

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА»**

# **ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА**

**№ 3**

**Нижегород 2023**

**УДК 621.3**  
**ББК 31.2**

**Интеллектуальная электротехника / НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2023. № 3 (23). – 142 с.**

*Выходит 1 раз в квартал*

*Журнал включен ВАК при Минобрнауки России 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 специальностям 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы (технические науки), 2.4.3. Электроэнергетика (технические науки)*

**Главный редактор**

**Алексей Борисович Лоскутов, д-р техн. наук, профессор**

**зам. гл. редактора**

Андрей Борисович Дарьенков д-р техн. наук, доцент  
Елена Николаевна Соснина д-р техн. наук, профессор

**отв. секретарь**

Андрей Владимирович Шалухо канд. техн. наук

**отв. редактор**

Валерия Игоревна Казакова канд. филос. наук, доцент

**выпускающий редактор**

Иван Алексеевич Липужин канд. техн. наук

**ЧЛЕНЫ РЕДКОЛЛЕГИИ:**

Даурен Садыкович Ахметбаев	д-р техн. наук (Казахстан)
Геннадий Яковлевич Вагин	д-р техн. наук, профессор
Леонид Абрамович Герман	д-р техн. наук, профессор
Валерий Геннадьевич Гольдштейн	д-р техн. наук, профессор
Игорь Васильевич Гуляев	д-р техн. наук, профессор
Павел Владимирович Илюшин	д-р техн. наук
Анатолий Викторович Кузнецов	д-р техн. наук, профессор
Александр Леонидович Куликов	д-р техн. наук, профессор
Виктор Николаевич Мещеряков	д-р техн. наук, профессор
Георгий Борисович Онищенко	д-р техн. наук, профессор
Александр Сергеевич Плехов	канд. техн. наук, доцент
Александр Юрьевич Смирнов	д-р техн. наук, доцент
Vitezslav Styskala	д-р техн. наук, профессор (Чехия)
Владимир Георгиевич Титов	д-р техн. наук, профессор
Олег Станиславович Хватов	д-р техн. наук, профессор
Юрий Иванович Хохлов	д-р техн. наук, профессор
Александр Иванович Чивенков	д-р техн. наук, профессор
Roustiam Chakirov	д-р техн. наук, профессор (Германия)

**Учредитель и издатель:**

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Нижегородский государственный технический университет  
им. Р.Е. Алексеева»

(603155, Нижегородская обл., г. Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24)

*Электронная версия журнала:*  
<https://ie.nntu.ru>

*СМИ зарегистрировано Роскомнадзором*  
*ПИ № ФС77-81688 от 06 августа 2021 г.*

**ISSN 2658-6754**

УДК 621.3

© Нижегородский государственный технический  
университет им. Р.Е. Алексеева, 2023

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ .....</b>	<b>4</b>
<b>Мещеряков В.Н., Белоусов А.С., Гладышев В.Е.</b> Сравнительный анализ методов частотного управления двухфазным асинхронным двигателем.....	4
<b>Ульянов Д.А., Вихорев Н.Н.</b> Стабилизированный источник бесперебойного питания с гибридным дельта-трансформатором.....	23
<b>Кочеганов Д.М., Серебряков А.В., Стеклов А.С.</b> Количественная оценка технического состояния оборудования солнечной электростанции.....	30
<b>Сугаков В.Г., Малышев Ю.С.</b> Оценка возможности применения принципов последовательности и хроноконтроля для синтеза интеллектуальных реле автоматики.....	51
<b>Шевцов Д.Е., Павлюченко Д.А., Шевцова Л.И., Александров Н.В., Ядагаев Э.Г.</b> Исследование переходных процессов при управляемой коммутации вакуумным выключателем электродвигателей.....	65
<b>ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА .....</b>	<b>84</b>
<b>Герман Л.А., Галкин К.В.</b> Техничко-экономические показатели статического генератора реактивной мощности на посту секционирования тяговой сети железной дороги.....	84
<b>Суслов К.В., Крюков А.В., Воронина Е.В.</b> Моделирование электромагнитных полей тяговых сетей в аварийных режимах.....	101
<b>Воронин В.А., Непша Ф.С.</b> Прогнозирование часов пиковой нагрузки региональных энергосистем с использованием наивных моделей.....	111
<b>Карпов И.П.</b> АПВ в системе тягового электроснабжения переменного тока при различных вариантах исполнения поста секционирования .....	125
<b>ХРОНИКА .....</b>	<b>133</b>
Титову Владимиру Георгиевичу – 80 лет .....	133
Хватову Олегу Станиславовичу – 60 лет.....	135
60 лет трудовой деятельности Валерия Геннадьевича Гольдштейна.....	137

---

**ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ**

---

УДК 621.313.333

DOI 10.46960/2658-6754\_2023\_3\_04

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ  
ЧАСТОТНОГО УПРАВЛЕНИЯ ДВУХФАЗНЫМ  
АСИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ****В.Н. Мещеряков**

ORCID: 0000-0003-0984-5133 e-mail: mesherek@yandex.ru

Липецкий государственный технический университет

*Липецк, Россия***А.С. Белоусов**

ORCID: 0000-0002-9464-2260 e-mail: 011bas962@gmail.com

Липецкий государственный технический университет

*Липецк, Россия***В.Е. Гладышев**

ORCID: 0009-0009-1090-0620 e-mail: vlad.gladyshev.95@mail.ru

Липецкий государственный технический университет

*Липецк, Россия*

Приведены результаты сравнительных экспериментальных исследований работы преобразователя частоты совместно с двухфазным асинхронным двигателем с различными алгоритмами управления. Актуальность исследования определяется тем, что в современной электроприводной технике необходимо повышение регулировочной способности электроприводов переменного тока, в том числе, малой мощности. Число небольших электрических машин, используемых на вспомогательных механизмах, непрерывно увеличивается. Несмотря на малые размеры, их установленная суммарная мощность в бытовых устройствах (сверлильные станки, дрели, шуруповерты и др.) составляет существенную часть мощности всех бытовых электроприемников. Повышение их энергоэффективности за счет регулирования скорости скажется на снижении потерь и улучшении качества энергии сети. Но зачастую маломощные электроприводы являются нерегулируемыми, поскольку выполнены в основном на базе однофазных конденсаторных двигателей, а там, где регулирование является основной задачей, используются двигатели постоянного тока. Электроприводы с маломощным трехфазным асинхронным двигателем и преобразователем частоты, питающимся от однофазной сети, в настоящее время применяются редко. Альтернативным решением данной проблемы является подключение имеющихся

однофазных двигателей к питающей сети через преобразователь. Поскольку управление осуществляется отдельно главной и вспомогательной обмотками статора, такие двигатели называют двухфазными. Преобразователи частоты для двухфазных двигателей исследованы недостаточно полно. Известны некоторые алгоритмы работы их систем управления, основанных на широтно-импульсной модуляции или релейных регуляторах тока, однако требуется сравнение их технико-экономических показателей. Определение оптимального алгоритма работы преобразователя имеет большое практическое значение при разработке регулируемого электропривода на базе двухфазного двигателя.

**Ключевые слова:** двухфазный асинхронный двигатель, однофазный конденсаторный двигатель, преобразователь частоты, регулируемый электропривод, релейный регулятор тока, синусоидальная модуляция.

**Для цитирования:** Мещеряков В.Н., Белоусов А.С., Гладышев В.Е. Сравнительный анализ методов частотного управления двухфазным асинхронным двигателем // Интеллектуальная Электротехника. 2023. № 3. С. 4-22.

