Кривые изменения средней абсолютной процентной ошибки краткосрочного прогнозирования электропотребления ГТП ГПП нейросетевых моделей, учитывающих различный набор факторов на тестовой выборке данных за период 01.04.2016 г. – 30.12.2019 г.



**Рис. 5.** Кривые изменения средней абсолютной процентной ошибки прогнозирования нейросетевых алгоритмов на тестовой выборке данных

Анализируя численные характеристики случайной величины абсолютной процентной ошибки краткосрочного прогнозирования почасового электропотребления ГТП ГПП, можно сделать вывод о том, что данные в **табл. 1** коррелируют с графиками на **рис. 5**. Ансамблевый нейросетевой алгоритм демонстрирует наименьшую среднюю ошибку прогнозирования при наименьшем среднеквадратичном отклонении.

**Таблица 1**

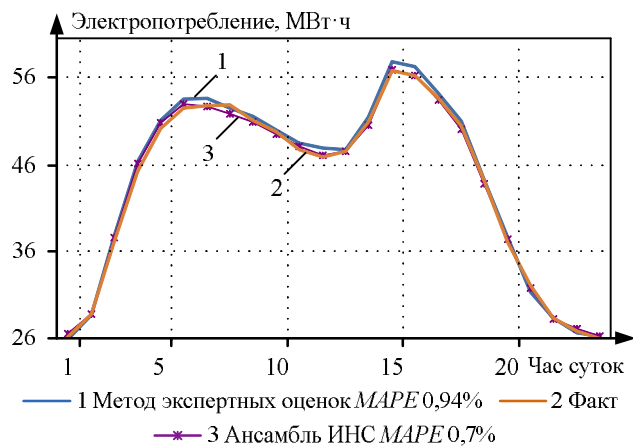
**Численные характеристики случайной величины ошибки почасового прогноза электропотребления ГТП «Южная» нейросетевых алгоритмов на тестовой выборке данных с 01.04.2016 г. по 30.12.2019 г.**

Алгоритм	LSTM	CNN_1D	MLP	CNN_2D	Ensemble
М.О. $M(\delta)$ , %	2,06	1,24	3,04	1,91	1,05
СКО $\sigma(\delta)$ , %	1,24	0,48	1,89	0,6	0,43
Д.О. $s$ , %	0,35	0,14	0,54	0,17	0,12

После тестирования разработанных нейросетевых алгоритмов на ретроспективных данных была произведена апробация данных алгоритмов на фактических данных. На **рис. 6** представлены фактический и прогнозные суточные профили электропотребления ГТП «Южная» за 28.11.2019 г.

Как видно из графиков на **рис. 6**, электрическая нагрузка ГТП ГП имеет неравномерное распределение по часам суток. Краткосрочное прогнозирование данного суточного профиля электропотребления является достаточно сложной задачей.

Далее произведен сравнительный анализ точности краткосрочного прогнозирования почасового электропотребления ГТП ГП, полученного с помощью ансамблевого нейросетевого алгоритма и метода экспертных оценок на фактических данных на годовом интервале. В **табл. 2** представлены данные о величине среднемесячной абсолютной ошибки краткосрочного прогнозирования почасового электропотребления ГТП ГП по месяцам 2020 года.



**Рис. 6.** Фактический и прогнозные суточные профили электропотребления ГТП «Южная» за 28.11.2019 г.

**Таблица 2**  
Данные о величине среднемесячной абсолютной ошибки краткосрочного прогнозирования почасового электропотребления ГТП ГП по месяцам 2020 г.

Месяц	Среднемесячная MAPE, %	
	Метод экспертных оценок	Ансамбль ИНС
январь	1,93	1,90
февраль	1,84	1,65
март	2,04	1,96
апрель	2,81	2,65
май	3,14	3,53
июнь	2,97	2,62
июль	2,83	2,48
август	2,92	2,72
сентябрь	3,39	3,61
октябрь	2,68	2,26
ноябрь	2,39	2,06
декабрь	2,19	1,94
<b>М.О. М(δ), %</b>	<b>2,59</b>	<b>2,45</b>
<b>СКО σ(δ), %</b>	<b>0,51</b>	<b>0,62</b>

Как видно из **табл. 2**, относительно фактических данных ансамблевый нейросетевой алгоритм продемонстрировал среднегодовую ошибку прогноза величиной 2,45%, что на 0,14% ниже ошибки прогноза, полученного с помощью метода экспертных оценок.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение нейросетевой модели, учитывающей, помимо стандартных временных и метеорологических, факторы инерционности изменений электропотребления по отношению к изменениям температуры наружного воздуха, режима работы потребителей электроэнергии с присоединенной мощностью свыше 670 кВт, наличия центрального отопления и горячего (холодного) водоснабжения, позволило снизить среднюю ошибку прогнозирования на тестовых данных на 0,41% (с 1,46 до 1,05%) по сравнению с ошибкой прогноза, полученного с помощью модели, учитывающей только факторы времени и метеорологических условий. Ансамблевый нейросетевой алгоритм краткосрочного прогнозирования почасового электропотребления гарантирующего поставщика продемонстрировал среднюю ошибку прогнозирования на тестовых данных за период с 01.04.2016 г. по 30.12.2019 г. величиной 1,05%, что на 1,99% ниже ошибки прогноза, полученного с помощью многослойного персептрона. Относительно фактических данных ансамблевый нейросетевой алгоритм продемонстрировал ошибку прогнозирования величиной 2,45% на годовом интервале, что на 0,14% ниже ошибки прогноза метода экспертных оценок.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Клер А.М., Степанова Е.Л., Максимов А.С. Оптимизация режимов работы ТЭЦ с учетом реального состояния основного оборудования // Теплоэнергетика. 2009. № 6. С. 53-57.
2. Доманов В.И., Билалова А.И. Прогнозирование объемов энергопотребления в зависимости от исходной информации // Вестник ЮУрГУ. Сер. Энергетика. 2016. Т. 16. №2. С. 59-65. DOI: 10.14529/power160208.
3. Серебряков Н.А. Анализ факторов, влияющих на совокупное электропотребление гарантирующего поставщика // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2020. Т. 24. № 2. С. 366-381. doi: <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-2-366-381>.
4. Katasev A.S. Neuro-fuzzy model of fuzzy rules formation for objects state evaluation in conditions of uncertainty // Computer Research and Modeling. 2019. Vol. 11(3). Pp. 477-492. doi: 10.20537/2076-7633-2019-11-3-477-492.
5. Станкевич Т.С. Разработка метода оперативного прогнозирования динамики развития лесного пожара посредством искусственного интеллекта и глубокого машинного обучения // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 9. С. 111-120. doi: 10.21285/1814-3520-2018-9-111-120.
6. Masood N.A., Ahsan Q.A. Methodology for identification of weather sensitive component of electrical load using empirical mode decomposition technique // Energy and Power Engineering. 2013. Vol. 5. Pp. 293-300.
7. Хомутов С.О., Серебряков Н.А. Создание нейросетевой математической модели краткосрочного прогнозирования электропотребления электротехнического комплекса участка районных электрических сетей 6–35 кВ // Транспортные системы и технологии. 2020. Т. 6. № 1. С. 80-91. doi: 10.17816/transsyst20206180-91.
8. Бояркин Д.А., Крупенев Д.С., Якубовский Д.В. Использование методов машинного обучения при оценке надежности электроэнергетических систем методом

- Монте-Карло // Вестник ЮУрГУ. Сер. Математическое моделирование и программирование. 2018. Т. 11. №4. С. 146-153. doi: 10.14529/mmp180411.
9. Торопов А.С., Туликов А.Н. Прогнозирование почасового электропотребления региональной энергосистемы с использованием искусственных нейронных сетей // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2017. Т. 21. №5. С. 143-151. doi: 10.21285/1814-3520-2017-5-143-151.
  10. Кирпичникова И.М., Саплин Л.А., Соломахо К.Л. Прогнозирование объемов потребления электроэнергии // Вестник ЮУрГУ. Сер. Энергетика. 2014. Т. 14. №2. С. 16-21.
  11. Иванин О.А., Директор Л.Б. Применение искусственных нейронных сетей для прогнозирования энергетических нагрузок обособленных потребителей // Теплоэнергетика. 2018. № 5. С. 17-26. doi:10.1134/S0040363618050041.
  12. Надтока И.И., Хусейн А.З.Б.М. Краткосрочное прогнозирование электропотребления региона с учетом метеорологических факторов на основе метода опорных векторов и алгоритма роя частиц // Известия вузов. Электромеханика. 2014. № 3. С. 44-47.
  13. Dropout: a simple way to prevent neural networks from overfitting / N. Srivastava, G. Hinton, A. Krizhevsky, I. Sutskever, R. Salakhutdinov // Journal of Machine Learning Research. 2014. Vol. 15. Pp. 1929-1958.
  14. Ioffe S., Szegedy C. Batch Normalization: Accelerating deep network training by reducing internal covariate shift. URL: <https://arxiv.org/pdf/1502.03167.pdf> (дата обращения: 02.03.2020)
  15. Жуков А.В., Сидоров Д.Н. Модификация алгоритма случайного леса для классификации нестационарных потоковых данных // Вестник ЮУрГУ. Сер. Математическое моделирование и программирование. 2016. Т. 9. №4. С. 86-95. doi: 10.14529/mmp160408.
  16. Kingma D.P., Lei Ba J. ADAM: a method for stochastic optimization. URL: <https://arxiv.org/pdf/1412.6980.pdf> (дата обращения: 12.12.2020)
  17. Воевода А.А., Романников Д.О. Синтез нейронной сети для реализации рекуррентного метода наименьших квадратов // Научный вестник НГТУ. 2018. № 3(72). С. 33-42. doi: 10.17212/1814-1196-2018-3-33-42.
  18. Hyperband: A Novel Bandit-Based Approach to Hyperparameter Optimization / L. Li, K. Jamieson, G. Desalvo, A. Rostamizadeh, A. Talwalkar // Journal of Machine Learning Research. 2018. No. 18 Pp. 1-52. URL: <https://arxiv.org/pdf/1603.06560.pdf> (дата обращения: 18.04.2021).
  19. Wang Z., Srinivasan R. A review of artificial intelligence based building energy use prediction: Contrasting the capabilities of single and ensemble prediction models // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2017. Vol. 75. Pp. 796-808.
  20. Методика формирования обучающей выборки в задачах краткосрочного прогнозирования электропотребления гарантирующего поставщика / С.О. Хомутов, Р.Н. Хамитов, А.С. Грищай, Н.А. Серебряков // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. Вып. 2. С. 227-233.

Поступила в редакцию 30 марта 2021 г.

## INFORMATION IN ENGLISH

### APPLICATION OF DEEP NEURAL NETWORK ENSEMBLE IN A PROBLEM OF SHORT-TERM LOAD FORECASTING GUARANTEED ELECTRICITY SUPPLIER

Nikolay A. Serebryakov

Postgraduate student, Department of Power Supply of Industrial Enterprises, Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia. E-mail: [Na\\_serebryakov@altke.ru](mailto:Na_serebryakov@altke.ru). ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7428-7364>.

At present, thermal power plants account for about 60% of generating equipment in the Russian energy system. To effectively control the mode of operation of the power system, due to the low flexibility of thermal generation, predictive information about the hourly electrical load of all consumers is required. In this regard, the purchase of electricity on the wholesale electricity and capacity market (WECM) presupposes a short-term forecast of its own hourly electricity consumption. Suppliers of last resort purchase the required volumes of electricity on the wholesale electricity market for its further sale to end consumers. Errors in short-term forecasting of electricity consumption worsen the financial indicators of guaranteed suppliers, and also increase the price of electricity for end users by paying for unreasonable start-ups and shutdowns of generating equipment, as well as additional losses of electricity caused by the choice of a non-optimal scheme of electrical networks. The most important condition for achieving high accuracy of short-term forecasting is the choice of the optimal forecasting algorithm. This article is devoted to the issues of increasing the accuracy of short-term forecasting of hourly electricity consumption of groups of supply points of a guaranteeing electricity supplier using artificial neural network tools including deep learning. A comparative analysis of the accuracy of short-term prediction of power consumption of a multilayer perceptron, one-dimensional and two-dimensional convolutional neural networks, a recurrent neural network, an ensemble of deep neural networks, as well as the method of expert estimates based on retrospective and actual data has been carried out. On the test

sample of data, the ensemble of neural networks demonstrated an average prediction error of 1.05%, which is 1.99% lower than the forecast error of a multilayer perceptron. With regard to the factual data, the ensemble neural network algorithm demonstrated a forecast error of 2.45% on an annual interval, which is 0.14% lower than the forecast error obtained using the method of expert estimates. An assessment of the expected annual economic effect from an increase in the accuracy of short-term forecasting of electricity consumption was made, which amounted to 256,865.8 rubles.

**Keywords:** artificial neural network, short-term load forecasting, forecasting error, forecasting algorithm, wholesale electricity and power market, factors, hyperparameters, training sample, free parameters, stochastic gradient descent, training.

#### REFERENCES

1. Kler A.M., Stepanova E.L., Maksimov A.S. Enhancement of CHP operating modes taking into account the real state of the primary equipment. *Teploenergetika* [Thermal Engineering], 2009, no. 6, pp. 53–57. (In Russian)
2. Domanov V.I., Bilalova A.I. Forecasting power consumption based on source information. *Vestnik yuzhno-uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika* [Bulletin of the South Ural State University. Series "Power Engineering"], 2016; vol. 16, no. 2, pp. 59–65. doi: <https://doi.org/10.14529/power160208> (In Russian)
3. Serebryakov N.A. Analysis of factors affecting the electricity consumption of a delivery point cluster default

- provider. Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2020, vol. 24, no. 2, pp. 366–381. doi: <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-2-366-381> (In Russian)
4. Katasev A.S. Neuro-fuzzy model of fuzzy rules formation for objects state evaluation in conditions of uncertainty. Computer Research and Modeling. 2019, vol. 11(3). pp. 477–492. doi: 10.20537/2076-7633-2019-11-3-477-492.
5. Stankevich T.S. Development of operational prediction method of forest fire dynamics based on artificial intelligence and deep machine learning. Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2018, vol. 22, no. 9, pp. 111–120. doi: 10.21285/1814-3520-2018-9-111-120. (In Russian)
6. Masood N.A., Ahsan Q. A Methodology for identification of weather sensitive component of electrical load using empirical mode decomposition technique. Energy and Power Engineering. 2013. Vol. 5. Pp. 293–300.
7. Khomutov S.O., Serebryakov N.A. Creation of a short-term load forecasting neural network model of electrical engineering complex of section regional electric grid. Transportnye sistemy i tekhnologii [Transportation Systems and Technology], 2020, vol. 6, no. 1, pp. 80–91. doi: 10.17816/transsyst20206100-00. (In Russian)
8. Boyarkin D.A., Krupenev D.S., Yakubovskiy D.V. Machine learning in electric power systems adequacy assessment using Monte Carlo method. Vestnik YuUrGU. Seriya: Matematicheskoe modelirovanie i programmirovaniye. [Bulletin of the South Ural State University. Series "Mathematical Modelling, Programming & Computer Software"], 2018, vol. 11, no. 4, pp. 146–153. doi: 10.14529/mmp180411. (In Russian)
9. Toropov A.S., Tulikov A.N. Forecasting of regional power supply system power consumption per hour using artificial neural networks. Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2017, vol. 21, no. 5, pp. 143–151. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-5-143-151> (In Russian)
10. Kirpichnikova I.M., Saplin L.A., Solomakho K.L. Energy consumption forecasting. Vestnik yuzhno-uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika. [Bulletin of the South Ural State University. Series "Power Engineering"], 2014, vol. 14, no. 2, pp. 16–22. (In Russian)
11. Ivanin O.A., Direktor L.B. The Use of Artificial Neural Networks for Forecasting the Electric Demand of Stand-Alone Consumers. Teploenergetika [Thermal Engineering], 2018, no. 5, pp. 17–26. <https://doi.org/10.1134/S0040363618050041> (In Russian)
12. Nadtoke I.I., Husejn A.Z.B.M. Short-Term Forecasting of Electricity Consumption of Region Taking Into Account Meteorological Factors Based on Method Support Vectors and the Algorithm of Particle Swarm. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Elektromekhanika. [Russian Electromechanics], 2014, no. 3, pp. 44–47. (In Russian)
13. Srivastava N., Hinton G., Krizhevsky A., Sutskever I., Salakhutdinov R. Dropout: a simple way to prevent neural networks from overfitting. Journal of Machine Learning Research. 2014. Vol. 15, pp. 1929–1958.
14. Iofee S., Szegedy C. Batch Normalization: Accelerating deep network training by reducing internal covariate shift. Available at: <https://arxiv.org/pdf/1502.03167.pdf> (accessed 02 March 2020)
15. Zhukov A.V., Sidorov D.N. Modification of random forest based approach for streaming data with concept drift. Vestnik YuUrGU. Seriya "Matematicheskoe modelirovanie i programmirovaniye. [Bulletin of the South Ural State University. Series "Mathematical Modelling, Programming & Computer Software"], 2016, vol. 9, no. 4, pp. 86–95. doi: 10.14529/mmp160408. (In Russian)
16. Kingma D.P., Lei Ba J. ADAM: a method for stochastic optimization. Available at: <https://arxiv.org/abs/1412.6980> (accessed 12 December 2020)
17. Voevoda A.A., Romannikov D.O. Synthesis of a neural network for the implementation of the recursive leastsquares method. Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. [Scientific Bulletin of NSTU], 2018, no. 3(72), pp. 33–42. doi: 10.17212/1814-1196-2018-3-33-42. (In Russian)
18. Li L., Jamieson K., Desalvo G., Rostamizadeh A., Talwalkar A. Hyperband: A Novel Bandit-Based Approach to Hyperparameter Optimization. Available at: <https://arxiv.org/pdf/1603.06560.pdf> (accessed 18 April 2021).
19. Wang Z., Srinivasan R. A review of artificial intelligence based building energy use prediction: Contrasting the capabilities of single and ensemble prediction models. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2017. Vol. 75. Pp. 796–808.
20. Khomutov S. O., Khamitov R. N., Gritsay A. S., Serebryakov N.A. Method of learning sample forming in the problems of short-term forecasting of power consumption of the last resort supplier. Izvestiya Turskogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki [Izvestiya TulGU], 2021, Iss. 2, pp. 227–233. (In Russian)