DOI: 10.46960/2658-6754\_2023\_3\_04

## COMPARATIVE ANALYSIS OF FREQUENCY CONTROL METHODS FOR TWO-PHASE ASYNCHRONOUS MOTOR

**V.N. Meshcheryakov**

ORCID: 0000-0003-0984-5133 e-mail: mesherek@yandex.ru

Lipetsk State Technical University

*Lipetsk, Russia*

**A.S. Belousov**

ORCID: 0000-0002-9464-2260 e-mail: 011bas962@gmail.com

Lipetsk State Technical University

*Lipetsk, Russia*

**V.E. Gladyshev**

ORCID: 0009-0009-1090-0620 e-mail: vlad.gladyshev.95@mail.ru

Lipetsk State Technical University

*Lipetsk, Russia*

**Abstract.** One of the urgent tasks in modern electric drive technology is the need to increase the adjusting ability of alternating current electric drives, including low power ones. The number of small electric machines used on auxiliary mechanisms is constantly increasing. Despite their small size, their installed total power in household appliances, such as drilling machines, drills, screwdrivers and other devices, is a significant. Increasing their energy efficiency through speed control will reduce losses and improve the power quality. But often low-power electric drives are unregulated, since they are made mainly

on the basis of single-phase capacitor motors, and where regulation is the main task, DC motors are used. Electric drives with a low-power three-phase asynchronous motor and a frequency converter powered by a single-phase network are rarely used today. An alternative solution to this problem is to connect existing single-phase motors to the mains through a converter. Since the control is carried out separately by the main and auxiliary stator windings, such motors are called two-phase. Frequency converters for two-phase motors have not been fully studied, although several algorithms for the operation of their control systems are known, based on various types of pulse-width modulation or relay current controllers, so a comparison of their technical and economic indicators is required. Determining the converter operation optimal algorithm is of great practical importance in the development of an adjustable electric drive based on a two-phase motor. The article presents the results of comparative experimental studies of the operation of a frequency converter together with a two-phase asynchronous motor with various control algorithms.

**Keywords:** adjustable electric drive, relay current controller, single-phase capacitor motor, sinusoidal modulation, two-phase asynchronous motor, frequency converter.

**For citation:** V.N. Meshcheryakov, A.S. Belousov and V.E. Gladyshev, “Comparative analysis of frequency control methods for two-phase asynchronous motor”, *Smart Electrical Engineering*, no. 3, pp. 4-22, 2023. DOI: 10.46960/2658-6754\_2023\_3\_04

## I. Введение

Сверление – одна из самых распространенных технологических операций в машиностроении, а также при выполнении ремонтных работ в домашнем хозяйстве. Основной тип двигателя в дрелях – двигатели постоянного тока и коллекторные двигатели переменного тока [1], но сложность обслуживания коллектора и замены щеток обуславливает использование в современных дрелях и шуруповертах синхронных двигателей с постоянными магнитами, регулируемых от преобразователей частоты (ПЧ) [2], цена бесщеточного инструмента при этом выше. В стационарных сверлильных станках малой мощности в основном применяются нерегулируемые приводы с однофазными конденсаторными двигателями [3].

Примером такого устройства является вертикально-сверлильный станок «Корвет-48», электропривод которого выполнен на базе конденсаторного двигателя К-48 (мощность 550 Вт, скорость вращения 1340 об/мин) [4], который подключался напрямую к бытовой однофазной сети. В зависимости от вида обрабатываемого материала у станка предусмотрено 6 скоростей вращения шпинделя, переключение которых осуществляется вручную переустановкой ремня на шкивы разного диаметра. Для этого необходимо отключать станок от сети, вскрывать верхний кожух, переставлять ремень, натягивать его [4]. Эта операция небезопасна и занимает значительное время, при изготовлении сложных изделий она многократно повторяется. Применение регулируемого электропривода с ПЧ существенно упростило

бы работу на данном станке, скорость вращения шпинделя было бы возможно задавать на панели управления и регулировать непосредственно во время сверления, без дополнительных остановок. Один ПЧ можно использовать для нескольких инструментов, что компенсирует стоимость его установки [3]. Во избежание удорожания установки предпочтительно подключать ПЧ к существующему двигателю, а не приобретать новый трехфазный.

Разработки преобразователя частоты и системы управления для двухфазного электропривода, исследования особенностей работы двухфазных двигателей переменного тока, анализ сферы применения регулируемых двухфазных приводов в тяговых механизмах на электротранспорте представлены в трудах Е.В. Качалиной, В.Я. Беспалова, М.И. Стальной. В публикациях зарубежных авторов [5-7] исследованы улучшенные алгоритмы управления широтно-импульсной модуляции для минимизации коммутаций ключами двух инверторов, питающих обмотки двухфазного двигателя. В этих работах не рассматривалась возможность применения стандартного трехфазного преобразователя частоты для управления двухфазным двигателем, что требует разработки нестандартных алгоритмов управления инвертором. Системы управления двухфазным двигателем на основе релейных регуляторов тока ранее не рассматривались, что определяет актуальность данного исследования.

## II. Материалы и методы

Однофазный двигатель имеет основную и вспомогательную обмотки [8] (рис. 1), при подключении к ПЧ фазосдвигающий конденсатор исключается из цепи, а фазовый сдвиг должен обеспечиваться специальным алгоритмом системы управления (СУ) [6, 7].

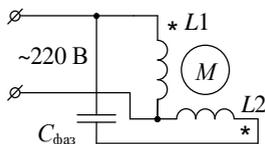


Рис. 1. Подключение однофазного коллекторного двигателя к сети

Fig. 1. Connection of a single-phase asynchronous motor to the power grid

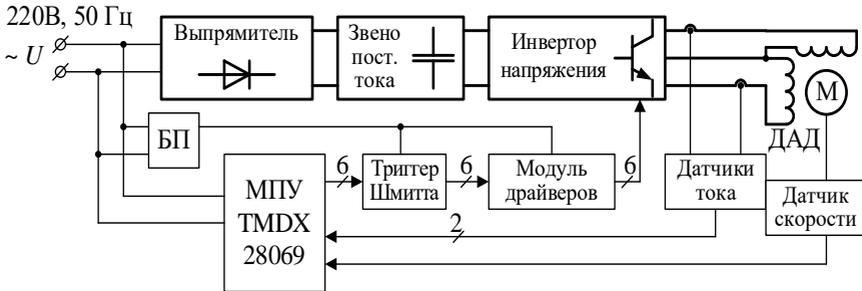
При подобном отдельном управлении от ПЧ основной и вспомогательной обмотками двигатель считается двухфазным асинхронным двигателем (ДАД). ДАД может подключаться к ПЧ с двух-, трех- или четырехстоечным инвертором напряжения. ПЧ с трехстоечным инвертором является обычным трехфазным ПЧ со специальным алгоритмом управления, он предпочтителен за счет меньшего числа полупроводников, чем у четырехстоечного инвертора, и подачи на ДАД большей полезной мощности, чем у двухстоечного [8, 9].

Самым простым и распространенным алгоритмом управления ДАД является синусоидальная широтно-импульсная модуляция (СШИМ). Она основана на сравнении высокочастотного опорного сигнала с синусоидальными сигналами задания токов и генерации управляющих сигналов для ключей инвертора на его основе [10, 11]. Другой популярный алгоритм управления ДАД – пространственно-векторная ШИМ (ПВШИМ). Ее принцип действия основан на определении действующих в данный момент времени пространственных векторов напряжений и расчете на их основе времени нахождения ключей инвертора в закрытом состоянии. СУ формирует управляющие сигналы по заранее определенным шаблонам коммутации. Данный способ управления позволяет достичь максимального напряжения обмоток двигателя с малыми гармоническими искажениями токов статора [7, 12, 13].

Еще один способ управления ДАД – применение релейных регуляторов тока (РРТ). В данной СУ сигналы задания токов сравниваются с обратной связью, а их разности поступают на релейные регуляторы, представленные гистерезисными блоками [14], мгновенные значения токов статора колеблются в пределах заданной зоны гистерезиса. При расширении пределов этих зон частота коммутации снижается, что весьма важно для мало-мощных устройств, поскольку высокая частота требует применения более мощных радиаторов охлаждения, что приводит к увеличению габаритов силовой части ПЧ и удорожанию изделий [15].

Экспериментальные исследования работы ДАД от трехфазного ПЧ с релейным алгоритмом управлением на основе РРТ, результаты теоретических исследований которого изложены авторами в [16-18], сравнивались с результатами работы того же электропривода, но с системой управления на основе СШИМ. Эксперименты проводились при работе двигателя на холостом ходу и при приложении переменной нагрузки на различных частотах в диапазоне от 10 до 100 % номинальной скорости.

Структурная схема электропривода на базе двухфазного двигателя и трехфазного ПЧ показана на рис. 2. Силовая часть состоит из мостового диодного выпрямителя; звена постоянного тока с конденсатором емкостью 2,2 мФ; инвертора напряжения, представленного шестью *IGBT*-транзисторами с обратными диодами; однофазного двигателя К-48 без фазосмещающего конденсатора. Рассчитанные номинальные токи двух фаз статора составили 1,8 А. После отключения конденсатора общая точка двух обмоток двигателя, ранее подключаемая к нейтрали сети, подключается к средней стойке инвертора, а начала обмоток подключаются к фазным стойкам: основная обмотка – к первой стойке, вспомогательная – к третьей.



**Рис. 2. Структурная схема электропривода на базе двухфазного двигателя и трехфазного ПЧ**

**Fig. 2. Structural diagram of an electric drive based on a two-phase motor and a three-phase frequency converter**

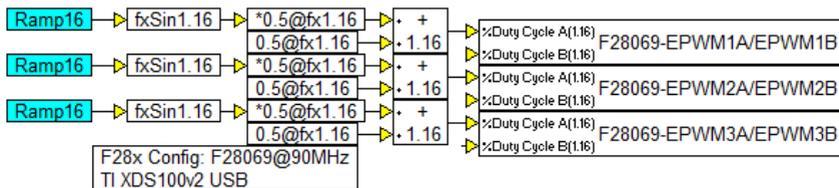
СУ включает в себя микропроцессорное устройство (МПУ) TMDX28069, которое выполняет типовую роль контроллера ПЧ. Данное устройство предназначено для обработки сигналов с датчиков токов двух фаз и служит для передачи управляющих сигналов на модуль драйверов ДР7120-П-А. Для согласования уровней напряжения между ними был включен триггер Шмитта. Для питания электроники применялся блок питания, выдающий напряжение 5 В и 15 В. На валу двигателя был установлен датчик скорости, представленный тахогенератором Д-4. Внешний вид основной части экспериментальной установки показан на рис. 3. Для нагрузки двигателя использовался механический тормоз.



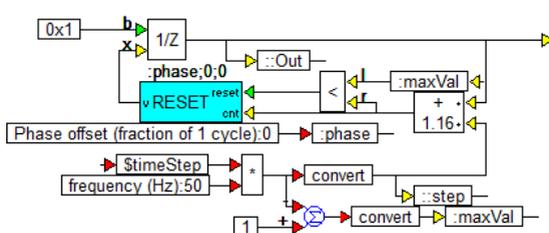
**Рис. 3. Внешний вид экспериментальной установки**

**Fig. 3. Appearance of the test bench**

Управляющая программа для МПУ представляет собой код, сгенерированный на основе компьютерной модели СШИМ, разработанной в программном продукте *EMBED SolidThinking* (рис. 4). Настройка блока ШИМ в системе управления с СШИМ представлена на рис. 5.



Модель СШИМ для трехфазного инвертора



Блок Ramp16 задания синусоиды тока одной фазы

**Рис. 4. Управляющая программа для системы управления двухфазным двигателем на основе синусоидальной ШИМ**

**Fig. 4. Control program for a two-phase motor control system based on sinusoidal PWM**

Компьютерная модель СШИМ состоит из блока настройки подключения к используемому МПУ и трех ветвей формирования ШИМ для ключей трех стоек инвертора. На блоки ШИМ поступают синусоидальные функции сигналов напряжения, формируемых в блоках *Ramp16*. Эти сигналы представляют собой интегралы по времени от требуемой частоты сети (50 Гц) с фазовыми смещениями и ограничением нарастания. В этой функции нет перевода в радианы, поэтому смещение сигналов задается как доля полного периода: 0, 0,25 и 0,5 для трех синусоид. После масштабирования синусоиды заданных напряжений подаются на входы блоков ШИМ, настройка которых позволяет формировать синусоидальную ШИМ с опорной частотой 4 кГц для ключей верхней группы и работой нижних ключей в протифазе с верхними.

PWM Unit: 1  Use High Res Timer

Time Base  
 Rate Scaling: None  Count Mode: Up  
 Timer Period: 22000 4.09091kHz  Change Period Dynamically

TBCTR=TBPHS on SYNC1 pulse TBPHS (phase): 0  
 Change Phase Dynamically EPWMSYNCO pin: GPIO0

EPWMSYNCO: EPWMSYNCO pin: Unused  
 CMPA Load On: CTR = Zero CMPB Load On: CTR = Zero

Action Qualifier:

	CMPA		CMPB		P	GPIO Pin
	Z	up down	up down	P		
EPWMA:	1	0 X	X X	X	X	GPIO0
EPWMB:	0	1 X	X X	X	X	GPIO1

Deadband:  
 Delay Mode: Disabled  
 Polarity: No Inversion  
 Input Select: DbA in = PWMA, DbB in = PWMA  
 Rising Edge Delay (0-1023): 0 Falling Edge Delay (0-1023): 0

Рис. 5. Настройка блока ШИМ в системе управления с СШИМ

Fig. 5. Settings of the PWM block in the control system of a two-phase asynchronous motor with sinusoidal PWM

Алгоритм управления ДАД на основе PPT был реализован на основе патента [16] и подробно описывался в [17, 18]. Он основан на принципе разделения одного периода синусоид на четыре равных участка в зависимости от знака мгновенных значений токов в обмотках двух фаз. На каждом из них определяется наиболее предпочтительный путь протекания токов через ключи инвертора и обмотки двигателя таким образом, чтобы поддерживать действующие знаки мгновенных токов максимально большое время. При обеспечении протекания токов по этому пути будет поддерживаться минимально возможная частота коммутаций. Наряду с основным контуром токов, для каждого из участков определяются еще три дополнительных контура, возникающих при переключении двух гистерезисных регуляторов тока. Отличие состоит в том, что в отдельных состояниях оба ключа одной стойки могут быть разомкнуты для минимизации частоты коммутаций. Всего возможно 16 контуров протекания токов, которые реализуются за счет 16 состояний ключей инвертора (табл. 1). Значения выходов гистерезисных блоков определяются как:

$$\begin{cases} I_{1a}^* - I_{1a} \geq h/2, & \Delta h_a = 1 \\ I_{1b}^* - I_{1b} \geq h/2, & \Delta h_b = 1 \end{cases}, \quad (1)$$

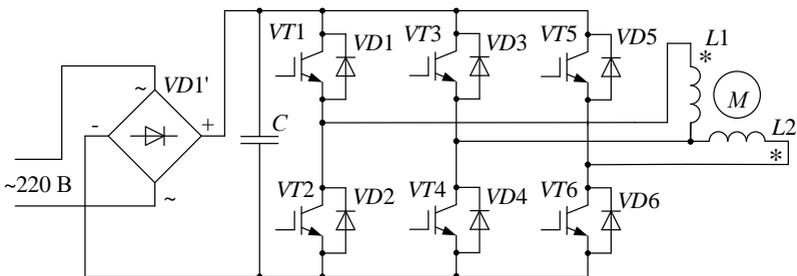
где  $h$  – устанавливаемая ширина зоны гистерезиса;  $\Delta h_a$ ,  $\Delta h_b$  – значения на выходах релейных регуляторов токов фаз  $a$  и  $b$  соответственно.