Серебряков Н.А. Применение ансамбля глубоких нейронных сетей в задачах краткосрочного прогнозирования почасового электропотребления гарантирующего поставщика электроэнергии // Электротехнические системы и комплексы. 2021. № 2(51). С. 52–60. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-2\(51\)-52-60](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-2(51)-52-60)

Serebryakov N.A. Application of Deep Neural Network Ensemble in a Problem of Short-Term Load Forecasting Guaranteed Electricity Supplier. Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы [Electrotechnical Systems and Complexes], 2021, no. 2(51), pp. 52–60. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-2\(51\)-52-60](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-2(51)-52-60)

Леднов А.В.<sup>1</sup>, Муслимов М.Б.<sup>2</sup>, Логунова О.С.<sup>1</sup>, Худяков П.Ю.<sup>3</sup>, Кухта Ю.Б.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

<sup>2</sup> АО «Учалинский ГОК», г. Учалы, Республика Башкортостан

<sup>3</sup> Технический университет УГМК, г. Верхняя Пышма, Свердловская область

## СИСТЕМА ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО ДИСПЕТЧЕРСКОГО КОНТРОЛЯ ОТДЕЛЕНИЕМ ФЛОТАЦИИ: АКСИОМАТИЧЕСКИЙ ПОДХОД

Целью исследования является научное обоснование необходимости использования аксиоматического подхода при выборе и исследовании процессов централизованного диспетчерского контроля технологических параметров для комплекса флотационных машин. Тенденции цифровизации предприятий подразумевают переход к интеллектуальным производственным технологиям, создание систем обработки больших объемов данных, машинного обучения и искусственного интеллекта, что, соответственно, требует выбора критериев и ключевых показателей для формирования управляющих воздействий. При проведении исследований было выполнено: сопоставление реального объекта и его свойств с классическими аксиомами управления системного анализа и обосновано использование иерархической структуры взаимосвязанных технологических параметров и их применение для ситуационного управления. Для проведения исследований использованы методы классических аксиом управления системного анализа, придерживались концепции перехода от традиционной диспетчерской, ориентированной на задачи эпизодического распределения материальных или энергетических потоков, к мощным аналитическим центрам оперативного управления всей производственной деятельностью предприятия. Сформулированы критерии ситуационного управления, концепция визуализации в системе диспетчеризации, которая основывается на совместном участии в процессе людей и технических средств. При этом выполнение формализуемых операций возлагается на вычислительную технику, а принятие решений на основе неформальных методов – на специалистов-технологов и руководителей. Наличие современных методов и методик для сбора и структурирования информационных потоков, характеризующих производственные процессы и подпроцессы, позволяет соответствовать основным аксиомам системного анализа. Построение процесса диспетчеризации в системах управления производством (MES), в которых представлены многостадийность технологии и взаимозависимые факторы, требует подходов, отличных от подходов к управлению технологическим процессом. Полученные результаты позволяют утверждать, что реализация принципа Росса-Эшби значительно повышает управляемость технологическими процессами с большим количеством агрегатов и измеряемых параметров.

**Ключевые слова:** аксиомы управления, диспетчерский контроль, флотационная машина, иерархия параметров управления, ситуационное управление.

### ВВЕДЕНИЕ

Развитие систем автоматизированного управления технологическими процессами прошел этапы всеобщей механизации, общей автоматизации и находится в стадии активного развития интеллектуальных систем управления [1]. Указанная интеллектуализация заложена в 2018 году национальным проектом «Наука» и требует перехода к передовым цифровым, интеллектуальным производственным технологиям, роботизированным системам, новым материалам и способам конструирования, создание систем обработки больших объемов данных, машинного обучения и искусственного интеллекта [2].

Наиболее актуальным этот переход является для областей, которые обеспечивают металлургическую, строительную, машиностроительную отрасли и производства двойного назначения. К предприятиям таких отраслей в современной экономике относятся обогащенные производства для цветных металлов. Высокая стоимость и востребованность цветных металлов определяют новые вызовы к системам управления технологическими процессам их производства, что подтверждается положительной динамикой выработки меди в годовом исчислении и ростом цен на нее в 1,6 раза в сравнении с 2016 годом [3].

Соответственно, современные научные разработки в

области развития автоматизированных систем управления для процессов флотации охватывают исследования:

- по выявлению факторов, оказывающих влияние значений технологических параметров и режимов работы флотационной машины на ее производительность и качество получаемой продукции [3];

- определение структуры системы управления производством (MES) и интеграции в нее подсистем управления отдельными подпроцессами: подача реагентов, определение крупности частиц, скорости подачи материала и т.п. [4];

- человеческого фактора и экспертной оценки технолога в системах управления при определении ситуационного состояния процессов и принятии решения по результатам этой оценки [1-3];

- определение структуры систем диспетчерского контроля, инструментов визуализации и индикации стабильности состояния как системы в целом, так и отдельных процессов и подпроцессов [1-3].

Современные системы диспетчеризации крупных предприятий представляют собой комплексы, которые на основе централизованного сбора информации и системного анализа позволяют видеть состояние системы в целом и отдельных ее частей. Авторы исследования придерживаются точки зрения ученых Мусаева А.А., Шерстюка Ю.М. [1-3] по переходу от традиционной диспетчерской, ориентированной на задачи эпизодического распределения материальных или энергетических потоков, к мощным аналитическим центрам

оперативного управления всей производственной деятельностью предприятия. В трудах В.С. Анфилатова, А.А. Емельянова, А.А. Кукушкина [4-5] отмечено, что системы с управлением создаются для достижения конкретных целей, которые определяются в рамках других наук.

В работах [1-3] предлагается классификация систем управлением: организационные (социальные) системы управления; технические системы управления; организационно-технические (комплексные) системы управления. Согласно этой классификации система автоматизации отделения флотации обогащенного производства является организационно-технической системой. Это соответствует определению как сложных, так и больших систем. В трудах специалистов [4, 5] отмечается, что управление большими системами основывается на совместном участии в процессе людей и технических средств. При этом выполнение формализуемых операций возлагается на вычислительную технику, а принятие решений на основе неформальных методов – на специалистов-технологов и руководителей.

Наличие современных методов и методик для сбора и структурирования информационных потоков, характеризующих производственные процессы и подпроцессы, остается нереализованным в формате полного централизованного процесса диспетчеризации для производств, в которых представлены многостадийность технологии и взаимозависимые факторы.

Несмотря на наличие теоретических и практических исследований в области синтеза систем диспетчерского контроля, остаются не решенными следующие проблемы:

- пренебрежение к фундаментальным процедурам системного анализа процессов и подпроцессов при установлении взаимосвязей между отдельными факторами одного уровня и между уровнями автоматизированных систем;

- недостаточное развитие системы универсальных процедур, позволяющих выстраивать иерархическую структуру параметров технологических процессов для централизованной диспетчеризации и ситуационного управления с последующим их использованием в алгоритмах определения эффективности производства.

Учитывая результаты современных теоретических и практических разработок, авторы определили цель исследования: научное обоснование применения аксиоматического подхода системного анализа для построения информационной системы управления флотацией и детализация решений при построении алгоритмов, а также синтез ключевых показателей эффективности в новой системе централизованного диспетчерского контроля отделения флотации на примере ПАО «Учалинский горно-обогатительный комбинат».

#### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Перед применением классических аксиом управления системного анализа [4-8] необходимо определить объект управления. Объектом управления в рамках исследования выбрано отделение флотации медной и медно-цинковой руды. Объект является сложно-структурированным, так как в составе функционирует более 80 флотационных машин (рис. 1).



Рис. 1. Цех флотации медной и медно-цинковой руды Учалинского ГОКа

Для сбора данных и управления комплексом флотационных машин используется локальная сеть предприятия *Ethernet*, которая включает автоматизированные рабочие места контроля параметров для передачи их значений на сервер для централизованной обработки. Рассмотрим элементы существующей системы автоматизации в соответствии с классическими аксиомами управления системного анализа.

*Аксиома 1. Наличие наблюдаемости объекта управления:* объект считается наблюдаемым в некотором заданном состоянии, если по результатам измерения выходных переменных  $y(t)$  при известных значениях входных переменных  $x(t)$  может быть получена оценка  $z^0(t)$  любой из переменных состояния  $z(t)$ .

*Аксиома 2. Наличие управляемости объектом наблюдения:* способность объекта управления переходить в пространстве состояний из текущего состояния в требуемое под воздействиями управляющей системы.

Задачи наблюдения и управляемости в условиях объекта управления решаются достаточно эффективно в рамках функционирования локальных подсистем отделения флотации при наличии и функционировании:

- системы управления дозированием реагентов для каждой флотационной машины и системы в целом;
- системы контроля и управления закачкой реагентов в технологические чаны для флотационных машин;
- системы контроля уровня в известковых чанах и резервуарах промышленной воды;
- системы измерения количества (переработки) руды и управления производительностью рудных конвейеров;
- системы аналитического контроля пульпы на содержание химических элементов;
- системы контроля температуры, водородного показателя (рН), щелочности, плотности пульпы;
- автоматической системы стабилизации уровня пульпы и расхода воздуха для каждой флотационной машины.

Указанный минимальный набор локальных подсистем должен расширяться по мере появления новых технических и цифровых технологий, способствующих дополнению базы сформированных данных и знаний с использованием новых видов информации.

*Аксиома 3. Наличие цели управления объектом наблюдения:* необходимый результат деятельности объекта управления, который характеризуется каче-

ственными и количественными характеристиками и обоснован возможностями объекта управления и перспективными потребностями результата деятельности.

Цель управления флотационным отделением – обеспечение выпуска товарного медного и медно-цинкового концентрата, соответствующего комплексу технологических регламентов на основании решения эксперта-технолога по информации, полученной с помощью технических средств автоматического и автоматизированного контроля.

*Аксиома 4. Наличие свободы выбора управляющих воздействий из множества альтернативных решений:* наличие множества альтернатив для организации управления и обеспечение возможности выбора управляющих воздействий из этого множества.

В процессе обследования структуры флотационного отделения и технологии флотации медного и медно-цинкового концентрата выявлено, что процесс управления флотацией является многоуровневым. Для его описания и описания ресурсоемких потоков используется более 50 стадий (флотация, доизмельчение, перемешивание и т.д.) с частичной рекурсией. В настоящее время появились возможности использования альтернативной и косвенной информации, с помощью которой возможно проведение прогностического дополнительного моделирования показателей качества готовой продукции [9-14].

Соблюдение аксиомы 4 требует определение набора ключевых показателей, которые могут быть использованы в процессе принятия решений и формирования множества траекторий выбора альтернатив.

*Аксиома 5. Наличие критерия эффективности управления объектом наблюдения:* формирование множества показателей и требований к ним, которые позволяют определить направление ведения процесса для эффективного достижения цели.

В соответствии с этой аксиомой для управления процессами во флотационном отделении при извлечении медного и медно-цинкового концентрата предлагается выделить ключевой показатель эффективности – максимальное извлечение полезного компонента в пенном продукте на каждом этапе флотации. Эффективность управления в соответствии с критерием достигается на основе анализа и принятия решений при интеграции данных из системы контроля качества продукции.

*Аксиома 6. Наличие ресурсов, обеспечивающих реализацию принятых решений.* Обеспечение эффективного управления требует наличия ресурсов: информационного, технического, материального, энергетического, финансового и др. Среди указанных ресурсов консолидирующим является информационный, который главным образом базируется на множестве иерархически упорядоченных показателей, образующих структуру иерархических кортежей.

В настоящее время в маркетинговых материалах декларируются высокие возможности автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП), которые трудно осуществимы для действующего производства. Например, разработчики АСУ ТП декларируют элементы систем управления, повышающие информативность и эффективность управления [15]:

– контроль и мониторинг параметров работы технологических процессов и состояния оборудования в объеме, достаточном для качественного регулирования технологического процесса обогащения и принятия обоснованных решений оперативным персоналом;

– визуализацию оперативных параметров технологических процессов;

– периодическое сохранение как контролируемых, так и управляющих параметров технологического процесса, а также действий оперативного персонала по управлению технологическим процессом в технологической базе данных;

– формирование и выдачу оперативных и архивных данных о состоянии и изменении технологических процессов, состоянии технических средств системы управления и действиях обслуживающего персонала;

– обеспечение возможности ввода в систему производственных данных инженерно-техническим персоналом фабрики со своих рабочих мест;

– производственную аналитику, в том числе анализ зависимости между управляющими и возмущающими факторами и параметрами технологического процесса;

– диагностику предаварийных и аварийных ситуаций как на основании информации, получаемой непосредственно с объекта управления, так и на основании косвенно вычисляемых параметров или логически определяемых ситуаций.

Эти же тезисы подтверждаются декларациями Индустрия 4.0 [16], в частности:

– придание всем элементам функций искусственного интеллекта, превращение каждого элемента системы в потребителя и источник информации;

– активное участие «умных» элементов в своем собственном конструировании, создании и ремонте;

– автоматизация услуг путем массового применения искусственного интеллекта – постепенное превращение всей индустрии услуг в отрасль, управляемую взаимодействием клиентского и сервисного искусственного интеллекта с активным использованием «больших данных» как источника информации для предсказания и планирования;

– быстрое сокращение участия человека во взаимодействиях между элементами;

– повсеместное создание институтов и инфраструктуры дополненной реальности и протоколов ее общения с «умными» элементами и девайсами.

Малая вероятность использования в достаточном объеме вышеперечисленных тезисов на сегодняшний день связана с отсутствием необходимых промышленных самокалибрующихся и самоочищающихся датчиков, исполнительных механизмов, а также игнорирование ключевых, на взгляд авторов, третьей и пятой аксиомы управления.

В производстве извлечения медного и медно-цинкового концентрата, несмотря на большое количество измеряемых параметров (более 500) и непрерывно меняющийся процесс, существуют проблемы, связанные с дискретностью поступления информации. Например, измерение и поступление информации по уровню pH производится один раз в два часа, химический состав пульпы – один раз в 20 минут.

В соответствии с [4, 5] при управлении процессом извлечения медного и медно-цинкового концентрата в производственных условиях возникают отклонения состояния управляемого объекта относительно заданного. Это определяется тем, что управляющая система в общем случае подвержена внешним воздействиям и не обладает полной информацией о состоянии среды и объекта управления. Это приводит к тому, что управляющие воздействия не полностью соответствуют требуемым воздействиям. Качество управления определяется количеством взаимной информации в управляющих воздействиях относительно состояний управляемого объекта. Это соответствует фундаментальному принципу кибернетики, известному как принцип необходимого разнообразия (принцип У. Расса Эшби), формулируемый в виде: «Разнообразие управляющей системы должно быть не меньше разнообразия объекта управления» [4, 5], в котором отмечается, что для повышения качества управления необходимо:

- уменьшать разнообразие состояний управляемого объекта;
- увеличивать разнообразие управляющих воздействий, приближая его к разнообразию состояний управляемого объекта;
- уменьшать неоднозначность управляющих воздействий относительно состояний объекта управления.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Авторами работы при построении информационного обеспечения для процесса извлечения медного и медно-цинкового концентрата при флотации предлагается реализовать принцип У. Расса Эшби в направлении: «Уменьшать неоднозначность управляющих воздействий относительно состояний объекта управления за счет построения системы диспетчеризации по иерархической схеме «участок-агрегат-параметр» с применением теории ситуационного управления».

Существующая в настоящее время практика построения диспетчерских систем сводится к отображению структуры всего консолидированного информационного массива и выдаче отчетов в виде матрицы, в которой количество столбцов измеряется десятками и строк – сотнями. Принятие управленческих решений в этом случае, как минимум, затруднено и требует изменения технологического процесса принятия решений, объединения в единое целое опыт эксперта и возможности искусственного интеллекта, для которого должна быть подготовлена информационная структура и траектории принятия решений на основе научно обоснованных альтернатив.

Принято считать, что метод ситуационного управления относится к наиболее перспективным методам, позволяющим для широкого класса систем решать задачу поиска при адаптации алгоритмов работы системы управления. В основе ситуационного управления лежит гипотеза: вся необходимая информация об управлении объектом должна быть получена из непосредственного прямого наблюдения за его работой.

С использованием аксиом теории управления сформулирована основная задача, которую необходимо решить в процессе построения модели управления: если множество решений  $\{P(t)\}$  имеет мощность  $I$ , то

задача управления может быть решена при наличии такого разбиения множества ситуаций  $\{S(t)\}$  на  $I$  классов, при котором все ситуации  $S(t)$  окажутся отнесенными к какому-нибудь определенному классу  $K_i$ , которому однозначно соответствует некоторое решение  $P_i$ , обладающее свойством полезности с точки зрения целей управления объектом. Суть ситуационного управления состоит в построении метода, позволяющего на основании описания ситуаций  $S(t)$  на естественном языке построить систему обобщенных описаний классов  $K_i$ .

#### РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Согласно аксиомам 1-3 целью управления флотационным отделением является обеспечение выпуска товарного медного и медно-цинкового концентрата, соответствующего комплексу технологических регламентов на основании решения эксперта-технолога по информации, полученной с помощью технических средств автоматического и автоматизированного контроля.

Для указанной цели определим ситуацию для управления: критерий-извлечение полезного компонента в выбранном отделении или для флотационной машины (ОУ по аксиоме 1), для которого определяется химический состав до и после флотационной машины, и требует интеграции с системой управления качеством получаемого продукта. Наблюдение и применение критерия эффективности проводилось на флотомашине №56 Учалинского ГОКа.