**Таблица 1.**  
Состояние ключей инвертора при РРТ

**Table 1.**  
Status of inverter switches for a control system with relay current controller

Участок синусоид токов	Состояния выходов гистерезисных блоков																											
	$\Delta h_a=1,$ $\Delta h_b=1$	$\Delta h_a=1,$ $\Delta h_b=0$	$\Delta h_a=0,$ $\Delta h_b=0$	$\Delta h_a=0,$ $\Delta h_b=1$																								
$I_a < 0,$ $I_b \geq 0$	<table border="1"><tr><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr></table>	0	0	1	0	1	0	<table border="1"><tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr></table>	0	0	0	0	1	1	<table border="1"><tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr></table>	0	1	0	1	0	1	<table border="1"><tr><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr></table>	0	0	1	1	0	0
0	0	1																										
0	1	0																										
0	0	0																										
0	1	1																										
0	1	0																										
1	0	1																										
0	0	1																										
1	0	0																										
$I_a \geq 0,$ $I_b \geq 0$	<table border="1"><tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr></table>	0	0	0	0	1	0	<table border="1"><tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr></table>	1	0	0	0	1	1	<table border="1"><tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr></table>	0	0	0	1	0	1	<table border="1"><tr><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr></table>	0	0	1	1	1	0
0	0	0																										
0	1	0																										
1	0	0																										
0	1	1																										
0	0	0																										
1	0	1																										
0	0	1																										
1	1	0																										
$I_a \geq 0,$ $I_b < 0$	<table border="1"><tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr></table>	1	0	1	0	1	0	<table border="1"><tr><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr></table>	1	1	0	0	0	1	<table border="1"><tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr></table>	0	1	0	0	0	0	<table border="1"><tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr></table>	0	0	0	1	1	0
1	0	1																										
0	1	0																										
1	1	0																										
0	0	1																										
0	1	0																										
0	0	0																										
0	0	0																										
1	1	0																										
$I_a < 0,$ $I_b < 0$	<table border="1"><tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr></table>	0	0	0	0	1	0	<table border="1"><tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr></table>	0	1	0	0	0	1	<table border="1"><tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr></table>	0	1	0	1	0	1	<table border="1"><tr><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr></table>	0	1	1	0	0	0
0	0	0																										
0	1	0																										
0	1	0																										
0	0	1																										
0	1	0																										
1	0	1																										
0	1	1																										
0	0	0																										

Значения в таблицах, расположенных в ячейках табл. 1, соответствуют состояниям ключей трехплечего инвертора, расположенным в локациях, соответствующих рис. 6. Состояния каждого из 6 ключей инвертора можно выразить через гистерезисные функции разницы мгновенных значений токов статора и их заданий (табл. 2). Реализация переключения этих функций и будет являться алгоритмом управления ДАД по принципам РРТ.



**Рис. 6.** Подключение двухфазного двигателя к трехфазному ПЧ

**Fig. 6.** Connection of a two-phase motor to a three-phase inverter

Таблица 2.  
Функции состояния ключей инвертора при PPT

Table 2.  
Inverter switches state functions for a control system with relay current controller

Номер ключа	Номер участка синусоид			
	1	2	3	4
VT1	$\Delta h_a \wedge \overline{\Delta h_b}$	$\Delta h_a$	0	0
VT2	$\Delta h_a$	$\overline{\Delta h_a} \wedge \Delta h_b$	$\overline{\Delta h_a}$	$\overline{\Delta h_a}$
VT3	0	$\overline{\Delta h_b}$	$\overline{\Delta h_a} \wedge \overline{\Delta h_b}$	$\overline{\Delta h_a} \wedge \overline{\Delta h_b}$
VT4	$\overline{\overline{\Delta h_a} \wedge \overline{\Delta h_b}}$	$\Delta h_b$	$\Delta h_a \wedge \Delta h_b$	$\overline{\overline{\Delta h_a} \wedge \overline{\Delta h_b}}$
VT5	$\Delta h_b$	$\Delta h_a \wedge \Delta h_b$	$\overline{\Delta h_a} \wedge \Delta h_b$	$\Delta h_b$
VT6	$\overline{\Delta h_b}$	$\overline{\Delta h_b}$	$\overline{\Delta h_b}$	$\overline{\Delta h_b}$

Управляющая программа в *EMBED SolidThinking* показана на рис. 7.

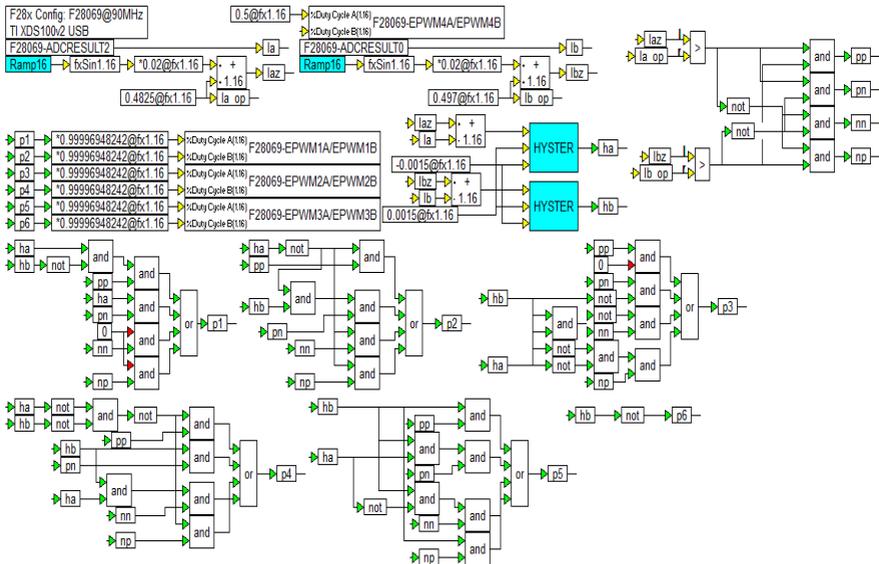


Рис. 7. Управляющая программа для системы управления двухфазным двигателем на основе релейных регуляторов тока

Fig. 7. Control program for a two-phase motor control system based on relay current controller

Настройка блока ШИМ для реализации РРТ показана на рис. 8. В этой программе заданные токи  $I_{az}$ ,  $I_{bz}$  сравниваются с опорными значениями с датчиков тока  $I_{a\_op}$ ,  $I_{b\_op}$ , которые считаются нулевыми. По знакам токов задания в этой системе координат определяется текущий участок синусоид из набора  $pp$ ,  $pn$ ,  $nt$ ,  $np$ . После включения ПЧ на аналоговые входы начинают поступать мгновенные значения токов двух фаз  $I_a$ ,  $I_b$ . Разницы заданных и фактических токов подаются на разработанные блоки гистерезисных регуляторов, выходами которых являются дискретные сигналы  $ha$ ,  $hb$ . Зона гистерезиса определена равной 5 % от амплитуды заданных синусоид. На основе рассчитываемых в МПУ значений  $pp$ ,  $pn$ ,  $nt$ ,  $np$  и  $ha$ ,  $hb$  по разработанному алгоритму РРТ формируются управляющие импульсы  $p_1$ , ...,  $p_6$  для ключей инвертора. Эти импульсы, пройдя через блоки конвертации, попарно поступают в блоки ШИМ цифровых выходов МПУ.

280x ePWM Properties

PWM Unit: 1  Use High Res Timer

Time Base  
Rate Scaling: None Count Mode: Up

Timer Period: 3000 30kHz  Change Period Dynamically

TBCTR=TBPHS on SYNC1 pulse TBPHS (phase): 0

Change Phase Dynamically EPWMSYNC1 pin: GPIO0

EPWMSYNC0: EPWMSYNC1 EPWMSYNC0 pin: Unused

CMPA Load On: CTR = Zero CMPB Load On: CTR = Zero

Action Qualifier:

	CMPA		CMPB		P	GPIO Pin
	Z	up	down	up	down	
EPWMA:	1	0	X	X	X	GPIO0
EPWMB:	1	X	X	0	X	GPIO1

Deadband:  
Delay Mode: Disabled

Polarity: No Inversion

Input Select: DbA in = PWMB, DbB in = PWMA

Rising Edge Delay (0-1023): 100 Falling Edge Delay (0-1023): 100

Рис. 8. Настройка блока ШИМ в системе управления ДАД с РРТ

Fig. 8. Settings of the PWM block in the control system of a two-phase asynchronous motor with relay current controller

### III. Результаты исследования

Сгенерированный компьютерный код для СШИМ и РРТ поочередно записывался в МПУ, после чего проводилась серия экспериментов регулирования скорости ДАД путем изменения частоты напряжения на выходе ПЧ при приложении к валу двигателя переменной нагрузки, изменяющейся от нуля до номинального значения. Были получены наборы характеристик для 50 Гц, 40 Гц, 30 Гц, 20 Гц, 10 Гц и 5 Гц, т.е. регулирование проводилось в

диапазоне от 10 до 100 % номинальной скорости. Графики токов двух фаз статора для СУ с ШИМ и с PPT представлены на рис. 9 и 10 соответственно, а на рис. 11 показано семейство электромеханических характеристик ДАД, выведенных в ходе регрессионного анализа снятых точек [19].

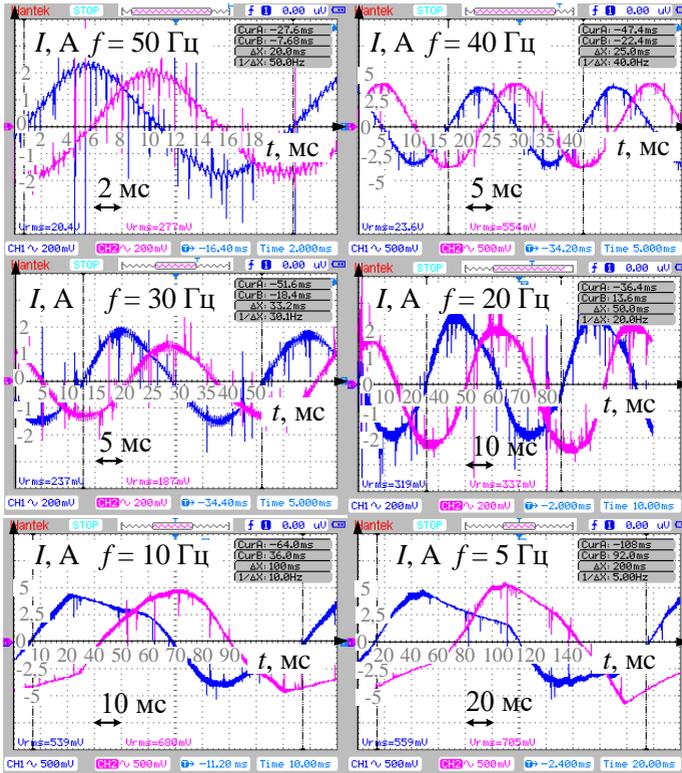


Рис. 9. Токи статора ДАД при управлении ШИМ

Fig. 9. Two-phase asynchronous motor stator currents for controlling with sinusoidal PWM

Поведение электромеханических характеристик у двухфазного двигателя, типовое для двигателей переменного тока при частотном регулировании, следующее: со снижением заданных частоты и напряжения, связанных по закону  $u/f = \text{const}$ , снижаются скорость идеального холостого хода и максимальный ток статора, характеристики опускаются вниз по оси ординат. На низких частотах значения пускового и максимального тока крайне малы, для обеспечения стабильной работы двигателя под нагрузкой в этой зоне требуется учет  $IR$ -компенсации в СУ.

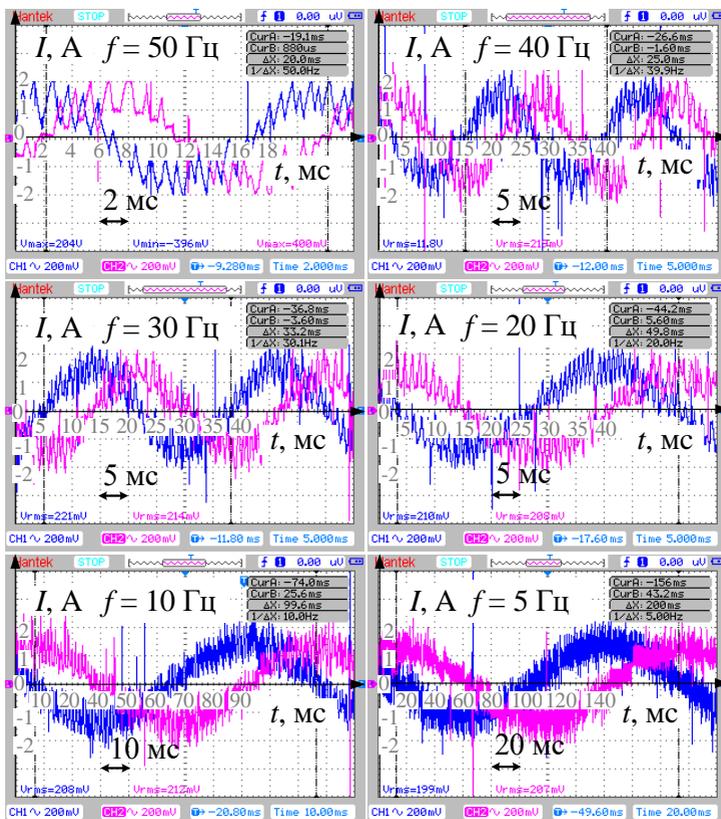


Рис. 10. Токи статора ДАД при управлении PPT

Fig. 10. Two-phase asynchronous motor stator currents for controlling with relay current controller

Графики переходных процессов показывают, что разработанный ПЧ обеспечивает регулирование ДАД с соблюдением заданной выходной частоты инвертора. При управлении по алгоритму ШИМ на частотах ниже 30 Гц начинаются гармонические искажения токов, на еще более низких частотах синусоиды сильно искривляются. Видно, что в этом случае коэффициент гармонического искажения превышает 10 %, что считается пределом нормального режима работы двигателя в сети [20]. При коэффициенте гармонического искажения больше 50 % работа с таким алгоритмом без фильтрокомпенсирующих устройств в зоне низких частот недопустима [21]. В алгоритме с PPT этого не происходит. При снижении частоты общая

форма токов статора остается синусоидальной, но увеличиваются мгновенные колебания внутри зоны гистерезиса. На частотах, близких к номинальным, частота коммутации ключей инвертора при алгоритме с PPT заметно ниже, поскольку мгновенные значения токов колеблются в достаточно широкой гистерезисной зоне.

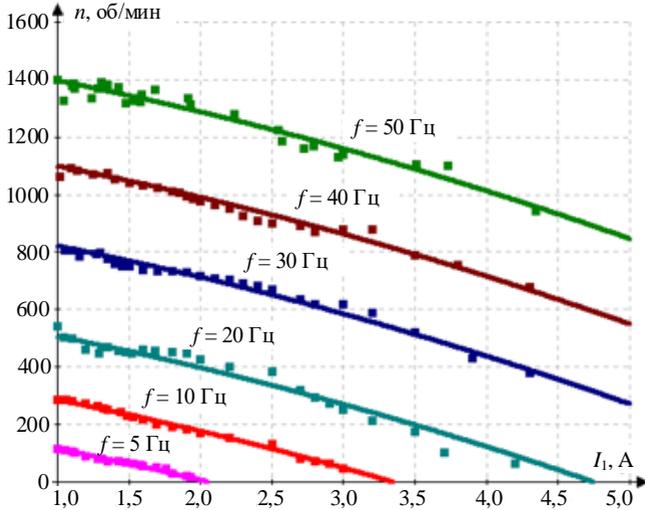


Рис. 11. Электромеханические характеристики двухфазного двигателя при регулировании частоты

Fig. 11. Electromechanical characteristics of a two-phase motor with frequency control

#### IV. Выводы

Обеспечение станков и маломощных устройств регулируемым двигателем ранее чаще всего рассматривалось как комплексная работа модернизации устройства с установкой трехфазного двигателя и преобразователя частоты. Однако такой подход не учитывал возможности регулирования скорости ранее установленных однофазных конденсаторных двигателей при подключении их к преобразователю частоты. Выполненные исследования показали, что альтернативным вариантом, использующим имеющийся двигатель, является применение преобразователя частоты с разработанным нестандартным алгоритмом управления.