Информация о химическом составе (аксиомы 1-2) поступала из системы аналитического контроля пульпы на содержание элементов (АСАК): «Питание» (вход флотомшины) и «Хвост» (выход флотомшины). Данные в АСАК поступают каждые 20 минут в разное время из каждой точки измерения. В данной опытной работе учитывалось транспортное запаздывание, сопоставимое с временем флотации, то есть время поступления данных на входе машины синхронизируется с временем поступления данных о хвосте машины.

На **рис. 2** показаны экраны рабочих станций «как есть», и данные выглядят нормальными. После применения интеграционного решения (**рис. 3**) четко видна ситуация отсутствия съема полезного компонента, что позволяет оперативно принять управленческие решения.

При выполнении наблюдений зафиксирована нештатная ситуация – отсутствие извлечения (произошло из-за механических проблем с оборудованием), что подтверждает правильность выбранного критерия и исполнения аксиомы 3.

Выполнение требований аксиом 4-6, с учетом принципа Расса-Эшби предлагается решить созданием конструктора интерфейса системы диспетчеризации из типовых элементов для:

- отображения любого технологического агрегата с узнаваемыми очертаниями, причем возможно отображение нескольких последовательных агрегатов;
- отображения технологических параметров, получаемых из общего информационного пространства из SCADA-систем.

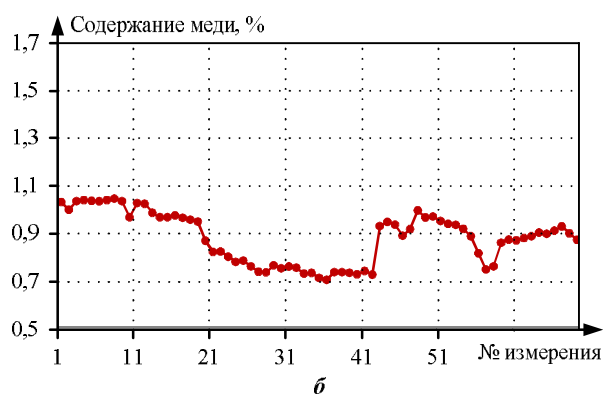


Рис. 2 Показания АСАК на входе (а) и выходе (б) флотомашины

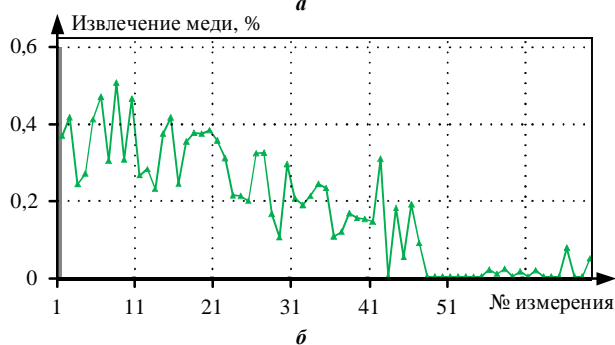
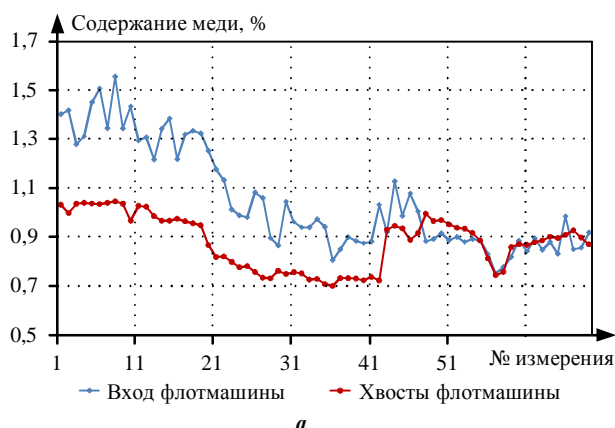


Рис. 3. Ситуация «извлечение полезного компонента»: а – интеграция данных по входу и выходу флотомашины; б – критерий – «извлечение полезного компонента»

Участок с агрегатами должен быть узнаваем по внешним параметрам и состоять из тиражируемых примитивов, что значительно упрощает создание программного обеспечения, а технологический агрегат идентифицируется согласно его технологической схеме (на примере флотомашины № 56) (рис. 4).

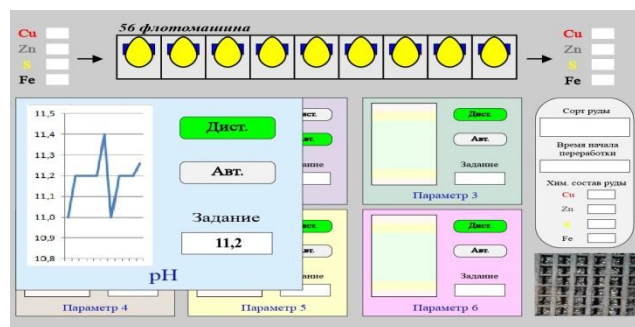


Рис. 4. Эскиз окна системы диспетчеризации

Важным элементом визуализации является отображение общецеховой информации, которая показывает сорт перерабатываемой руды и исходный химический состав подаваемой на переработку товарной руды. Данная оперативная информация позволяет использовать опыт технологов и операторов для обеспечения наилучших параметров технологического процесса. Основное поле экранной формы занимают окна с отображением контролируемых параметров флотомашины. В каждой группе агрегатов количество окон может быть разным, но наиболее важным отображением в каждом окне является:

- график текущего значения параметра;
- вид управления: автоматическое или дистанционное;
- заданное значение технологического параметра.

Предлагается выполнить окна с помощью *HTML* и стилей *CSS* с возможностью масштабирования, сворачивания окон с применением адаптивной верстки.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты изучения теоретических и практических разработок в области построения систем управления флотацией при извлечении медного и медно-цинкового концентрата показали отсутствие фундаментальных процедур системного анализа процессов и подпроцессов при установлении взаимосвязей между отдельными факторами одного уровня и между уровнями автоматизированных систем, а также недостаточное развитие системы универсальных процедур, позволяющих выстраивать иерархическую структуру параметров технологических процессов для централизованной диспетчеризации и ситуационного управления с последующим их использованием в алгоритмах определения эффективности производства.

Рассмотрены аксиомы теории управления в системном анализе, выполнение которых необходимо при построении эффективной системы управления объектом. Для отделения флотации по извлечению медного и медно-цинкового концентрата в условиях Учалинского горно-обогатительного комбината выполнено сопоставление аксиом и элементов системы управления, построенной в производственных условиях.

Теоретические исследования системы управления объектом позволили представить задачу в новой формулировке, использующей принцип У. Росса Эшби в направлении: «Уменьшать неоднозначность управляющих воздействий относительно состояний объекта управления за счет построения системы диспетчеризации по иерархической схеме «участок-агрегат-параметр» с применением теории ситуационного управления».

Экспериментальные исследования системы управления в отделении флотации по извлечению медного и медно-цинкового концентрата показали, что в настоящее время в полной мере реализованы и аксиомы 1, 2, 3, 6, которые составляют основу для реализации аксиомы 4 по наличию свободы выбора управляющих воздействий из множества альтернативных решений и 5 по наличию критерия эффективности управления объемом наблюдения и последующему его достижению.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Автоматизация научных исследований нарушения сплошности плоской поверхности: конструктивное решение программно-аппаратного комплекса / О.С. Логунова, С.М. Андреев, Е.А. Гарбар, А.В. Маркевич, А.А. Николаев // *Электротехнические системы и комплексы*. 2020. № 1. С. 54-59. doi: 10.18503/2311-8318-2020-1(46)-54-59.
2. Официальный сайт Национальный проект «Наука»: паспорт от 24.12.2018 № 16. 2018. URL: <http://static.government.ru/media/files/vCAoi8zEXRVSuy2Yk7D8hvQbpbUSwO8y.pdf>. (дата обращения 27.04.2021)
3. Официальный сайт TAdviser. Государство. Бизнес Ит. URL: [https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Добыча\\_меди](https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Добыча_меди) (дата обращения 27.04.2021).
4. Официальный сайт АСУТП в России. URL: <https://automation-system.ru/main/69-about-scada.html> (дата обращения: 27.04.2020).
5. Анфилатов В.С. Системный анализ в управлении. М.: Финансы и статистика, 2002. 368 с.
6. Козлецов А.П., Решетников И.С. Применение стандарта ISA-95 для интеграции информационных систем на производственном предприятии // *Автоматизация в промышленности*. 2010. №12. С. 3-7.
7. Официальный сайт MESA International. URL: <http://www.mesa.org/en/modelstrategicinitiatives/>
8. Анфилатов В.С., Емельянов А.А., Кукушкин А.А. Системный анализ в управлении: учебное пособие. М.: Финансы и статистика, 2009. 368 с.
9. Официальный сайт Wonderware MES. URL: [http://archestra.info/index.php/Wonderware\\_MES](http://archestra.info/index.php/Wonderware_MES) (дата обращения 27.04.2021).
10. Милов А.В., Тимохин В.Н., Черноус Г.А. Экономическая кибернетика: конспект лекций. Донецк: Изд-во Донецкого национального университета, 2004. 105 с.
11. Соловьев Н.А., Чернопрудова Е.Н., Лесовой Д.А. Основы теории принятия решений для программистов. Оренбург: Изд-во Оренбургского государственного университета, 2012. 187 с.
12. Раков В.И. Системный анализ (начальные понятия): учебное пособие. М.: Академия Естествознания, 2012. 234 с.
13. Логунова О.С., Максимов М.А. The complex of image processing algorithms for granulometry of charging materials // *Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах*. 2015. № 1(6). С. 38-42.
14. Сегментация изображения пенного продукта флотации: обоснование замены пузырька их бликами / О.С. Логунова, А.В. Леднов, Р.Э. Шилов, М.Б. Муслимов, Ф.Р. Байбулатов // *Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах*. 2018. Т. 6. № 1. С. 12-19.
15. Курчуков А.М., Кордаков В.Н. Автоматизированная система управления процессом флотации медно-никелевых руд // *Записки Горного института*. 2011. Т. 189. С. 295-298.
16. Тарасов И.В. Индустрия 4.0: понятие, концепции, тенденции развития // *Стратегии бизнеса*. 2018. № 6(50). С. 57-63.

Поступила в редакцию 24 марта 2021 г.

#### INFORMATION IN ENGLISH

#### CENTRALIZED CONTROL SYSTEM OF FLOTATION DEPARTMENT: AXIOMATIC APPROACH

Anatoly V. Lednov

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Department of Informatics and Computer Engineering, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: [alednov@mail.ru](mailto:alednov@mail.ru). ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7614-0534>.

Marat B. Muslimov

Chief metrologist, Automation and metrology department, JSC "Uchalinsky Gok", Uchaly, Russia. E-mail: [zla\\_muslimov\\_mb@ugok.ru](mailto:zla_muslimov_mb@ugok.ru).

Oksana V. Logunova

D. Sc. (Engineering), Professor, Head of Department, Department of Informatics and Computer Engineering, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk. Russia. E-mail: [logunova66@mail.ru](mailto:logunova66@mail.ru). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7006-8639>.

Pavel Yu. Khudyakov

Ph.D. (Physics and Mathematics), Head of Department, Department of Mechanics and Automation of Technological Processes and Production, UMMC Technical University, Verkhnyaya Pyshma, Russia. E-mail: [p.hudyakov@tu-ugmk.com](mailto:p.hudyakov@tu-ugmk.com). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9609-7665>.

Yuliya B. Kukhta

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Department of Informatics and Computer Engineering, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: [perfectumyuka@mail.ru](mailto:perfectumyuka@mail.ru). ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9128-3891>.

The aim of the study is to scientifically substantiate the need to use the axiomatic approach when choosing and studying the processes of centralized dispatching control of technological parameters for a complex of flotation machines. The digitalization trends of enterprises imply the transition to intelligent production technologies, the creation of systems for processing large amounts of data, machine learning and artificial intelligence, which, accordingly, requires the selection of criteria and key indicators for the formation of control actions. During the research, the authors carried out a comparison of the real object and its properties with the classical axioms of system analysis control and substantiated the use of a hierarchical structure of interrelated technological parameters and their application for situational management. Methods of classical control axioms of system analysis were used for the research. The authors of the study adhere to the concept of transition from a traditional control room focused on the tasks of episodic distribution of material or energy flows to powerful analytical centers for operational management of all production activities of an enterprise. The authors formulated the criteria for situational management, the concept of visualization in the dispatching system, which is based on the joint participation of people and technical means in the process. At the same time, the implementation of formalized operations is entrusted to computer technology and the decision-making based on informal methods to technicians and managers. The availability of modern methods and techniques for collecting and structuring information flows that characterize production processes and sub-processes allows us to comply with the basic axioms of system analysis. The construction of a dispatching process in production management systems (MES), in which the multistage technology and interdependent factors are presented, requires approaches that are different from approaches to process control. The results obtained allow us to assert that the implementation of the Ross-Ashby principle significantly increases the controllability of technological processes with a large number of units and measured parameters.

**Keywords:** control axioms, supervisory control, flotation machine, hierarchy of control parameters, situational control.

#### REFERENCES

- Logunova O.S., Andreev S.M., Garbar E.A., Markevich A.V., Nikolaev A.A. Automation of scientific research of discontinuities of a flat surface: a design solution of a software and hardware complex. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical systems and complexes], 2020, no. 1, pp. 54-59. doi: 10.18503/2311-8318-2020-1(46)-54-59. (In Russian)
- Official website of the National Project "Science": passport dated 12.24.2018 No. 16. 2018. Available at: <http://static.government.ru/media/files/vCAoi8zEXRVSuy2Yk7D8hvQbpbUSwO8y.pdf> (accessed 27 April 2021) (In Russian)
- Official website of TAdviser. State. Business It. Available at: [https://www.tadviser.ru/index.php/Article: Copper\\_ extraction](https://www.tadviser.ru/index.php/Article: Copper_ extraction) (accessed 27 April 2021). (In Russian)
- Official site of the process control system in Russia. Available at: <https://automation-system.ru/main/69-about-scada.html> (accessed 27 April 2020). (In Russian)
- Anfilatov V.S. *Sistemnyi analiz v upravlenii* [System analysis in management]. Moscow, Finance and Statistics Publ., 2002. 368 p. (In Russian)
- Kozletsov A.P., Reshetnikov I.S. Application of the ISA-95 standard for the integration of information systems at a manufacturing enterprise. *Avtomatizatsiya v promyshlennosti* [Automation in industry], 2010, no. 12, pp. 3-7. (In Russian)
- Official website of MESA international. Available at: <http://www.mesa.org/en/modelstrategi-cinities/MESAModel.asp> (accessed 27 April 2021). (In Russian)
- Anfilatov V.S., Emelyanov A.A., Kukushkin A.A. *Sistemnyi analiz v upravlenii* [System analysis in management]. Moscow, Finance and Statistics Publ., 2009. 368 p. (In Russian)
- Wonderware MES Official Site. Available at: [http://archestra.info/index.php/Wonderware\\_MES](http://archestra.info/index.php/Wonderware_MES) (accessed 27 April 2021). (In Russian)
- Milov A.V., Timokhin V.N., Chernous G.A. *Ekonomicheskaya kibernetika* [Economic cybernetics]. Donetsk, Donetsk National University Publ. House, 2004. 105 p. (In Russian)
- Soloviev N.A., Chernoprudova E.N., Lesovoy D.A. *Osnovy teorii prinyatiya resheniy dlya programmistov* [Fundamentals of decision-making theory for programmers]. Orenburg, Publ. house of the Orenburg State University, 2012. 187 p. (In Russian)
- Rakov V.I. *Sistemnyi analiz (nachalnye ponyatiya)* [System analysis (initial concepts)]. Moscow, Academy of Natural History Publ., 2012. 234 p. (In Russian)
- Logunova O.S., Maksimov M.A. The complex of image processing algorithms for granulometry of charging materials. *Matematicheskoe i programnoye obespechenie sistem v promyshlennoy i sotsialnoy sferakh* [Mathematical and software systems in industrial and social spheres], 2015, no. 1(6), pp. 38-42. (In Russian)
- Logunova O.S., Lednov A.V., Shilov R.E., Muslimov M.B., Baybulatov F.R. Segmentation of the image of the froth flotation product: justification of replacing the bubble with their glare. *Matematicheskoe i programnoye obespechenie sistem v promyshlennoy i sotsialnoy sferakh* [Mathematical and software systems in industrial and social spheres], 2018, vol. 6, no. 1, pp. 12-19. (In Russian)
- Kurchukov A.M., Kordakov V.N. Automated control system for the flotation process of copper-nickel ores. *Zapiski Gornogo instituta* [Journal of Mining Institute], 2011, vol. 189, pp. 295-298. (In Russian)
- Tarasov I.V. Industry 4.0: concept, concepts, development trends. *Strategii biznesa* [Business strategies], 2018, no. 6(50), pp. 57-63. (In Russian)

Система централизованного диспетчерского контроля отделением флотации: аксиоматический подход / А.В. Леднов, М.Б. Муслимов, О.С. Логунова, П.Ю. Худяков, Ю.Б. Кухта // *Электротехнические системы и комплексы*. 2021. № 2(51). С. 61-67. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-2\(51\)-61-67](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-2(51)-61-67)

Lednov A.V., Muslimov M.B., Logunova O.V., Khudyakov P.Yu., Kukhta Yu.B. Centralized Control System of Flotation Department: Axiomatic Approach. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2021, no. 2(51), pp. 61-67. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-2\(51\)-61-67](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-2(51)-61-67)

## ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ СОЛНЕЧНО-ВЕТРЯНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ С НЕЙРО-НЕЧЕТКОЙ СИСТЕМОЙ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ

В настоящее время в связи с ухудшающейся экологической обстановкой увеличение доли возобновляемых источников энергии является основным направлением развития электроэнергетических отраслей многих стран. Важным этапом создания новых энергетических установок является имитационное моделирование, позволяющее проанализировать работу аппаратуры в различных условиях, включая нарушение пределов нормальной эксплуатации, уменьшить количество возможных ошибок проектирования. В данной статье описывается разработка и применение имитационной модели системы выработки электрической энергии на основе возобновляемых источников с системой оценки и прогнозирования технического состояния оборудования. Имитационная модель реализована в среде *Matlab Simulink*. Получены осциллограммы токов и напряжений при работе модели с мощностью электрической нагрузки 10 кВА для преобразователей ветряной и солнечной энергии. Разработана система мониторинга технического состояния оборудования на основе системы нечеткого ввода Мамдани-Заде, формирующая оценку технического состояния элементов энергоустановки на основании диагностических параметров в соответствии с базой экспертных правил. Полученные оценки технического состояния оборудования обрабатываются при помощи адаптивной нейро-нечеткой системы вывода (*ANFIS*), в результате работы которой формируется прогноз технического состояния оборудования на заданном временном отрезке. Построенная модель может быть использована при проектировании объектов возобновляемой энергетики, а также разработке и испытании алгоритмов систем управления и мониторинга. Система оценки и прогнозирования состояния оборудования с применением аппарата нечеткой логики может использоваться для поддержки принятия решений оператором электроэнергетической установки при определении необходимости ремонта и замены оборудования.