© Мещеряков В.Н., 2023

© Белоусов А.С., 2023

© Гладышев В.Е., 2023

*Поступила в редакцию 21.03.2023*

*Принята к публикации 06.04.2023*

*Received 21.03.2023*

*Accepted 06.04.2023*

### **Библиографический список**

- [1] Белов В.М., Бренцис Э.А., Лейманис У.Я., Силиневич И.Я., Узарс В.Я., Феоктистов В.П. Электропривод ручного электроинструмента, патент SU 1771055 А1, заявл. 31.01.91; опубл. 23.10.92. – Бюл. № 39.
- [2] Новокшенов В.С., Цукублин Ф.Б. Синхронный бесщеточный преобразователь частоты // Известия Томского Ордена Трудового Красного Знамени Политехнического Института имени С.М. Кирова. 1965. Т. 132. С. 43-51.
- [3] Присмотров Н.И., Ларионов В.Н. Электропривод ручного электроинструмента по системе преобразователь частоты – асинхронный двигатель // Вестник Чувашского Университета. 2005. № 2. С. 181-189.
- [4] Лопухина Е.М. Асинхронные исполнительные микродвигатели для систем автоматики. М.: Высшая школа, 1988. – 328 с.
- [5] Ziaeiinejad S., Sangsefidi Y., Shoulaie A. Performance analysis of DTC methods of two-phase induction motors with different inverter topologies // proc. 2012 3rd Power Electronics and Drive Systems Technology (PEDSTC), Feb. 15-16, 2012, Tehran, Iran: IEEE, 2012. P. 121-126. DOI: 10.1109/PEDSTC.2012.6183310
- [6] Jang D.H. Problems incurred in a vector-controlled single-phase induction motor, and a proposal for a vector-controlled two-phase induction motor as a replacement // IEEE Transactions on Power Electronics. 2013. Vol. 28. No. 1. P. 526-536. DOI: 10.1109/TPEL.2012.2199772
- [7] Umredkar S., Junghare A. and Renge M. Operation of symmetrical and asymmetrical two-phase induction motor by using 3-leg voltage source inverter // Trends in Renewable Energy. 2018. Vol. 4. No. 3. P. 64-76. DOI: 10.17737/tre.2018.4.3.0057
- [8] Корвет 48. Станок вертикально-сверлильный. Руководство по эксплуатации. Артикул 90480 // ООО «ЭНКОР-Инструмент-Воронеж». [Электронный ресурс]. URL: <https://user-manuals.ru/manual/126429/enkor-korvet-48?ysclid=lgkra6adpb49571952> (дата обращения 15.02.2023).
- [9] Hayakwong E., Kinnares V. PV powered three-leg VSI fed asymmetrical parameter type two-phase induction motor // proc. 2014 17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Oct. 22-25, 2014, Hangzhou, China: IEEE, 2014. P. 3220-3225. DOI: 10.1109/ICEMS.2014.7014047
- [10] Томасов В.С., Усольцев А.А., Вертегел Д.А., Денисов К.М. Исследование пульсаций электромагнитного момента в прецизионном сервоприводе при синусоидальной широтно-импульсной модуляции // Научно-технический Вестник Информационных Технологий, Механики и Оптики. 2019. Т. 19. № 2. С. 359-368. DOI: 10.17586/2226-1494-2019-19-2-359-368
- [11] Тяпин А.А., Кинев Е.С. IGBT-инвертор с биполярной синусоидальной ШИМ для двухфазной линейной МГД-машины // Сборник научных трудов III Международ. науч.-практ. конф. «САПР и моделирование в современной электронике», Октябрь 24-25, 2019, Брянск, Россия: БГТУ, 2019. С. 96-102. DOI: 10.30987/conferencearticle\_5e028210dbc298.14572422

- [12] Ramesh V., Anjappa P., Swathi K.R., Reddy R.L., Sambasivarao B. Space vector pulse width modulation (SVPWM) using two leg inverter for split-phase induction motor // International Journal of Scientific & Engineering Research. 2014. Vol. 5. No. 5. P. 660-664.
- [13] Lin H., Zhao F., Kwon B. Space-vector PWM techniques for a two-phase permanent magnet synchronous motor considering a reduction in switching losses // Journal of Electrical Engineering & Technology. 2015. Vol. 10. No. 3. P. 905-915. DOI: 10.5370/JEET.2015.10.3.905
- [14] Мешеряков В.Н., Воеков В.Н. Векторная система управления вентильным электроприводом на базе автономного инвертора напряжения с релейным регулированием входного тока инвертора и фазных токов статора // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2017. Т. 17. № 2. С. 48-57. DOI: 10.14529/power170207
- [15] Dobrucki B., Laskody T., Konarik R. Two-phase inverters with minimum switching devices // Recent Developments on Power Inverters, Saghafinia A. Zagreb: IntechOpen, 2017. DOI: 10.5772/67743
- [16] Мешеряков В.Н., Белоусов А.С. Способ управления двухфазным электроприводом переменного тока с помощью трехфазного мостового инвертора. Пат. RU 2682242, заявл. 19.03.18; опубл. 18.03.19. – Бюл. № 8.
- [17] Мешеряков В.Н., Белоусов А.С. Разработка алгоритма управления трехфазным инвертором двухфазного электропривода для снижения числа коммутаций ключевых элементов // Вестник ИГЭУ. 2019. № 3. С. 49-61. DOI: 10.17588/2072-2672.2019.3.049-061
- [18] Belousov A.S., Meshcheryakov V.N., Valtchev S., Kryukov O.V. Development of a control algorithm for three-phase inverter in two-phase electric drives reducing the number of commutations // proc. 2019 1st International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA), Nov. 20-22, 2019, Lipetsk, Russia: IEEE, 2019. P. 444-449. DOI: 10.1109/SUMMA48161.2019.8947487
- [19] Дрейпер Н.Р., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. М.: Финансы и статистика, 1986. – 351 с.
- [20] Meshcheryakov V.N., Evseev A.M., Boikov A.L. Active energy filter for compensation of harmonic distortion in motor soft starter // proc. 2018 17th International Ural Conference on AC Electric Drives (ACED), Mar. 26-30, 2018, Ekaterinburg, Russia: IEEE, 2018. P. 1-5. DOI: 10.1109/ACED.2018.8341701
- [21] Valtchev S., Kryukov O.V., Meshcheryakov V.N., Belousov A.S. Comparative analysis of electric drives control systems applied to two-phase induction motors // proc. 2020 2nd International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA), Nov. 11-13, 2020, Lipetsk, Russia: IEEE, 2020. P. 918-922. DOI: 10.1109/SUMMA50634.2020.9280637

## References

- [1] V.M. Belov, E.A. Brentsis, U.Ya. Leimanis, I.Ya. Silinevich, V.Ya. Uzars and V.P. Feoktistov, “*Elektroprivod ruchnogo elektroinstrumenta [The electric drive of a hand-held power tool]*”, Patent SU 1771055 A1, Oct. 23, 1992 (in Russian).

- [2] V.S. Novokshenov and A.B. Tsukublin, “Sinhronnyj besshchetochnyj preobrazovatel' chastoty [Synchronous brushless frequency converter]”, *Izvestiya Tomskogo ordena trudovogo krasnogo znamenii politekhnicheskogo instituta imeni S.M. Kirova [Bulletin of the Tomsk Order of the Red Banner of Labor of the Polytechnic Institute named after S.M. Kirov]*, vol. 132, pp. 43-51, 1965 (in Russian).
- [3] N.I. Prysmotrov and V.N. Larionov, “Elektroprivod ruchnogo elektroinstrumenta po sisteme preobrazovatel' chastoty – asinhronnyj dvigatel' [The electric drive of a hand-held power tool according to the system frequency converter – asynchronous motor]”, *Vestnik Chuvashskogo Universiteta*, no. 2, pp. 181-189, 2005 (in Russian).
- [4] E.M. Lopukhina, *Asinhronnye ispolnitel'nye mikrodvigateli dlya sistem avtomatiki [Asynchronous executive micromotors for automation systems]*. Moscow: Higher school, 1988 (in Russian).
- [5] S. Ziaeinejad, Y. Sangsefidi and A. Shoulaie, “Performance analysis of DTC methods of two-phase induction motors with different inverter topologies,” in proc. *2012 3rd Power Electronics and Drive Systems Technology (PEDSTC)*, Feb. 15-16, 2012, Tehran, Iran, pp. 121-126. DOI: 10.1109/PEDSTC.2012.6183310
- [6] D.H. Jang, “Problems incurred in a vector-controlled single-phase induction motor, and a proposal for a vector-controlled two-phase induction motor as a replacement”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 28, no. 1, pp. 526-536, May 2013. DOI: 10.1109/TPEL.2012.2199772
- [7] S. Umredkar, A. Junghare and M. Renge, “Operation of symmetrical and asymmetrical two-phase induction motor by using 3-leg voltage source inverter”, *Trends in Renewable Energy*, vol. 4, no. 3, pp. 64-76, 2018. DOI: 10.17737/tre.2018.4.3.0057
- [8] Korvet 48. Stanok vertikal'no-sverlil'nyj. Rukovodstvo po ekspluatacii. Artikel 90480 [Korvet 48. Vertical drilling machine. Manual. Vendor code 90480]. [Online]. Available at: <https://user-manuals.ru/manual/126429/enkor-korvet-48?ysclid=lgkpa6adpb49571952> [Accessed: Feb. 15, 2023] (in Russian).
- [9] E. Hayakwong and V. Kinnares, “PV powered three-leg VSI fed asymmetrical parameter type two-phase induction motor”, in proc. *2014 17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, Oct. 22-25, 2014, Hangzhou, China, pp. 3220-3225. DOI: 10.1109/ICEMS.2014.7014047
- [10] V.S. Tomasov, A.A. Usoltsev, D.A. Vertegel and K.M. Denisov, “Study of electromagnetic torque pulsations in precision servo drives with sinusoidal pulse-width modulation”, *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, vol. 19, no. 2, pp. 359-368, 2019. DOI: 10.17586/2226-1494-2019-19-2-359-368
- [11] A.A. Tyapin and E.S. Kinev, “IGBT inverter with bipolar sinusoidal PWM for two phase linear MHD machine”, in proc. *III Int. scientific and practical conf. “CAD/EDA, Modeling and Simulation in Modern Electronics”*, Oct. 24-25, 2019, Bryansk, Russia, pp. 96-102 (in Russian). DOI: 10.30987/conferencearticle\_5e028210dbc298.14572422
- [12] V. Ramesh, P. Anjappa, K.R. Swathi, R.L. Reddy and B. Sambasivarao, “Space vector pulse width modulation (SVPWM) using two leg inverter for split-phase induction motor,” *International Journal of Scientific & Engineering Research*, vol. 5, no. 5, pp. 660-664, May 2014.

- [13] H. Lin, F. Zhao and B. Kwon, "Space-vector PWM techniques for a two-phase permanent magnet synchronous motor considering a reduction in switching losses", *Journal of Electrical Engineering & Technology*, vol. 10, no. 3, pp. 905-915, May 2015. DOI: 10.5370/JEET.2015.10.3.905
- [14] V.N. Meshcheryakov and V.N. Voekov, "Rectifier drive vector control system based on self-commutated voltage inverter with relay regulator of input inverter current and current on stator phases", *Bulletin of the South Ural State University. Series: Power Engineering*, vol. 17, no. 2, pp. 48-57, 2017. DOI: 10.14529/power170207
- [15] B. Dobrucku, T. Laskody and R. Konarik, "Two-phase inverters with minimum switching devices", in *Recent Developments on Power Inverters*, A. Saghafinia, Zagreb: Intech Open, 2017. DOI: 10.5772/67743
- [16] V.N. Meshcheryakov and A.S. Belousov, "Two-phase AC drive controlling method using the three-phase bridge inverter", Patent RU 2682242 C1, Mar. 18, 2019.
- [17] V.N. Meshcheryakov and A.S. Belousov, "Development of a control algorithm for the three-phase inverter of the two-phase electric drive for reducing the number of switching elements", *Vestnik IGEU*, no. 3, pp. 49-61, 2019. DOI: 10.17588/2072-2672.2019.3.049-061
- [18] A.S. Belousov, V.N. Meshcheryakov, S. Valtchev and O.V. Kryukov, "Development of a control algorithm for three-phase inverter in two-phase electric drives reducing the number of commutations", in proc. *2019 1st International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA)*, Nov. 20-22, 2019, Lipetsk, Russia, pp. 444-449. DOI: 10.1109/SUMMA48161.2019.8947487
- [19] N.R. Draper and G. Smith, *Applied Regression Analysis*. Moscow: Finance and statistics, 1986.
- [20] V.N. Meshcheryakov, A.M. Evseev and A.I. Boikov, "Active energy filter for compensation of harmonic distortion in motor soft starter", in proc. *2018 17th International Ural Conference on AC Electric Drives (ACED)*, Mar. 26-30, 2018, Ekaterinburg, Russia, pp. 1-5. DOI: 10.1109/ACED.2018.8341701
- [21] S. Valtchev, O.V. Kryukov, V.N. Meshcheryakov and A.S. Belousov, "Comparative analysis of electric drives control systems applied to two-phase induction motors", in proc. *2020 2nd International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA)*, Nov. 11-13, 2020, Lipetsk, Russia, pp. 918-922. DOI: 10.1109/SUMMA50634.2020.9280637

**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ**  
**INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

**Мещеряков Виктор Николаевич**, доктор технических наук, профессор Липецкого государственного университета, г. Липецк, Российская Федерация

**Viktor N. Meshcheryakov**, D. Sci. (End.), head of the chair of the Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russian Federation

**Белоусов Алексей Сергеевич**, кандидат технических наук, ассистент Липецкого государственного технического университета, г. Липецк, Российская Федерация

**Aleksey S. Belousov**, Cand. Sci. (End.), assistant of the Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russian Federation

**Гладышев Владислав Евгеньевич**, аспирант Липецкого государственного технического университета, г. Липецк, Российская Федерация

**Vladislav E. Gladyshev**, postgraduate student of the Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russian Federation

УДК 621.311.68

DOI 10.46960/2658-6754\_2023\_3\_23

## СТАБИЛИЗИРОВАННЫЙ ИСТОЧНИК БЕСПЕРЕБОЙНОГО ПИТАНИЯ С ГИБРИДНЫМ ДЕЛЬТА-ТРАНСФОРМАТОРОМ

**Д.А. Ульянов**

ORCID: 0000-0002-3328-8675 e-mail: [klinkswww@mail.ru](mailto:klinkswww@mail.ru)

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева  
*Нижний Новгород, Россия*

**Н.Н. Вихорев**

ORCID: 0000-0003-0145-4437 e-mail: [nvikhorev@gmail.com](mailto:nvikhorev@gmail.com)

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева  
*Нижний Новгород, Россия*

Предложена структурно-функциональная схема источника бесперебойного питания (ИБП) с применением гибридного сетевого трансформатора, способного функционировать как в серийном включении в режиме стабилизации, так и в шунтовом (параллельном) включении в режиме автономного электропитания. Проанализированы режимы стабилизации параметров электроэнергии в линиях низкого напряжения, а также переходные процессы при нарушении питания от электросети и переходе к работе от аккумуляторной батареи. Приведены поясняющие диаграммы для опционального режима компенсации реактивной мощности. Исследования выполнены с применением имитационной компьютерной модели, разработанной в *Matlab Simulink*. Получены зависимости динамики переходного процесса при переключении на автономное электропитание от параметров нагрузки, зависимость отклонения напряжения на выходе устройства в режиме стабилизации от параметров сетевого напряжения и нагрузки, а также временные диаграммы распределения составляющих потока мощности в режиме компенсации. Проанализировано быстрое действие ИБП при сбое электропитания, а также в режиме стабилизации сетевого напряжения.