**Ключевые слова:** возобновляемая энергетика, имитационная модель, нечеткая логика, диагностика технического состояния, система мониторинга.

### ВВЕДЕНИЕ

Для генерирующего комплекса на основе возобновляемых источников энергии важными свойствами являются надежность работы и бесперебойность электроснабжения потребителей. Основным же способом поддержания высокой работоспособности любой технической системы является своевременное обнаружение и замена изношенных и устаревших ее элементов. В настоящее время общепринятой практикой является проведение планового технического обслуживания, в ходе которого производится оценка работоспособности элементов системы и принимается решение о необходимости их замены и ремонта.

Однако зачастую выход оборудования из строя происходит раньше запланированного технического обслуживания, что приводит к значительным негативным последствиям. Основой для определения периодичности планового технического обслуживания служат данные о надежности элементов (интенсивность отказов, среднее время безотказной работы), предоставляемых их производителем по результатам испытаний определенного количества образцов. Однако из-за того, что условия эксплуатации и события, происходящие при функционировании каждого элемента, являются уникальными, каждый элемент может выйти из строя раньше или позже среднего срока, объявленного производителем.

Для более точного контроля работоспособности элемента системы, а также прогнозирования момента

выхода из строя необходимо осуществлять непрерывный мониторинг технологических и физических параметров данного элемента.

Исследования, ведущиеся в данном направлении, имеют большую важность и являются актуальными, поскольку имеют своей целью предотвращение внезапных отказов оборудования, зачастую приводящих к материальным потерям, а также создающих опасность жизни и здоровью людей.

Разработки в этой области ведут научно-производственные компании, такие как *Semiotic Labs*, *Dynapar*, *CMS Condition Monitoring Systems*, *Brüel & Kjær Vibro*, *Ifm efector Canada*. В научных работах предлагаются различные методы и подходы к построению систем мониторинга (метод реконструкционного моделирования [1], метод вычисления индекса состояния оборудования [2], методы спектрального анализа [3]), а также оценка работоспособности оборудования разных видов (электродвигатели [4], турбогенератор и силовой трансформатор [5], силовой трансформатор [6], управляемый выпрямитель [7]). Однако в настоящее время вопрос создания систем мониторинга технического состояния не имеет однозначного решения, что связано с различиями объектов диагностики, наличием преимуществ и недостатков у разных видов систем мониторинга, а также с постоянным прогрессом вычислительной техники и средств обработки данных, требующих пересмотра и совершенствования существующих решений.

Целью данной работы является построение имитационной модели комбинированной солнечно-ветровой

электростанции с системой мониторинга и прогнозирования технического состояния оборудования: ветрогенератора, фотоэлектрических преобразователей, инвертора напряжения, преобразователя частоты. Под техническим состоянием в данной работе подразумевается состояние объекта (вышеперечисленных устройств), характеризующее совокупностью установленных в документации параметров, описывающих его способность выполнять требуемые функции в рассматриваемых условиях. В данной работе применяются системы оценки технического состояния с использованием аппарата нечеткой логики. Новая методика работы системы оценки, предлагаемая авторами, заключается в следующем. Для каждого устройства, техническое состояние которого подлежит оценке, формируется перечень диагностических параметров. На основе величин диагностических параметров при помощи системы нечеткого вывода Мамдани-Заде по перечню логических правил, определенному экспертами в области эксплуатации и ремонта соответствующих устройств, формируется оценка качества функционирования оборудования в каждый конкретный момент времени. Интегрирование данной величины позволяет получить оценку технического состояния оборудования с учетом происшедших нарушений условий нормальной эксплуатации, которые ухудшают техническое состояние оборудования. Под оценкой технического состояния в данной работе подразумевается условное количественное выражение технического состояния устройства; при этом максимальное значение данной оценки обозначает полностью работоспособное техническое состояние устройства без признаков износа и физического старения, а минимальное значение обозначает техническое состояние неисправного устройства, не подлежащего восстановлению. На основе полученных оценок технического состояния с применением адаптивной нейро-нечеткой системы вывода формируется прогноз технического состояния оборудования.

#### МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве основного метода исследования в рамках данной работы было использовано имитационное моделирование в среде *Matlab Simulink* с применением расширения *Fuzzy Logic Toolbox*. На **рис. 1** представлена имитационная модель в среде *Matlab Simulink*.

Имитационная модель включает в себя следующие элементы: преобразователь солнечной энергии, преобразователь энергии ветра, трехфазная электрическая нагрузка активно-индуктивного характера, системы мониторинга технического состояния устройств. Объединение каналов преобразования энергии производится при помощи шины переменного тока.

Преобразователь солнечной энергии состоит из блока фотоэлектрических модулей *PV Array* с номинальной электрической мощностью 10 кВА и трехфазного мостового инвертора напряжения. Температура фотоэлектрических преобразователей и мощность солнечного излучения задаются пользователем путем из-

менения значений входных сигналов в подсистеме *PV Array*.

Преобразователь энергии ветра включает в себя блок ветровой турбины *Simple Turbine* с номинальной электрической мощностью 10 кВА, синхронный генератор с постоянными магнитами и преобразователь частоты со звеном постоянного тока, компенсирующий колебания частоты выходного напряжения при изменении скорости ветра. Пользователь может задавать скорость ветра, изменяя значение сигнала в подсистеме *Simple Turbine*.

Задача системы диагностики заключается в формировании оценки технического состояния устройств, входящих в состав электроэнергетического комплекса. Данная оценка позволяет персоналу комплекса иметь информацию о работоспособности устройств в любой момент времени, а также прогнозировать возникновение аварийных ситуаций. Оценка формируется на основе информации о параметрах, влияющих на работу устройств и характеризующих качество их работы. В настоящее время нет технической возможности получения в реальном времени всей диагностической информации, необходимой для однозначной оценки технического состояния устройства, такой как степень старения материалов, появление микроскопических деформаций и дефектов элементов. Кроме того, изменение нагрузок и условий эксплуатации зачастую носит стохастический характер. Из-за данных обстоятельств оценка и прогноз технического состояния осуществляется в условиях несовершенства и неполноты исходной информации. Однако накопленные знания и опыт многих экспертов по эксплуатации и ремонту оборудования позволяют им принимать верные управленческие решения при оценке технического состояния оборудования и превентивной замене устаревшего оборудования даже на основе неполных и несовершенных исходных данных.

Для формализации опыта экспертного сообщества и построения системы, оказывающей поддержку оператору при принятии решений, эффективным методом является применение методов нечеткой логики. Такой подход позволяет увеличить гибкость системы оценки при помощи использования наборов правил, а также нелинейных функций принадлежности элементов, позволяющих системе формировать корректный результат при зашумленности и неполноте входных данных. Перечень логических правил, по которым формируется оценка, должен быть составлен экспертами по эксплуатации и ремонту соответствующих электротехнических устройств. Более подробно вопрос формирования перечней правил для оценки состояния различных типов оборудования рассматривался в работах [8-10]. В рамках данной работы используется тестовый набор правил, который должен быть уточнен при использовании с конкретными образцами оборудования.

В качестве примера рассмотрим структуру системы оценки качества работы синхронного генератора. Система в среде *Fuzzy Logic Toolbox* представлена на **рис. 2**.

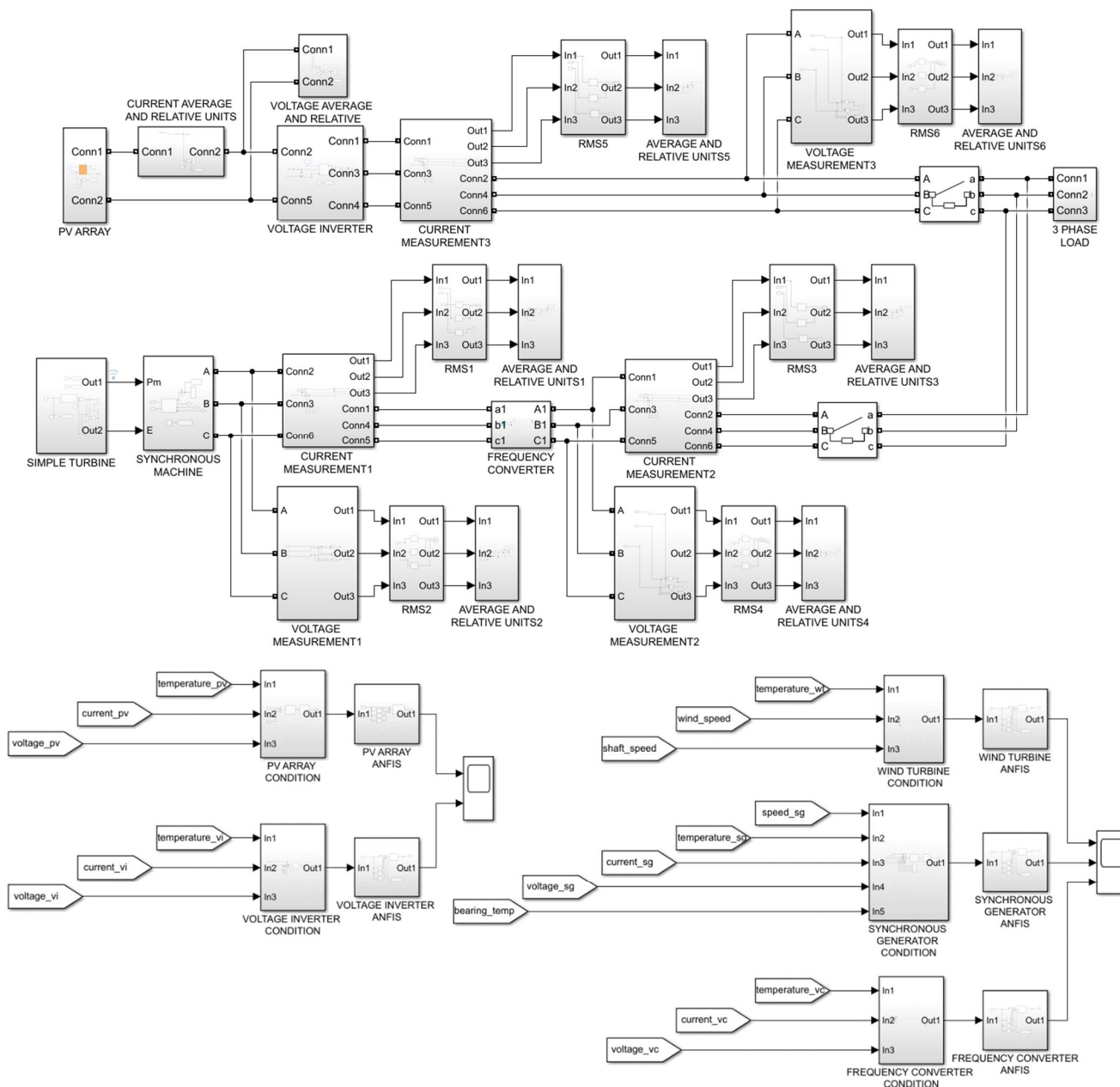


Рис. 1. Имитационная модель комбинированной системы выработки электроэнергии в среде Matlab Simulink

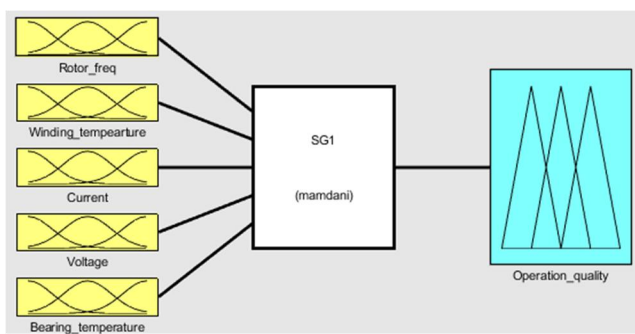


Рис. 2. Система оценки качества работы синхронного генератора в среде Fuzzy Logic Toolbox

В перечень диагностических параметров, на основе которых формируется оценка качества работы, входят частота вращения вала генератора, температура меди статора генератора, среднее арифметическое действующих значений токов фаз статора, среднее арифметическое действующих значений линейных напряжений

статора, температура металла подшипников. Данный перечень не является исчерпывающим и может быть дополнен или изменен в соответствии со спецификой конкретного объекта диагностики. Используемые величины приводятся к относительным единицам в соответствии с номинальными параметрами синхронного генератора. Для входной переменной «Частота вращения вала» используется три термина: «Низкий», «Нормальный» и «Высокий». Для входной переменной «Температура меди» используются два термина: «Нормальный» и «Высокий». Для входной переменной «Среднее значение тока» используются три термина: «Низкий», «Нормальный» и «Высокий». Для входной переменной «Среднее значение напряжения» используются три термина: «Низкий», «Нормальный» и «Высокий». Для входной переменной «Температура подшипников» используются три термина: «Низкий», «Нормальный» и «Высокий». Выходной переменной системы нечеткого вывода является «Качество работы

синхронного генератора», для которого используются три термина «Низкое», «Нормальное» и «Высокое». Качество работы оценивается как высокое при нахождении всех диагностических параметров в пределах нормы. При отклонении каких-либо параметров от нормы качество работы оценивается как нормальное или низкое в соответствии с сформированным тестовым перечнем из восьми правил следующего вида:

1. If (Rotor\_freq is Normal) and (Winding\_tempearture is Normal) and (Current is Normal) and (Voltage is Normal) and (Bearing\_temperature is Normal) then (Operation\_quality is High).

2. If (Rotor\_freq is High) and (Winding\_tempearture is Normal) and (Current is Normal) and (Voltage is Normal) then (Operation\_quality is Normal).

3. If (Rotor\_freq is Normal) and (Winding\_tempearture is High) and (Current is Normal) and (Voltage is Normal) then (Operation\_quality is Normal).

4. If (Rotor\_freq is Normal) and (Winding\_tempearture is Normal) and (Current is High) and (Voltage is Normal) then (Operation\_quality is Low).

5. If (Rotor\_freq is Normal) and (Winding\_tempearture is High) and (Current is High) and (Voltage is Normal) then (Operation\_quality is Low).

6. If (Rotor\_freq is Normal) and (Winding\_tempearture is Normal) and (Current is High) and (Voltage is Low) then (Operation\_quality is Low).

7. If (Rotor\_freq is Normal) and (Voltage is Low) then (Operation\_quality is Low).

8. If (Rotor\_freq is High) and (Winding\_tempearture is Normal) and (Current is Normal) and (Voltage is Normal) and (Bearing\_temperature is High) then (Operation\_quality is Low).

Оценка качества работы формируется по шкале от нуля до ста процентов. Системы оценки качества работы фотоэлектрических преобразователей, ветровой турбины, инвертора напряжения, преобразователя частоты строятся по такому же принципу и описаны в [11-13].

Изменяющиеся условия работы оказывают непосредственное влияние на техническое состояние аппаратуры. Для учета необратимого изменения технического состояния устройства выходная переменная системы нечеткого вывода («Оценка качества работы») вычитается из единицы, полученная величина интегрируется и вычитается из начального уровня технического состояния устройства, который принимается равным единице. Данную взаимосвязь можно представить выражением

$$TC(p) = 1 - \frac{1 - k \cdot OQ(p)}{T_p} \quad (1)$$

где  $TC(p)$  – оценка технического состояния устройства;  $OQ(p)$  – оценка качества работы, сформированная системой нечеткого вывода;  $T$  – постоянная времени интегрирования;  $k$  – коэффициент настройки;  $p$  – оператор Лапласа.

Для получения корректных результатов оценки постоянная времени интегрирования и коэффициент настройки должны определяться экспертным путем с учетом экспериментальных исследований конкретного объекта диагностики. В рамках данной работы применяются тестовые значения.

На рис. 3 представлен блок, формирующий оценку технического состояния синхронного генератора в среде *Matlab Simulink*.

Для выработки прогноза технического состояния оборудования полученные оценки обрабатываются при помощи адаптивной нейро-нечеткой системы вывода. В качестве примера рассмотрим устройство системы прогнозирования технического состояния синхронного генератора (рис. 4). Системы прогнозирования состояния ветровой турбины, преобразователя частоты, фотоэлектрических преобразователей и инвертора напряжения имеют аналогичный принцип работы.

Для формирования прогнозируемого технического состояния для момента времени  $t+60$  секунд построенная система использует четыре известных значения оценки технического состояния в моменты времени  $t$ ,  $t-5$ ,  $t-10$ ,  $t-15$  секунд. Система прошла 10 эпох обучения, в результате минимальная величина среднеквадратической ошибки при прогнозировании составила 3,6%. Для проверки работоспособности системы использован тестовый график с различным характером изменения оценки технического состояния.

На рис. 5 представлено наложение тестового графика оценки технического состояния, использованного в качестве эталона (пунктирная линия) и графика оценки, полученного путем формирования прогноза (сплошная линия).

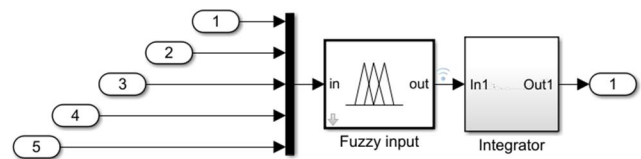


Рис. 3. Блок формирования оценки технического состояния синхронного генератора

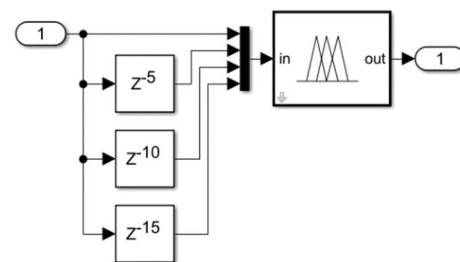


Рис. 4. Блок прогнозирования технического состояния синхронного генератора

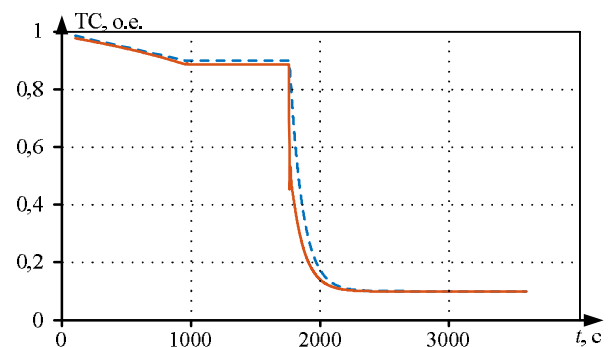


Рис. 5. Работа системы прогнозирования: эталонный график (пунктирная линия), прогнозируемое техническое состояние (сплошная линия)

Как видно из графиков, при заданных параметрах прогнозируемая оценка технического состояния чаще оказывается ниже фактической. Изменение количества эпох обучения и объема обучающих данных может улучшить точность прогноза, но в рамках данной работы достигнутая точность является приемлемой, поэтому переобучение нейронной сети не выполнялось.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

При моделировании рассматривается работа установок в рамках режима нормальной эксплуатации, при котором величины диагностических параметров не превышают норму, а также при увеличении электрической мощности нагрузки сверх допустимого уровня.

На рис. 6 представлены осциллограммы работы преобразователя солнечной энергии с номинальной электрической мощностью нагрузки, равной 10 кВА,  $\cos\varphi$  0,9. Приводятся осциллограммы линейного напряжения нагрузки АВ, тока фазы нагрузки А. THD (Total harmonic distortion) напряжения нагрузки составляет 1,3%, действующее значение первой гармоники напряжения равно 382 В. Действующее значение первой гармоники тока равно 14,8 А.

На рис. 7 представлены осциллограммы работы преобразователя энергии ветра с номинальной электрической мощностью нагрузки, равной 10 кВА,  $\cos\varphi$  0,9. Приводятся осциллограммы линейного напряжения нагрузки АВ, тока фазы нагрузки А. THD напряжения нагрузки составляет 1,2%, действующее значение первой гармоники напряжения равно 380 В. Действующее значение первой гармоники тока равно 14,7 А.

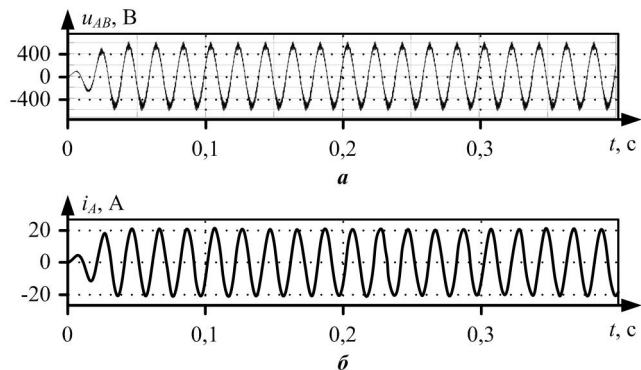


Рис. 6. Осциллограммы нагрузки при работе преобразователя солнечной энергии: а – линейное напряжение нагрузки; б – ток фазы нагрузки

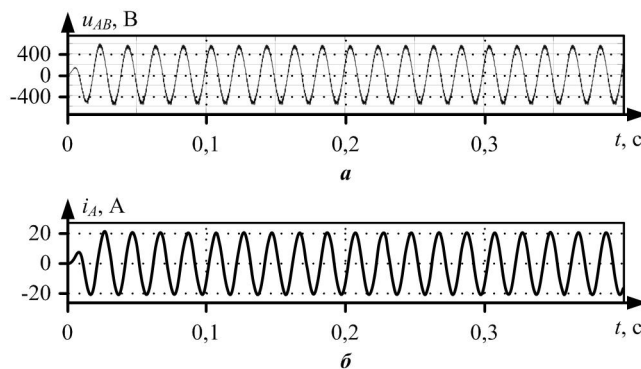


Рис. 7. Осциллограммы нагрузки при работе преобразователя ветровой энергии: а – линейное напряжение нагрузки; б – ток фазы нагрузки

На рис. 8 представлены графики изменения оценок технического состояния для фотоэлектрических преобразователей и инвертора напряжения, полученные при работе систем оценки с тестовым перечнем логических правил и коэффициентов при номинальной величине электрической нагрузки. Следует отметить, что для большей наглядности графиков тестовый коэффициент изменения технического состояния в системе оценки был значительно увеличен, поскольку моделирование выполняется на малом временном интервале.

На рис. 9 представлены графики изменения оценок технического состояния для синхронного генератора и преобразователя частоты, полученные при работе систем оценки с тестовым перечнем логических правил и коэффициентов при номинальной величине электрической нагрузки.

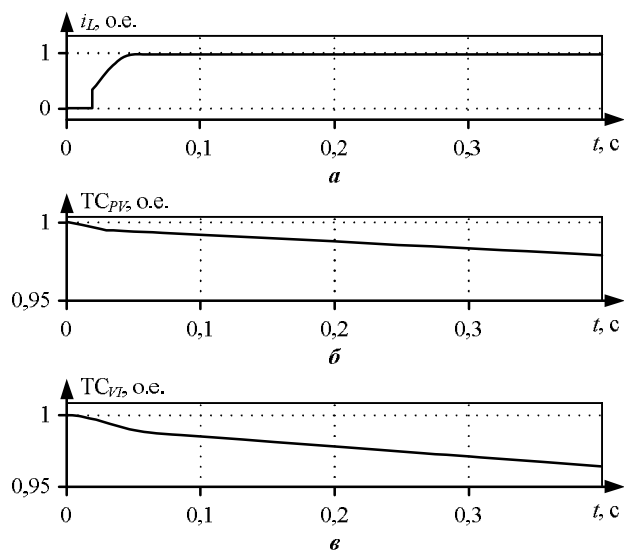


Рис. 8. Оценка технического состояния при номинальной нагрузке: а – действующее значение тока фазы нагрузки в относительных единицах; б – оценка технического состояния фотоэлектрических преобразователей; в – оценка технического состояния инвертора напряжения

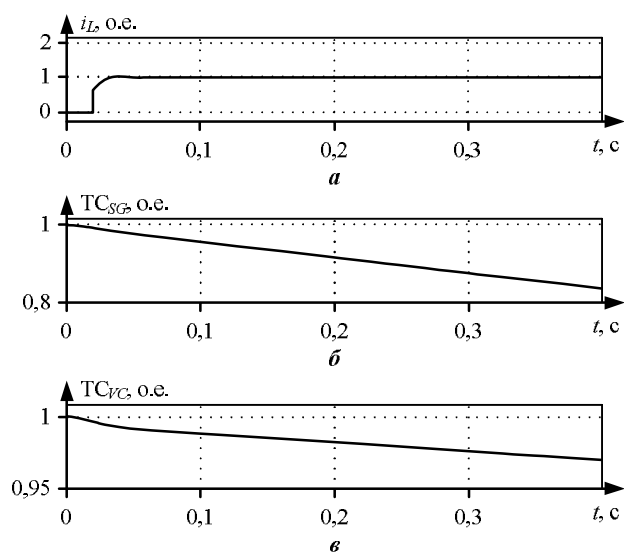
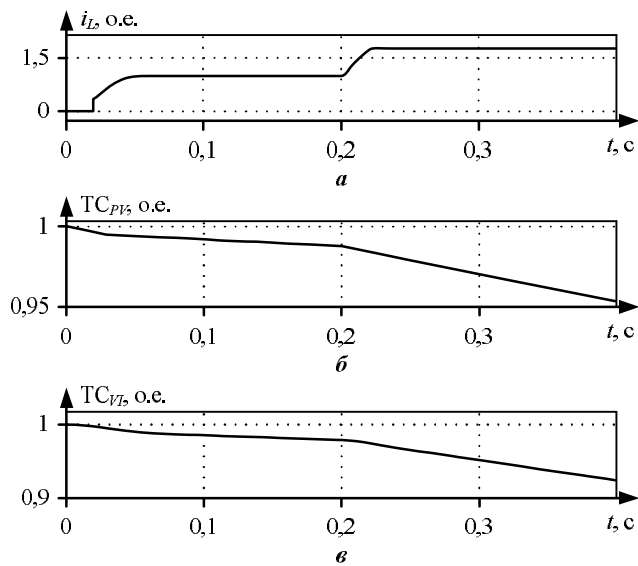


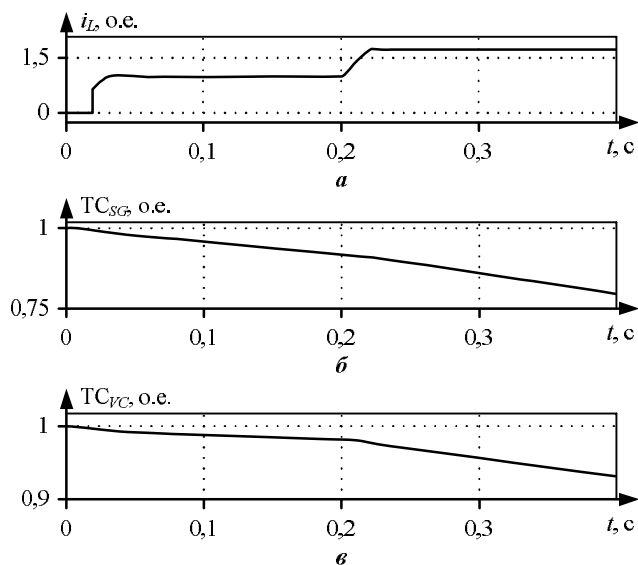
Рис. 9. Оценка технического состояния при номинальной нагрузке: а – действующее значение тока фазы нагрузки в относительных единицах; б – оценка технического состояния синхронного генератора; в – оценка технического состояния преобразователя частоты

Рассмотрим изменение оценки технического состояния оборудования при увеличении тока нагрузки до 170% от номинального значения в момент времени 0,2 с. На **рис. 10** представлены графики изменения оценок технического состояния для фотоэлектрических преобразователей и инвертора напряжения.

На **рис. 11** представлены графики изменения оценок технического состояния для синхронного генератора и преобразователя частоты, полученные при работе систем оценки с тестовым перечнем логических правил и коэффициентов при увеличении тока нагрузки до 170% от номинального значения в момент времени 0,2 с.



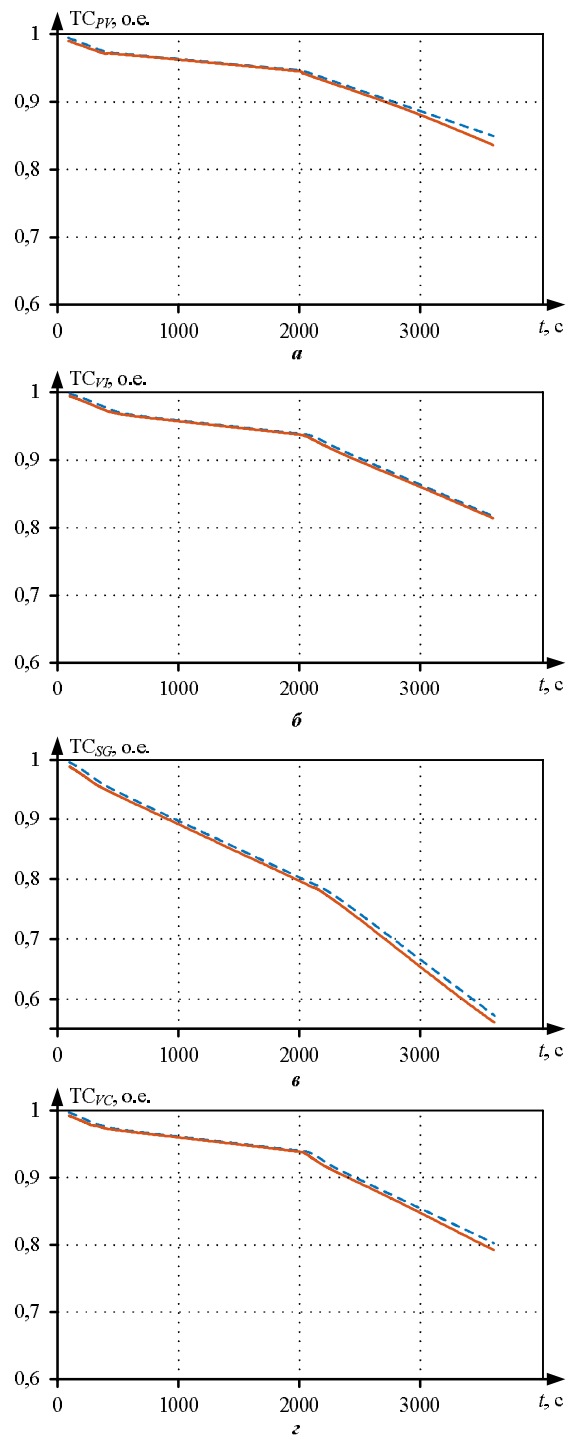
**Рис. 10.** Оценка технического состояния при увеличении тока нагрузки в момент 0,2 с: **а** – действующее значение тока фазы нагрузки в относительных единицах; **б** – оценка технического состояния фотоэлектрических преобразователей; **в** – оценка технического состояния инвертора напряжения



**Рис. 11.** Оценка технического состояния при увеличении тока нагрузки в момент 0,2 с: **а** – действующее значение тока фазы нагрузки в относительных единицах; **б** – оценка технического состояния синхронного генератора; **в** – оценка технического состояния преобразователя частоты

В момент времени 0,2 с оценка технического состояния уменьшается интенсивнее, чем на соответствующих графиках **рис. 8, 9**, что вызвано превышением номинального значения током нагрузки. Функционирование систем оценки технического состояния оборудования соответствует ожидаемому.

Проверка работы систем прогнозирования выполнялась на основе графиков оценок технического состояния длительностью один час. На **рис. 12** представлены графики эталонного и спрогнозированного значения технического состояния для фотоэлектрических преобразователей, инвертора напряжения, синхронного генератора, преобразователя частоты.



**Рис. 12.** Графики эталонного и спрогнозированного технического состояния: **а** – фотоэлектрических преобразователей; **б** – инвертора напряжения; **в** – синхронного генератора; **г** – преобразователя частоты

Максимальная величина отклонения прогнозируемого значения от эталонного составила 0,013 для фотоэлектрических преобразователей, 0,0058 – для инвертора напряжения, 0,012 – для синхронного генератора, 0,01 – для преобразователя частоты.

# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье приводятся результаты разработки имитационной модели генерирующего комплекса на основе возобновляемых источников энергии с системой мониторинга технического состояния оборудования. Выполнено моделирование работы в среде *Matlab Simulink* при мощности электрической нагрузки 10 кВА,  $\cos\varphi$  0,9 и частоте напряжения нагрузки 50 Гц, получены осциллограммы тока фазы и линейного напряжения нагрузки, а также построены графики изменения оценки технического состояния устройств энергетического комплекса при нарушении условий нормальной эксплуатации в виде увеличения тока нагрузки до 170% от номинального значения. Построены графики прогнозов технического состояния устройств с горизонтом прогнозирования 60 секунд. При работе модели возможно воспроизведение процессов, происходящих при изменении мощности солнечного излучения, скорости ветра, задания на амплитуду и частоту выходного напряжения преобразователей, параметров электрической нагрузки. Построенная имитационная модель может использоваться при проектировании объектов возобновляемой энергетики, разработке и испытании алгоритмов систем управления, а также исследовании различных режимов работы электроэнергетического комплекса. Разработанные системы оценки технического состояния оборудования могут быть использованы для мониторинга энергетического комплекса с целью предупреждения внезапных отказов, а также для оказания поддержки специалистам по эксплуатации и ремонту при принятии решения о превентивной замене и ремонте устройств. Важно отметить, что для получения корректных оценок и прогнозов технического состояния оборудования необходима настройка системы мониторинга и прогнозирования на основании данных, полученных при работе реального оборудования. В связи с этим направлением дальнейшего исследования является верификация результатов имитационного моделирования при помощи физической модели.

# СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Real-time condition monitoring and fault detection of components based on machine-learning reconstruction model / C. Yang, J. Liu, Y. Zeng, G. Xie // *Renewable Energy*. 2019. No. 133. Pp. 433-441. doi: 10.1016/j.renene.2018.10.062.
2. Назарычев А.Н., Новомлинский Э.В., Андреев Д.А. Оценка технического состояния электрооборудования на основе расчетов интегральных показателей // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики: материалы Международного научного семинара им. Ю.Н. Руденко. Сыктывкар: ООО «Коми республиканская типография», 2016. С. 171-179.
3. Gangsar P., Tiwari R. Signal based condition monitoring techniques for fault detection and diagnosis of induction motors: A state-of-the-art review // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2020. Vol. 144. Pp. 1-37. doi: 10.1016/j.ymssp.2020.106908.
4. Condition monitoring and fault diagnosis of induction motors: A Review / A. Choudhary, D. Goyal, S. Letha Shimi, A. Akula // *Archives of Computational Methods in Engineering*. 2019. No. 26. Pp. 1221-1238. doi: 10.1007/s11831-018-9286-z.
5. Байдок М. А., Комарова Г. В. Оценка технического состояния и надежности электрических машин // *Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ»*. 2019. № 3. С. 78-84.
6. Левин В.М., Керимкулов Н.Н. Экспресс-оценка состояния силовых трансформаторов для обеспечения эксплуатационной надежности // *Системы. Методы. Технологии*. 2016. № 4(32). С. 101-109. doi: 10.18324/2077-5415-2016-4-101-109.
7. Condition monitoring of PWM converter based on multiple support vector machine algorithm / M. Shi, J. Wang, Y. Xu, K. Huang, H. Li, P. Wang // 10th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG). IEEE, 2019. Pp. 264-268. doi: 10.1109/PEDG.2019.8807567.
8. Стеклов А.С., Титов В.Г., Серебряков А.В. Применение экспертных систем для обработки результатов диагностирования // *Научный альманах*. 2015. № 10-3(12). С. 247-250.
9. Саушев А.В. Области работоспособности электротехнических систем. СПб.: Политехника, 2013. 412 с.
10. Серебряков А.В., Стеклов А.С., Титов В.Г. Мониторинг и прогнозирование технического состояния автономных электротехнических комплексов. Нижний Новгород: Нижегородский государственный технический университет им. П. Е. Алексеева, 2018. 174 с.
11. Кочеганов Д.М., Серебряков А.В. Применение аппарата нечеткой логики для оценки качества функционирования синхронного генератора // *Энергоэффективность и энергобезопасность производственных процессов (ЭЭПП-2019): сборник трудов всероссийской конференции*. Тольятти: Тольяттинский государственный университет, 2019, С. 186-189.
12. Кочеганов Д.М., Серебряков А.В. Система оценки качества функционирования преобразователя частоты с использованием нечеткой логики // *Интеллектуальная электротехника*. 2019. №4 (8). С. 27-34.
13. Кочеганов Д.М., Серебряков А.В., Применение нечеткой логики для оценки качества функционирования фотоэлектрических панелей // *Федоровские чтения: материалы международной конференции*. М.: Издательский дом МЭИ, 2019. С. 300-304.

Поступила в редакцию 17 марта 2021 г.

# INFORMATION IN ENGLISH

## SIMULATION MODEL OF A WIND-SOLAR POWER PLANT WITH A TECHNICAL CONDITION NEURO-FUZZY FORECASTING SYSTEM

Damir M. Kochegarov

Postgraduate student, Institute of Electric Power Engineering, Nizhny Novgorod State Technical University after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia. E-mail: dk402@yandex.ru.

Artem V. Serebryakov

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Institute of Electric Power Engineering, Nizhny Novgorod State Technical University after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia.

Alexey S. Steklov

Ph.D. (Engineering), Engineer, Institute of Electric Power Engineering, Nizhny Novgorod State Technical University after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia.

Currently, due to the deteriorating environmental situation, an increase in the share of renewable energy sources is the main direction for the development of the electric power industries in many countries. An important stage in the creation of new power plants is simulation, which makes it possible to analyze the operation of equipment in various conditions, including violation of the limits of normal operation, and to reduce the number of possible design errors. This article describes the development and application of a simulation model of a system for generating electricity based on renewable sources with a system for assessing and predicting the technical condition of equipment. The simulation model is implemented in the Matlab Simulink environment. Oscillograms of currents and voltages were obtained when the model was operating with an electrical load of 10 kVA for converters of wind and solar energy. A system for monitoring the technical condition of equipment based on the Mamdani-Zade fuzzy input system has been developed, which forms an assessment of the technical condition of the power plant elements based on diagnostic parameters in accordance with the base of expert rules. The obtained estimates of the technical condition of the equipment are processed using an adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS), which forms a forecast of the technical condition of the equipment at a given time interval. The constructed model can be used in the design of renewable energy facilities, as well as in the development and testing of algorithms for control and monitoring systems. The system for assessing and predicting the state of equipment using a fuzzy logic apparatus can be used to support decision-making by the operator of an electric power plant when determining the need for repair and replacement of equipment.

**Keywords:** renewable energy, simulation model, fuzzy logic, technical condition diagnostics, monitoring system.

#### REFERENCES

1. Yang C., Liu J., Zeng Y., Xie G. Real-time condition monitoring and fault detection of components based on machine-learning reconstruction model. *Renewable Energy*. 2019. No. 133. Pp. 433-441. doi: 10.1016/j.renene.2018.10.062.
2. Nazarychev A.N., Novomlinsky E.V., Andreev D.A. Assessment of the technical condition of electrical equipment based on calculations of integral indicators. *Metodicheskie voprosy issledovaniya nadezhnosti bolshikh sistem energetiki: materialy Mezhdunarodnogo nauchnogo seminar im. Yu.N. Rudenko*. [Methodological issues in the study of the reliability of large energy systems. Yu.N. Rudenko International Scientific Seminar]. Syktyvkar, Komi Republican Printing House, 2016, pp. 171-179. (In Russian)
3. Gangsar P., Tiwari R. Signal based condition monitoring techniques for fault detection and diagnosis of induction motors: A state-of-the-art review. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2020. Vol. 144. Pp. 1-37. doi: 10.1016/j.ymssp.2020.106908.
4. Choudhary A., Goyal D., Letha Shimi S., Akula A. Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Induction Motors: A Review. *Archives of Computational Methods in Engineering*. 2019. No. 26. Pp. 1221-1238. doi: 10.1007/s11831-018-9286-z.
5. Baydyuk M.A., Komarova G.V. Assessment of the technical condition and reliability of electrical machines. *Izvestiya SPbGETU «LETI»* [Proceedings of Saint Petersburg Electrotechnical University], 2019, no. 3, pp. 78-84. (In Russian)
6. Levin V.M., Kerimkulov N.N. Express assessment of the state of power transformers to ensure operational reliability. *Sistemy. Metody. Tekhnologii*. [Systems. Methods. Technologies], 2016, no. 4 (32), pp. 101-109. doi: 10.18324/2077-5415-2016-4-101-109. (In Russian)
7. Shi M., Wang J., Xu Y., Huang K., Li H., Wang P. Condition Monitoring of PWM Converter Based on Multiple Support Vector Machine Algorithm. 10<sup>th</sup> International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG). IEEE, 2019. Pp. 264-268. doi: 10.1109/PEDG.2019.8807567.
8. Steklov A.S., Titov V.G., Serebryakov A.V. Expert systems for processing diagnostics results. *Nauchnyi almanakh*. [Scientific almanac], 2015, no. 10-3, pp. 247-250. (In Russian)
9. Saushev A.V. *Oblasti rabotosposobnosti elektrotekhnicheskikh sistem* [Working efficiency areas of electrical engineering systems]. St. Petersburg, Polytechnica Publ., 2013. 412p. (In Russian)
10. Serebryakov A.V., Steklov A.S., Titov V.G. *Monitoring i prognozirovaniye tekhnicheskogo sostoyaniya avtonomnykh elektrotekhnicheskikh kompleksov* [Monitoring and forecasting technical condition of stand-alone electrical engineering complexes]. Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R. E. Alekseev Publ., 2018. 174p. (In Russian)
11. Kochegarov D.M., Serebryakov A.V. Fuzzy logic apparatus to assess synchronous generator performance. *Energoeffektivnost i energobezopasnost proizvodstvennykh protsessov (EEPP-2019)* [Production processes energy efficiency and energy security (EEPP-2019)], Toliatty, Toliatty State University Publ., 2019, pp. 186-189. (In Russian)
12. Kochegarov D.M., Serebryakov A.V. Fuzzy logic system for assessment of frequency converter operating quality. *Intellectualnaya elektrotekhnika* [Smart Electrical Engineering], 2019, no. 4, pp. 27-34. (In Russian)
13. Kochegarov D.M., Serebryakov A.V. Fuzzy logic to assess photovoltaic panel performance. *Fedorovskie chteniya: materialy mezhdunarodnoy konferentsii* [International conference "Fedorov readings"]. Moscow, MPEI Publ. House, 2019, pp. 300-304. (In Russian)

Кочегаров Д.М., Серебряков А.В., Стеклов А.С. Имитационная модель солнечно-ветряной электростанции с нейро-нечеткой системой прогнозирования технического состояния // Электротехнические системы и комплексы. 2021. № 2(51). С. 68-75. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-2\(51\)-68-75](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-2(51)-68-75)

Kochegarov D.M., Serebryakov A.V., Steklov A.S. Simulation Model of a Wind-Solar Power Plant with a Technical Condition Neuro-Fuzzy Forecasting System. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2021, no. 2(51), pp. 68-75. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-2\(51\)-68-75](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-2(51)-68-75)

Мугалимов Р.Г.<sup>1</sup>, Закирова Р.А.<sup>1</sup>, Мугалимова А.Р.<sup>2</sup>, Боков А.И.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

<sup>2</sup> ООО НИиОКБ «Энергосбережение», г. Магнитогорск

## ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ КАЧЕСТВА СТАЛИ СТАТОРА ПРИ КАПИТАЛЬНОМ РЕМОНТЕ И МОДЕРНИЗАЦИИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Представлены результаты исследований стали статора асинхронных двигателей при капитальном ремонте на электроремонтном предприятии. Разработаны методика, аппаратные и программные средства для испытания качества стали статора асинхронных машин с извлеченным ротором. Методика испытания предусматривает оценку качества стали статора путем ее намагничивания эталонным напряжением и током, пропорциональным проектной магнитной индукции и напряженности поля в спинке стали статора, регистрацию сигналов напряжения и тока намагничивания, мощности потерь в стали. Регистрируемые сигналы напряжения и тока оцифровываются. Разработано программное средство, позволяющее анализировать оцифрованные сигналы по пяти критериям: сдвиг фаз напряжения и тока намагничивания, равный разности фаз напряжения и тока, определяемых по их максимальным значениям; приращение тока намагничивания, равное разности максимального значения тока и тока при фазе напряжения, равной  $90^\circ$ ; потери активной мощности в стали статора; сдвиг начальных фаз напряжения и тока намагничивания; гармонический состав тока намагничивания. Предложены логические уравнения, аргументами которых являются перечисленные критерии, позволяющие без участия человека принимать решения о качестве стали статора: или сталь хорошая, или удовлетворительная, или плохая. В работе приведены: электрическая схема аппаратной части устройства для испытания стали статора; описан алгоритм обработки оцифрованных сигналов; результаты экспериментальных исследований стали статора асинхронных двигателей типа АИ225М8УЗ, мощностью 30 кВт, частотой вращения 735 об/мин. Методика, аппаратный и программный комплекс позволяют оценивать качество стали статора каждого ремонтируемого двигателя, выполнить ремонт двигателей с минимальными трудовыми и материальными затратами. Разработка рекомендуется специалистам электроремонтных предприятий.

**Ключевые слова:** асинхронный двигатель, сталь статора, критерии качества стали, методика испытания, осциллограмма, аппаратный комплекс, программа для ЭВМ.

### ВВЕДЕНИЕ

На промышленных предприятиях РФ по экспертным оценкам в эксплуатации электротехнических комплексов находится не менее 180 млн единиц асинхронных двигателей [1, 2]. Ежегодно от 3 до 7 % этого парка электрических машин выходит из строя и проходит капитальный ремонт с заменой обмотки статора [3-5]. На большинстве электроремонтных предприятий РФ извлечение обмотки статора из пазов стали статора осуществляется после отжига статора при температуре  $370-380^\circ\text{C}$ . В результате термического воздействия сталь статора частично теряет свои магнитные свойства. При замене обмотки статора, как правило, количественно не учитывают снижение магнитного свойства стали, а ремонт выполняют с сохранением заводских обмоточных данных: числа витков; диаметра обмоточного провода; схемы укладки обмотки. После такого капитального ремонта рабочие и механические характеристики двигателя ухудшаются – снижаются КПД,  $\cos\phi$  и другие показатели, что невыгодно для собственника электрической машины. Иногда капитально отремонтированный двигатель выходит из строя до окончания гарантийного срока. Это ведет к повторению ремонта, а следовательно, к дополнительным затратам трудовых и материальных ресурсов, что является экономически невыгодно для электроремонтного предприятия.

В данной работе предлагаются методика, аппаратные и программные средства, а также результаты

исследования стали статора при капитальном ремонте и модернизации асинхронного двигателя. Сущность методики заключается не только в визуальной, но и инструментальной оценки состояния стали статора каждого ремонтируемого двигателя. С учетом реального магнитного состояния стали осуществляется пересчет номинальной мощности, числа витков и диаметра провода обмотки статора. Методика экспериментальной оценки состояния стали статора изложена в публикации [1]. Однако данная методика предусматривает обработку осциллограмм напряжения и тока намагничивания человеком-оператором. Это трудоемко, ограничивает пропускную способность участка по исследованию стали статора и вносит ошибки, обусловленные человеческим фактором, в принятии решений о качестве стали, выборе технологии ремонта и модернизации электрической машины.

Известны методики обработки осциллограмм электрических сигналов программными средствами [6-9]. Эти методики ориентированы преимущественно для электрических сигналов линейных электрических цепей. Асинхронный двигатель является нелинейной электромагнитной системой, обусловленной наличием электротехнической стали. Главной характеристикой электротехнической стали является зависимость магнитной индукции  $B$  от напряженности магнитного поля  $H$ , т.е. кривая намагничивания [10,11]. На рис. 1 приведены кривые намагничивания спинки стали статора, применяемые при проектировании асинхронных двигателей [2, 12].

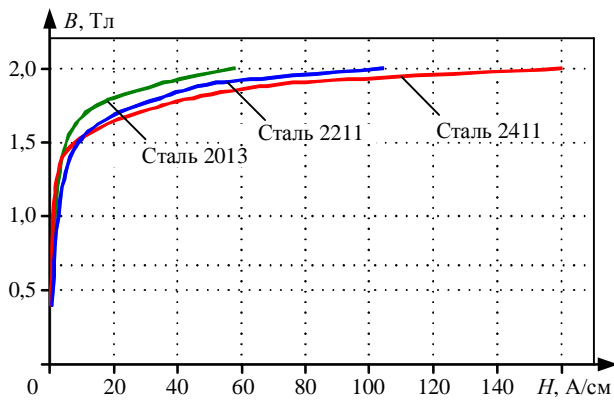


Рис. 1. Кривые намагничивания спинки стали статора

АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС И КРИТЕРИИ  
ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА СТАЛИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Целью данной разработки является автоматизация обработки осциллограмм напряжения и тока намагничивания стали статора с применением программного средства. Задачей данной работы является разработка аппаратно-программного комплекса, критериев и логических уравнений для оценки качества стали статора при капитальном ремонте или модернизации асинхронного двигателя в условиях электроремонтного предприятия.

Методика предусматривает, кроме визуальной оценки, оценивать качество стали статора по объективным критериям, полученным в результате обработки оцифрованных сигналов напряжения и тока намагничивания.

На рис. 2 представлены типичные формы осциллограмм сигналов напряжения и тока намагничивания стали статора, получаемые инструментальным исследованием.

Главными критериями оценки исследуемой стали являются [1]:

1) сдвиг фаз  $\varphi$ , равный разности фаз напряжения  $\psi_U$  и тока  $\psi_I$ , определяемых по их максимальным значениям на интервалах  $0 - T/2$ ,  $T/2 - T$ :

$$\varphi = \psi_U - \psi_I; \quad (1)$$

2) приращение тока намагничивания  $\Delta i$ , равное разности максимального значения тока  $i_{\max}$  и тока  $i_{\psi U 90^\circ}$  при  $\psi_U = 90^\circ$ :

$$\Delta i = i_{\max} - i_{\psi U 90^\circ}; \quad (2)$$

3) потери активной мощности в стали статора  $\Delta P_c$ :

$$\Delta P_c = UI \cos \varphi; \quad (3)$$

где  $U$ ,  $I$  – действующие значения напряжения и тока намагничивания;

4) сдвиг начальных фаз  $\varphi_{\text{нач}}$ , равны разности начальных фаз напряжения  $\psi_{U\text{нач}}$  и тока намагничивания  $\psi_{I\text{нач}}$ :

$$\varphi_{\text{нач}} = \psi_{U\text{нач}} - \psi_{I\text{нач}}; \quad (4)$$

5) гармонический состав тока намагничивания, определяемый методом полного преобразования Фурье.

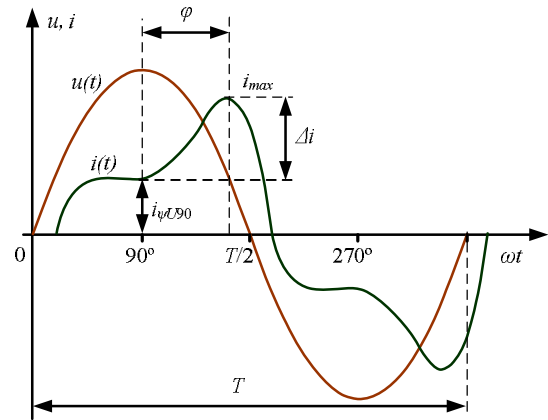


Рис. 2. Формы осциллограмм напряжения и тока намагничивания стали статора

На рис. 3 представлен общий вид аппаратной части устройства, обеспечивающей намагничивание стали статора.

На рис. 4 приведена его электрическая схема, где:  $TV$  – автотрансформатор;  $TV1$  – силовой трансформатор;  $TA1$  и  $TA2$  – измерительные трансформаторы тока;  $PW$  – ваттметр;  $PA$  – амперметр;  $PV$  – вольтметр;  $PS$  – осциллограф;  $K1$ ,  $KM1$  – пускатель электромагнитный;  $KA$  – реле токовое;  $L$  – обмотка намагничивания;  $QF1$  – выключатель автоматический. На рис. 5 приведена функциональная схема регистрации и обработки сигналов напряжения и тока намагничивания стали статора, где: БПР – блок потенциальной развязки на основе PC-3; система сбора и обработки информации – комплект  $L\text{-Card E14} - 440$ ; ПК – персональный компьютер с программным обеспечением.

Для проведения эксперимента определяют величину эталонного напряжения намагничивания при заданном числе витков  $W$  намагничивающей обмотки по методике [1]. Допустимую величину тока намагничивания при заданном числе витков вычисляют по формуле

$$I_m = \frac{H_{c1} l_{c1}}{W}, \quad (5)$$

где  $H_{c1}$  – напряженность магнитного поля в спинке статора;  $l_{c1}$  – длина средней линии магнитного потока.



Рис. 3. Аппаратная часть для инструментального исследования стали статора

Таблица 1

Средние значения магнитной индукции в спинке статора

Высота оси вращения, мм	Число пар полюсов $2p$	$B_{c1}$ , Тл
50–132	2; 4	1,50–1,65
	6	1,45–1,60
	8	1,20–1,35
160–250	2; 4	1,45–1,60
	6	1,35–1,50
	8	1,10–1,20
280–355	2; 4; 6	1,35–1,50
	8; 10	1,30–1,45
	12	1,15–1,30

Из массивов сигналов напряжения и тока намагничивания формируются их полные периоды и подсчитывается их число  $N$ . Программно определяется симметричность напряжения и тока намагничивания относительно оси времени. Если кривые симметричны относительно оси абсцисс, принимается решение о том, что ряд Фурье не содержит постоянную составляющую  $U_0$  и содержит только нечетные гармоники –  $U_1, U_3, U_5$  и т.д. [6].

По каждому выделенному периоду сигналов определяются критерии 1-4.

Сигнал тока раскладывается в полный ряд Фурье, представляющий сумму синусоидальной и косинусоидальной составляющих тока. В программе предусмотрено разложение в ряд Фурье до 7 гармоники. Для этого каждый период тока разбивается на  $n$  одинаковых частей. Каждой части соответствует функция  $f_p(x)$ , где  $x = T/n = 360^\circ/n$ ;  $499 \geq n \geq 250$ .

Определяются амплитуды синусоидальной  $I'_{km}$  и косинусоидальной  $I''_{km}$  составляющих  $k$ -х гармоник тока:

$$I'_{km} = \frac{4}{n} \sum_{p=1}^{n/2} f_p(x) \sin_p(p-0,5)x; \quad (7)$$

$$I''_{km} = \frac{4}{n} \sum_{p=1}^{n/2} f_p(x) \cos_p(p-0,5)x. \quad (8)$$

По значениям (7)-(8) вычисляется амплитуда  $k$ -й гармоники:

$$I_{km} = \sqrt{(I'_{km})^2 + (I''_{km})^2}. \quad (9)$$

Вычисляется начальная фаза тока  $k$ -гармоники:

$$\operatorname{tg} \varphi_k = \frac{I'_{km}}{I''_{km}}; \quad \varphi_k = \arctg \left( \frac{I'_{km}}{I''_{km}} \right). \quad (10)$$

Формируется выражение мгновенного значения тока  $k$ -й гармоники:

$$i_k(t) = I_{km} \sin(k\omega t \pm \varphi_k). \quad (11)$$

Вычисляется действующее значение тока намагничивания  $I_m$ :

$$I_m = \sqrt{\sum_{k=1}^{k=7} \frac{I_{km}^2}{2}}. \quad (12)$$

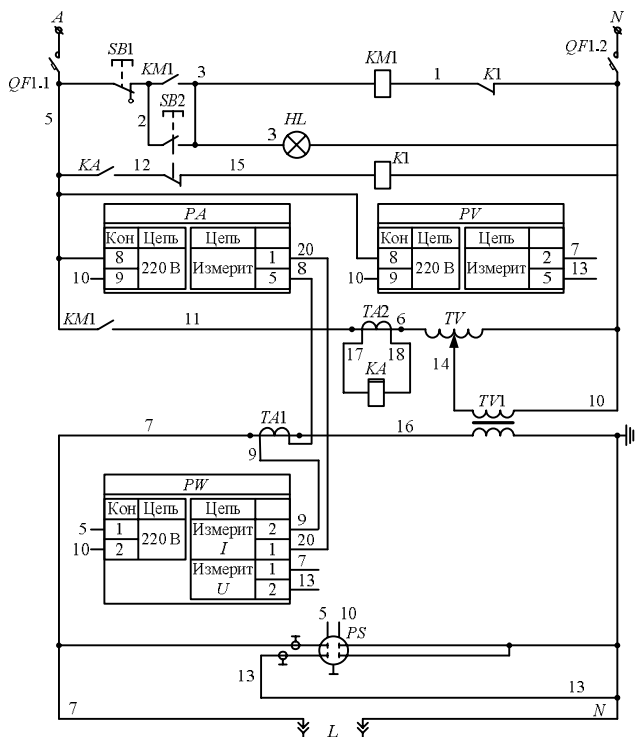


Рис. 4. Электрическая схема аппаратной части устройства для испытания стали статора

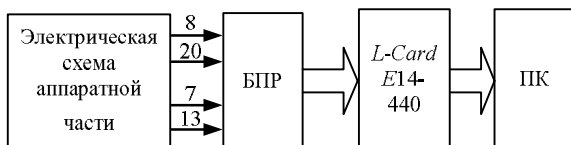


Рис. 5. Функциональная схема регистрации и обработки сигналов напряжения и тока намагничивания стали статора

Напряженность магнитного поля в спинке статора определяется с учетом кривых намагничивания  $B(H)$ , соответствующей марке стали статора (рис. 1).

Средние рекомендуемые значения магнитной индукции в спинке статора  $B_{c1}$  при проектировании асинхронных двигателей напряжением до 660 В степень защиты IP44, IP54 представлены в табл. 1 [12].

По кривой намагничивания, с учетом высоты оси вращения, числа пар полюсов двигателя и рекомендуемой магнитной индукции  $B_{c1}$ , определяют напряженность магнитного поля в спинке статора.

Длину средней линии определяют по формуле

$$l_{c1} = \frac{\pi}{2} (D_1 + D_{H1} + 2h_{П1}), \quad (6)$$

где  $D_1$ ,  $D_{H1}$ ,  $h_{П1}$  – соответственно внутренний, наружный диаметры и высота паза стали статора, определяемые измерением соответствующих размеров.

Вычисленную величину эталонного напряжения намагничивания устанавливают с помощью автотрансформатора TV, увеличивая напряжение намагничивания  $U_m$  до эталонного  $U_{m \text{ эт}}$ . После установки тока намагничивания регистрируют аналоговые сигналы напряжения и тока намагничивания. Продолжительность регистрации не менее 3 – 5 с (150 – 250 периодов частотой 50 Гц). Аналоговые сигналы тока и напряжения намагничивания оцифровываются в L-Card E14-440 и создаются их массивы в ПК.

Напряжение намагничивания  $U_m$  является квазисинусоидальной, поэтому по подобным процедурам и формулам, описанным для обработки сигнала тока намагничивания, осуществляется разложение в ряд Фурье сигнала напряжения намагничивания.

Вычисляются потери активной мощности в стали статора по методике расчета несинусоидальных, нелинейных электрических цепей [6]:

$$p(t) = \frac{1}{T} \int u(t)i(t)dt; \quad (13)$$

$$\Delta P_c = \frac{1}{T} \int U_1 I_1 \cos \varphi.$$

Каждый вычисленный критерий исследованных сигналов усредняется за  $N$  периодов и сравнивается с допустимым значением.

Принятие решений о качестве стали статора осуществляют по разработанным логическим уравнениям, аргументами которых являются критерии 1-5. По критерию 5 учитываются первая и третья гармоники тока намагничивания, как наиболее информативные:

$$C_x = \left[ (\Delta P_c \wedge \varphi \wedge \Delta i \wedge \bar{I}_3) \vee \right. \\ \left. \vee (\Delta P_c \wedge \varphi \wedge \Delta \bar{i} \wedge I_3) \vee (\Delta P_c \wedge \varphi \wedge \Delta i \wedge I_3) \right] \wedge I_1; \quad (14)$$

$$C_y = \left[ (\Delta P_c \wedge \varphi \wedge \Delta \bar{i} \wedge \bar{I}_3) \vee \right. \\ \left. \vee (\Delta P_c \wedge \bar{\varphi} \wedge \Delta i \wedge \bar{I}_3) \vee (\Delta \bar{P}_c \wedge \varphi \wedge \Delta i \wedge \bar{I}_3) \vee \right. \\ \left. \vee (\Delta P_c \wedge \bar{\varphi} \wedge \Delta \bar{i} \wedge I_3) \vee (\Delta P_c \wedge \varphi \wedge \Delta \bar{i} \wedge I_3) \vee \right. \\ \left. \vee (\Delta P_c \wedge \bar{\varphi} \wedge \Delta i \wedge I_3) \vee (\Delta \bar{P}_c \wedge \varphi \wedge \Delta i \wedge I_3) \right] \wedge I_1; \quad (15)$$

$$C_n = \left[ (\Delta P_c \wedge \bar{\varphi} \wedge \Delta \bar{i} \wedge \bar{I}_3) \vee \right. \\ \left. \vee (\Delta \bar{P}_c \wedge \varphi \wedge \Delta \bar{i} \wedge \bar{I}_3) \vee (\Delta \bar{P}_c \wedge \bar{\varphi} \wedge \Delta i \wedge \bar{I}_3) \vee \right. \\ \left. \vee (\Delta \bar{P}_c \wedge \bar{\varphi} \wedge \Delta \bar{i} \wedge I_3) \vee (\Delta \bar{P}_c \wedge \varphi \wedge \Delta \bar{i} \wedge I_3) \vee \right. \\ \left. \vee (\Delta \bar{P}_c \wedge \bar{\varphi} \wedge \Delta i \wedge I_3) \vee (\Delta \bar{P}_c \wedge \varphi \wedge \Delta i \wedge I_3) \right] \wedge I_1, \quad (16)$$

где  $C_x$  – сталь хорошая;  $C_y$  – сталь удовлетворительная;  $C_n$  – сталь плохая.

Программный комплекс реализует описанный алгоритм.

#### ПРИМЕНЕНИЕ АППАРАТНО-ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА

По описанной методике с применением разработанных аппаратного и программного средств выполнены исследования стали статора асинхронных двигателей с различными повреждениями пазов (локальное оплавление паза, частичное удаление оплавленных зубцов паза и др.). Проведены множество опытов со сталью статора двигателей типа АИ225М8УЗ с различными повреждениями. В **табл. 2** представлены результаты исследований стали статора с извлеченным ротором при традиционном капитальном ремонте и модернизации на энергоэффективный вариант по технологии [4]. В **табл. 2** внесены экспериментальные данные, полученные для двигателей с различными фи-

зическими состояниями стали статора двигателей; № 1 – сталь без механических и электрических повреждений; № 2 – сталь с оплавлением 20-25% эквивалентного паза; № 3 – сталь с оплавлением 45-50% эквивалентного паза; № 4 – сталь с оплавлением 80-100% эквивалентного паза.

В качестве примера на **рис. 6** и **7** представлены фрагменты осциллограмм напряжения  $u(t)$  и тока  $i(t)$ , намагничивания стали статора ремонтируемых асинхронных двигателей типа АИ225М8УЗ мощностью 30 кВт, частотой вращения 735 об/мин, применяемых в качестве электропривода флотационных машин горно-обогатительного предприятия.

Ниже приведены уравнения  $i$ -х гармоник тока и напряжения намагничивания:

$$i_1(t) = 113,4 \sin(\omega t - 104,9^\circ);$$

$$i_3(t) = 46,5 \sin(3\omega t - 21,5^\circ);$$

$$i_5(t) = 2,9 \sin(5\omega t + 88,4^\circ);$$

$$i_7(t) = 1,8 \sin(7\omega t - 71,3^\circ);$$

$$u_1(t) = 16,6 \sin(\omega t - 64,4^\circ);$$

$$u_3(t) = 1,9 \sin(3\omega t + 170,8^\circ);$$

$$u_5(t) = 0,5 \sin(5\omega t - 111,8^\circ);$$

$$u_7(t) = 0,1 \sin(7\omega t + 81,3^\circ);$$

– для двигателя № 4 (сталь с оплавлением 80-100% эквивалентного паза):

$$i_1(t) = 167,9 \sin(\omega t - 162,3^\circ);$$

$$i_3(t) = 45,1 \sin(3\omega t + 127,8^\circ);$$

$$i_5(t) = 6,6 \sin(5\omega t + 49,9^\circ);$$

$$i_7(t) = 0,2 \sin(7\omega t - 157,6^\circ);$$

$$u_1(t) = 16,8 \sin(\omega t - 132,5^\circ);$$

$$u_3(t) = 1,6 \sin(3\omega t - 40^\circ);$$

$$u_5(t) = 0,6 \sin(5\omega t - 102,8^\circ);$$

$$u_7(t) = 0,07 \sin(7\omega t - 60,8^\circ).$$

На **рис. 8** представлен гармонический состав тока намагничивания для двигателя № 1, а на **рис. 9** – для двигателя № 4.

Анализ **табл. 2** показывает, что принятые критерии 1-5 оценки качества стали статора соответствуют: для двигателя № 1 – допустимым значениям для хорошего качества стали статора; для двигателей 2, 3 – удовлетворительному качеству стали; для двигателей 4 – неудовлетворительному качеству стали.

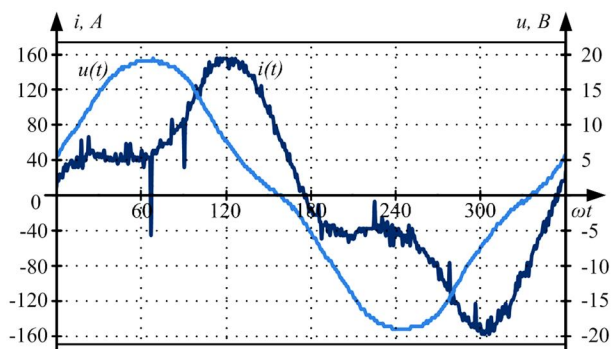


Рис. 6. Фрагмент осциллограмм напряжения и тока намагничивания стали статора асинхронного двигателя № 1 типа АИ225М8У3

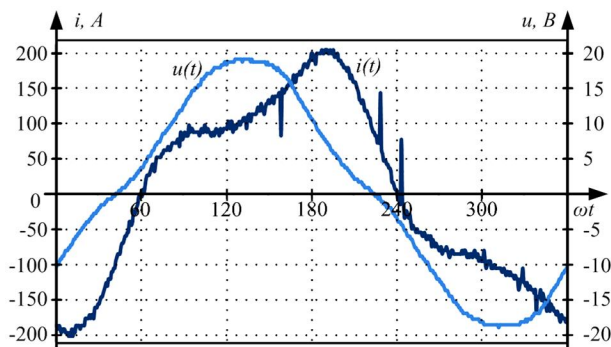


Рис. 7. Фрагмент осциллограмм напряжения и тока намагничивания стали статора асинхронного двигателя № 4 типа АИ225М8У3

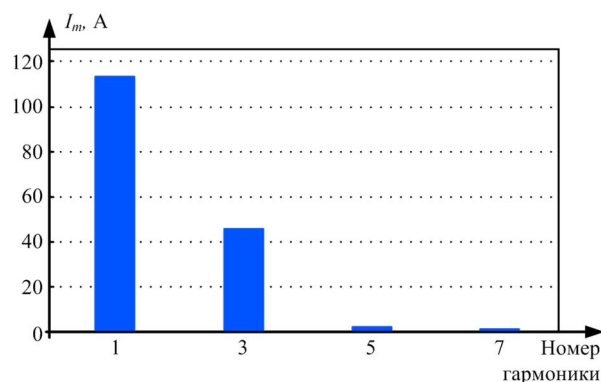


Рис. 8. Гармонический состав тока намагничивания для двигателя № 1

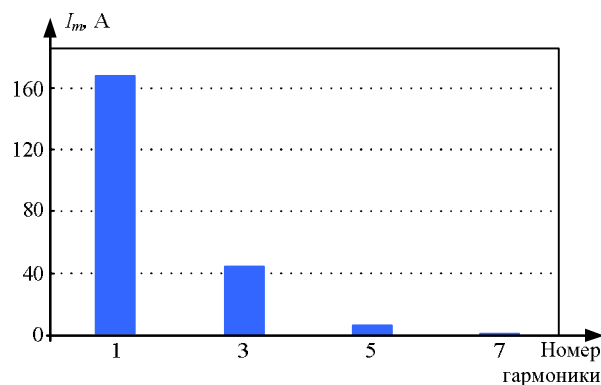


Рис. 9. Гармонический состав тока намагничивания для двигателя № 4

Таблица 2

Результаты исследований стали статора

Номер двигателя	Номер опыта	$\varphi_{\text{нач}}, \text{эл.град}$	$\varphi, \text{эл.град}$	$\Delta i, \text{A}$	Напряжение, токи гармоник					$\Delta P_c, \text{Вт}$
					$U_{\text{мэт}}, \text{В}$	$I_{1\text{м}}, \text{A}$	$I_{3\text{м}}, \text{A}$	$I_{5\text{м}}, \text{A}$	$I_{7\text{м}}, \text{A}$	
1	1	18,4	56,7	112,8	18	113,4	46,4	2,9	1,8	717
	2	17,4	56,6	110,8	18	113,9	45,9	2,9	1,8	723
	3	18,1	56,7	110,5	18	113,1	45,8	2,7	2,0	716
Среднее значение		17,9	56,7	111,4	18	113,5	46	2,8	1,9	719
2	1	18,1	57,0	109,2	18	116,7	45,6	3,0	1,6	746
	2	18,1	56,7	108,7	18	116,0	45,5	2,3	1,5	743
	3	18,1	56,7	109,9	18	116,4	46,0	2,9	1,6	743
Среднее значение		18,1	56,8	108,9	18	116,4	45,7	2,7	1,6	744
3	1	18,4	59,7	88,8	18	141,2	42,0	7,0	1,9	958
	2	17,7	59,5	89,8	18	141,3	42,6	6,9	1,9	961
	3	18,1	59,8	88,9	18	141,3	42,1	7,4	1,9	958
Среднее значение		18,0	59,7	89,2	18	141,3	42,2	7,1	1,9	959
4	1	16,7	54,5	82,9	18	167,9	45,1	6,6	0,2	1225
	2	16,8	53,0	67,8	18	172,1	43,5	6,5	0,4	1291
	3	16,2	53,0	64,2	18	171,9	42,2	6,8	0,3	1291
Среднее значение		16,6	53,5	71,6	18	170,3	43,6	6,6	0,3	1269

По результатам исследований качества стали статора двигателей типа АИ225М8У3 программный комплекс рекомендует:

- ремонт двигателя с хорошим качеством стали статора осуществлять с сохранением номинальной мощности по заводским обмоточным данным;
- ремонт двигателей с удовлетворительным качеством стали статора осуществлять с уменьшением номинальной мощности на 3-9% и пересчетом обмоточных данных;
- ремонт двигателя с неудовлетворительным качеством стали статора не осуществлять, а утилизировать его.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана методика оценки качества стали статора при капитальном ремонте или модернизации асинхронных двигателей, отличающаяся тем, что для оценки качества используется критерии: сдвиг фаз  $\varphi$  напряжения и тока, равный разности фаз напряжения  $\psi_U$  и тока  $\psi_I$ , определяемых по их максимальным значениям на интервалах  $0 - T/2$ ,  $T/2 - T$ ; приращение тока намагничивания  $\Delta i$ , равное разности максимального значения тока  $i_{\text{max}}$  и тока  $i_{\psi U 90}$  при  $\psi_U = 90^\circ$ ; потери активной мощности в стали статора  $\Delta P_c$ ; сдвиг началь-

ных фаз,  $\varphi_{\text{НАЧ}}$ , напряжения и тока намагничивания; гармонический состав тока намагничивания.

2. Создан аппаратный комплекс для намагничивания стали статора с извлеченным из него ротором, содержащий: автотрансформатор, трансформатор намагничивания, измерительные приборы, осциллограф, обмотку намагничивания, блок потенциальной развязки на основе РС-3, система сбора и обработки информации на основе L-Card E14 – 440, компьютер.

3. Разработана система логических уравнений для оценки качества стали статора по предложенным критериям.

4. Разработан программный комплекс, реализующий методику оценки качества стали статора, отличающийся тем, что он позволяет принимать решение о его качестве без участия человека-оператора по логическим уравнениям, аргументами которых являются предложенные критерии.

5. Методика, аппаратный и программный комплексы позволяют оценивать качество стали статора каждого ремонтируемого двигателя, что позволяет выполнять ремонт двигателей с минимальными трудовыми и материальными затратами. Разработка рекомендуется специалистам электроремонтных предприятий.

**Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере №555ГУЦЭС8-D3/62111.**

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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 техниче-

- ского университета им Г. И. Носова. 2018. Т. 16. №3. С. 145-149.
2. Копылов И.П. Электрические машины. М.: Высш. шк., 2012. 675 с.
3. Петушков М.Ю. Повышение ресурсоэффективности эксплуатации высоковольтных асинхронных электроприводов: дис. ... д-ра техн. наук. 05.09.03 / Петушков Михаил Юрьевич. Магнитогорск, 2015.
4. Мугалимов Р.Г. Асинхронные двигатели с индивидуальной компенсацией реактивной мощности и электроприводы на их основе: монография. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2011. 250 с.
5. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. М.: Высш. шк., 1973. 752 с.
6. Clark S.W., Stevens D. Induction motor rotor bar damage evaluation with magnetic field analysis // IEEE Transactions on industry applications. 2016. Vol. 52. No. 2. Pp. 1469-1476. doi: 10.1109/TIA.2015.2508424.
7. Faults and Diagnosis Methods of Permanent Magnet Synchronous Motors: A Review / Y. Chen, S. Liang, W. Li, H. Liang, C. Wang // Applied Sciences. 2019. No. 9(10). 2116. doi: 10.3390/app9102116.
8. Wolkiewicz M., Skowron M. Diagnostic system for induction motor stator winding faults based on axial flux // Power Electronics and Drives. 2017. No. 2(37). Pp. 137-150. doi: 10.5277/PED170204.
9. Nau S.L., Schmitz D., de Lima Pires W. Methods to evaluate the quality of stator and rotor of electric motor // IEEE 10th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED). 2015. Pp. 64-70. doi: 10.1109/DEMPED.2015.7303670.
10. Компания Металлинвест – Справочник стали URL: <https://chel.m-invest.ru/spravochniki/> (Дата обращения 01.05.2021)
11. Корицкий Ю.В., Пасынкова В.В., Тареева Б.М. Справочник по электротехническим материалам. Ленинград: Энергия, 1976. 728 с.
12. Гурин Я.С., Кузнецов Б.И. Проектирование серий электротехнических машин. М.: Энергия, 1978. 480 с.

Поступила в редакцию 30 марта 2021 г.

#### INFORMATION IN ENGLISH

### SOFTWARE COMPLEX FOR RESEARCHING THE STATOR STEEL QUALITY DURING OVERHAULING AND MODERNIZATION OF AN ASYNCHRONOUS MOTOR

Rif G. Mugalimov

D.Sc. (Engineering), Professor, Electric Power Supply of Industrial Enterprises Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: energosberegenie@rambler.ru.

Regina A. Zakirova

Postgraduate student, Electric Power Supply of Industrial Enterprises Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: Regina\_174@mail.ru.

Aliya R. Mugalimova

Ph.D. (Engineering), Technical Manager, Research and Development Bureau "Energy Saving", Magnitogorsk, Russia. E-mail: energosberegenie@rambler.ru.

Anton I. Bokov

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Engineer of electronic equipment, Research and Development Bureau "Energy Saving", Magnitogorsk, Russia. E-mail: bokov\_anton@mail.ru.

The study presents the results of the analysis of applied methods and computer programs for processing electrical signals that change in function of time. A methodology, hardware and software have been developed for testing the quality of the stator

steel of asynchronous machines with an extracted rotor during their overhaul or modernization at electrical repair enterprises. The test method provides for assessing the quality of the stator steel by magnetizing it with a reference voltage proportional to

the design magnetic induction in the back of the stator steel, recording oscillograms of magnetizing voltage and current and power losses in the steel. The recorded oscillograms of voltage and current are digitized. A software tool has been developed that allows analyzing of digitized signals according to the following five criteria: phase shift of voltage and current equal to the difference between the initial voltage phases and the initial phase of the current determined by their maximum values; an increment of the magnetizing current equal to the difference between the maximum value of the current and the current at a voltage phase equal to  $90^0$ ; active power losses in the stator steel; shift of the initial phases of voltage and magnetizing current; harmonic composition of voltage and magnetizing current. Logical equations have been developed, the arguments of which are the listed criteria, which allow making decisions about the quality of the stator steel, whether the steel is good, satisfactory, or bad, without human intervention. The paper contains an electrical diagram of the hardware of the device for testing stator steel; the detailed algorithm for processing digitized signals; the results of experimental studies of the stator steel of an asynchronous motor of the AI225M8Y3 type, with a power of 30 kW and the rotational speed of 735 rpm. The technique, hardware and software complex make it possible to assess the quality of the stator steel of each engine being repaired, to repair the engines with minimal labor and material costs. The development is recommended for specialists of electrical repair enterprises.

**Keywords:** asynchronous motor, stator steel, test procedure, oscillograms, hardware complex, computer program, steel quality criteria.

#### REFERENCES

1. Mugalimov R.G., Zakirova R.A., Mugalimova A.R., Odintsov K.E. Improving energy efficiency and resource saving during overhaul, modernization and utilization of motors of asynchronous electric drives. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Bulletin of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2018, vol. 16, no. 3, pp. 145-149. (In Russian)
2. Kopylov I.P. *Elektricheskie mashiny* [Electric machines]. Moscow, Higher school Publ., 2012. 675 p. (In Russian)
3. Petushkov M.Yu. *Povyshenie resursoeffektivnosti ekspluatatsii vysokovoltnykh asinkhronnykh elektroprivodov* Doktor Diss. [Improving the resource efficiency of the operation of high-voltage asynchronous electric drives. Doctor Diss.]. Magnitogorsk, 2015.
4. Mugalimov R.G. *Asinkhronnye dvigateli s individualnoy kompensatsiey reaktivnoy moshchnosti i elektroprivody na ikh osnove* [Induction motors with individual compensation of reactive power and electric drives]. Magnitogorsk, Magnitogorsk State Technical University Publ., 2011. 250 p.
5. Bessonov L.A. *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki* [Theoretical foundations of electrical engineering]. Moscow, Higher school Publ., 1973. 752 p. (In Russian)
6. Clark S.W., Stevens D. Induction motor rotor bar damage evaluation with magnetic field analysis. *IEEE Transactions on industry applications*. 2016. Vol. 52. No. 2. Pp. 1469-1476. doi: 10.1109/TIA.2015.2508424.
7. Chen Y, Liang S, Li W, Liang H, Wang C. Faults and Diagnosis Methods of Permanent Magnet Synchronous Motors: A Review. *Applied Sciences*. 2019. Vol. 9. No. 10. Pp. 2116. doi: 10.3390/app9102116.
8. Wolkiewicz M., Skowron M. Diagnostic system for induction motor stator winding faults based on axial flux. *Power Electronics and Drives*. 2017. No. 2(37). Pp. 137-150. doi: 10.5277/PED170204.
9. Nau S.L., Schmitz D., de Lima Pires W. Methods to evaluate the quality of stator and rotor of electric motor. *IEEE 10<sup>th</sup> International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED)*. IEEE, 2015. Pp. 64-70. doi: 10.1109/SDEMPED.2015.7303670.
10. Metallinvest Company - Steel Directory. Available at: <https://chel.m-invest.ru/spravochniki/> (Accessed 05 January 2021).
11. Koritsky Yu.V., Pasyukova V.V., Tareeva B.M. *Spravochnik po elektrotekhnicheskim materialam* [Reference book on electrical materials]. Leningrad, Energy Publ., 1976. 728 p. (In Russian)
12. Gurin Ya.S., Kuznetsov B.I. *Proektirovanie seriy elektrotekhnicheskikh mashin* [Designing series of electrical machines]. Moscow: Energiya, 1978. 480 p. (In Russian)

---

Программный комплекс для исследования качества стали статора при капитальном ремонте и модернизации асинхронного двигателя / Р.Г. Мугалимов, Р.А. Закирова, А.Р. Мугалимова, А.И. Боков// Электротехнические системы и комплексы. 2021. № 2(51). С. 76-82. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-2\(51\)-76-82](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-2(51)-76-82)

---

Mugalimov R.G., Zakirova R.A., Mugalimova A.R., Bokov A.I. Software Complex for Researching the Stator Steel Quality During Overhauling and Modernization of an Asynchronous Motor. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2021, no. 2(51), pp. 76-82. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-2\(51\)-76-82](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-2(51)-76-82)

---

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Андрянов Алексей Иванович** – канд. техн. наук, доцент, кафедра электронных, радиоэлектронных и электротехнических систем, Брянский государственный технический университет, г. Брянск, Россия. E-mail: mail@ahaos.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4083-040X>.

**Боков Антон Иванович** – канд. техн. наук, доцент, инженер электронной техники, ООО Научно-исследовательское и опытно-конструкторское бюро «Энергосбережение», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: bokov\_anton@mail.ru.

**Гартлиб Екатерина Андреевна** – старший преподаватель, кафедра мехатроники и автоматизации, Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), г. Челябинск, Россия. E-mail: gartlibea@susu.ru.

**Гасияров Вадим Рашитович** – канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой мехатроники и автоматизации, Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), г. Челябинск, Россия. E-mail: gasiyarovvr@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9635-4716>.

**Гасиярова Ольга Андреевна** – младший научный сотрудник, старший преподаватель, кафедра мехатроники и автоматизации, Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), г. Челябинск, Россия. E-mail: gasiarova@o@susu.ru.

**Довудов Сарфароз Умедович** – аспирант, кафедра электропривода и электрического транспорта, Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия. E-mail: dsu\_1991@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5600-4615>.

**Дунаев Михаил Павлович** – д-р техн. наук, профессор, кафедра электропривода и электрического транспорта, Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия. E-mail: mdunaev10@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1523-5553>.

**Жуйков Александр Константинович** – студент, отделение электроэнергетики и электротехники, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия. E-mail: zhuykov\_aleksandr@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5333-1661>.

**Закирова Регина Артуровна** – аспирант, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия. E-mail: Regina\_174@mail.ru

**Кашин Яков Михайлович** – канд. техн. наук, доцент, кафедра электротехники и электрических машин, Кубанский государственный технологический университет, г. Краснодар, Россия. E-mail: jlms@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0055-3700>.

**Ким Владислав Анатольевич** – аспирант, кафедра электротехники и электрических машин, Кубанский государственный технологический университет, г. Краснодар, Россия. E-mail: vladk-kub@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0934-4374>.

**Копелевич Лев Ефимович** – канд. техн. наук, доцент, кафедра электротехники и электрических машин, Кубанский государственный технологический университет, г. Краснодар, Россия. E-mail: kkllev@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4346-4836>.

**Кочеганов Дамир Михайлович** – аспирант, институт электроэнергетики, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Россия. E-mail: dk402@yandex.ru.

**Кухта Юлия Борисовна** – канд. техн. наук, доцент, кафедра вычислительной техники и программирования, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия. E-mail: perfectumyuka@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9128-3891>.

**Леднов Анатолий Викторович** – канд. техн. наук, доцент, кафедра вычислительной техники и программирования, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия. E-mail: alednov@mail.ru.

**Логинов Борис Михайлович** – ведущий инженер по наладке и испытаниям, ЦЭТЛ, ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: lb18@yandex.ru.

**Логунова Оксана Сергеевна** – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой вычислительной техники и программирования, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия. E-mail: logunova66@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7006-8639>.

**Мараховский Евгений Александрович** – студент, кафедра электротехники и электрических машин, Кубанский государственный технологический университет, г. Краснодар, Россия. E-mail: Zheka3334@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9152-2397>.

**Мугалимов Риф Гарифович** – д-р техн. наук, профессор, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия. E-mail: energosberegenie@rambler.ru.

**Мугалимова Алия Рифовна** – канд. техн. наук, технический руководитель, ООО Научно-исследовательское и опытно-конструкторское бюро «Энергосбережение», г. Магнитогорск, Россия.

**Муслимов Марат Булатович** – главный метролог, цех автоматизации и метрологии, АО «Учалинский ГОК», г. Учалы, Россия. E-mail: zla\_muslimov\_mb@ugok.ru.

**Панкратов Алексей Владимирович** – канд. техн. наук, директор, представительство в Томской области АО «Системный оператор Единой энергетической системы», г. Томск, Россия. E-mail: pankratovav@kuzb.soups.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8176-1925>.

**Полищук Владимир Иосифович** – д-р техн. наук, профессор, декан, энергетический факультет, Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, г. Барнаул, Россия. E-mail: polischuk\_vi@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8100-4406>.

**Радионов Андрей Александрович** – д-р техн. наук, профессор, проректор по учебной работе, Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), г. Челябинск, Россия. E-mail: radionovaa@susu.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3914-4429>.

**Самородов Александр Валерьевич** – канд. техн. наук, доцент, кафедра электротехники и электрических машин, Кубанский государственный технологический университет, г. Краснодар, Россия. E-mail: alex.samorodoff@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0465-6798>.

**Семенова Наталья Геннадьевна** – д-р пед. наук, канд. техн. наук, доцент, профессор, кафедра автоматизированного электропривода, электромеханики и электротехники, Оренбургский государственный университет, г. Оренбург, Россия. E-mail: ng\_sem@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6539-4616>.

**Серебряков Артём Владимирович** – канд. техн. наук, доцент, институт электроэнергетики, Нижегородский

государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Россия.

**Серебряков Николай Александрович** – аспирант, кафедра электроснабжения промышленных предприятий, Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, г. Барнаул, Россия. E-mail: Na\_serebryakov@altke.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7428-7364>.

**Стеклов Алексей Сергеевич** – канд. техн. наук, инженер, институт электроэнергетики, Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Россия.

**Худяков Павел Юрьевич** – канд. физ.-мат. наук, заведующий кафедрой механики и автоматизации технологических процессов и производств, Технический университет УГМК, г. Верхняя Пышма, Россия. E-mail: p.hudyakov@tu-ugmk.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9609-7665>.

**Чернова Анастасия Дмитриевна** – канд. техн. наук, доцент, кафедра электро-и теплоэнергетики, Оренбургский государственный университет, г. Оренбург, Россия. E-mail: Fiara@inbox.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5123-9220>.

**Шувалова Алена Александровна** – аспирант, энергетический факультет, Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, г. Барнаул, Россия. E-mail: alena\_shuvalova\_360@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0104-1085>.

## **Уважаемые коллеги!**

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

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

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

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

05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты (технические науки);

05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы (технические науки);

05.09.10 – Электротехнология (технические науки);

05.09.12 – Силовая электроника (технические науки);

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

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

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

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

05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы (технические науки)

05.14.04 – Промышленная теплоэнергетика (технические науки).

### **Журнал публикует научные работы по следующим рубрикам:**

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

Публикация статей является бесплатной.

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

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

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

### **Пакет подаваемых документов:**

- 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.