**Ключевые слова:** автономное электропитание, гибридный контактор, гибридный трансформатор, дельта преобразование, источник бесперебойного питания, компенсация реактивной мощности, корректор коэффициента мощности, ответственный потребитель, стабилизация напряжения.

**Для цитирования:** Ульянов Д.А., Вихорев Н.Н. Стабилизированный источник бесперебойного питания с гибридным дельта-трансформатором // Интеллектуальная Электротехника. 2023. № 3. С. 23-37. DOI: 10.46960/2658-6754\_2023\_3\_23

# STABILIZED UNINTERRUPTIBLE POWER SUPPLY WITH HYBRID DELTA TRANSFORMER

**D.A. Ulyanov**

ORCID: **0000-0002-3328-8675** e-mail: **klinkswwww@mail.ru**  
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev  
*Nizhny Novgorod, Russia*

**N.N. Vikhorev**

ORCID: **0000-0003-0145-4437** e-mail: **nnvikhorev@gmail.com**  
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev  
*Nizhny Novgorod, Russia*

**Abstract.** A structural and functional scheme of an uninterruptible power supply (UPS) with a hybrid network transformer was developed. It is able to operate as a voltage-boosting transformer in stabilization mode, and as a parallel transformer in autonomous mode. The possibility of electricity parameters stabilization in low-voltage networks, as well as the transient in the event of a power failure from the mains and the transition to battery operation were analyzed. Diagrams are provided for the optional reactive power compensation mode. The studies have been carried out using a Matlab Simulink model. The dependences of the dynamics of the transient on the load parameters, the voltage deviation at the output of the device on the parameters of the mains voltage and load were obtained. The analysis of the UPS performance in two modes was carried out: compensation and autonomous.

**Keywords:** autonomous power supply, delta conversion, hybrid contactor, hybrid transformer, power factor corrector, reactive power compensation, responsible consumer, uninterruptible power supply, voltage stabilization.

**For citation:** D.A. Ulyanov and N.N. Vikhorev, “Stabilized uninterruptible power supply with hybrid delta transformer”, *Smart Electrical Engineering*, no. 3, pp. 23-37, 2023. DOI: 10.46960/2658-6754\_2023\_3\_23

## I. Введение

Электропитание ответственных потребителей в настоящее время содержит, помимо систем внешнего электроснабжения, системы гарантированного электропитания (СГЭ). СГЭ предназначена для автономного питания ответственных потребителей при сбоях электроснабжения от основных источников или отклонения показателей качества электрической энергии за пределы допустимых значений. В качестве подсистемы СГЭ выступает система бесперебойного электроснабжения (СБЭ), способная обеспечивать электропитание ответственных потребителей в случаях возникновения сбоев в электрической сети (прерываний, провалов напряжений и т.д.) на

время, определяемое количеством запасенной энергии в резервных накопителях (аккумуляторы, конденсаторы и т.д.) [1]. Наиболее распространенным типом источников бесперебойного питания (ИБП) является резервный, который отличается низкими динамическими свойствами и отсутствием функции стабилизации питающего напряжения, однако имеет достаточно высокий КПД (более 90 %) и низкую стоимость. Область применения данного типа ИБП в основном ограничена приборами малой мощности (до 500 Вт) и не позволяет использовать его для питания ответственных потребителей, требовая к качеству питающего напряжения которых могут быть выше, чем обеспечивает ГОСТ 32144-2013. Схемотехника резервных ИБП не предусматривает стабилизацию выходного напряжения, однако возможно последовательное включение с дополнительным стабилизатором в ущерб массогабаритным показателям конструкции и КПД [2, 3].

Для питания ответственных потребителей мощностью более 3 кВт подходят ИБП линейно-интерактивного типа с сетевым трансформатором с регулировочными отводами. Линейно-интерактивная схема отличается высокой скоростью переключения на автономное питание, наличием только одного преобразователя, работающего как в режиме зарядного устройства аккумуляторной батареи (АКБ) от сети, так и в режиме инвертора от АКБ при сбое электросети. Данный тип ИБП обеспечивает стабилизацию сетевого напряжения путем переключения регулировочных отводов трансформатора с помощью тиристорных ключей, однако такой способ стабилизации является дискретным, а также отрицательно влияет на форму выходного напряжения и потребляемого тока [4-6].

Перечисленных выше недостатков лишена схема ИБП с двойным преобразованием электроэнергии, которая позволяет стабилизировать напряжение на нагрузке за счет формирования инвертором выходного напряжения с заданными параметрами действующей величины, частоты и формы [7]. Таким образом, напряжение на нагрузке стабилизируется при отклонениях действующей величины и частоты, а форма выходного напряжения максимально приближена к синусоидальной вне зависимости от формы питающего напряжения, в спектре которого могут присутствовать гармонические составляющие. Поскольку между сетью и нагрузкой последовательно включен выпрямитель, рассчитанный на полную мощность нагрузки, его выполнение по схемотехнике активного выпрямителя позволяет формировать кривую входного тока устройства таким образом, что при любом типе нагрузки ток, потребляемый ИБП, будет синусоидальным и квази-активным, что улучшает электромагнитную совместимость устройства с питающей сетью и автономными источниками питания, в частности, дизель-генераторными установками [8]. Однако при перечисленных преимуществах данный тип ИБП имеет существенный недостаток, заключаю-

щийся в протекании полного потока мощности через выпрямитель и инвертор в режиме стабилизации, что сопровождается повышенными тепловыми потерями на полупроводниковых элементах, повышенными габаритными показателями охлаждающего оборудования, и, соответственно, пониженной эффективностью преобразователя в целом [9].

Таким образом, разработка ИБП, контур стабилизации которого работает только на мощность регулирования, обладает высокими динамическими свойствами и позволяет корректировать коэффициент мощности сети, является актуальной задачей.

## II. Разработка структурно-функциональной схемы

Известно схемотехническое решение ИБП на базе дельта-преобразователя, позволяющее в режиме стабилизации сетевого напряжения работать только на мощность регулирования [10]. Данный тип ИБП представляет собой линейно-интерактивную схему, контур стабилизации которой построен на базе дельта-преобразователя, представляющем собой четырехквadrантный инвертор и вольтодобавочный трансформатор, рассчитанные на мощность регулирования [11]. При использовании низковольтной батареи данная конструкция будет включать, помимо вольтодобавочного, сетевой согласующий трансформатор, подключенный к выходу основного силового инвертора, что увеличивает массогабаритные показатели устройства.

Путем гибридизации вольтодобавочного и сетевого трансформаторов получена новая схемотехника ИБП (рис. 1). Она включает зарядное устройство, выполненное на 20 % мощности нагрузки по схемотехнике импульсного блока питания с корректором коэффициента мощности (ККМ) [12], АКБ напряжением 48 В [13], мостовой силовой инвертор напряжения, гибридный дельта-трансформатор, рассчитанный на полную мощность нагрузки и имеющий отвод на стороне высокого напряжения, два гибридных контактора, размещенных во входной и выходной цепях. Предложенная топология устройства отличается от приведенных выше аналогов уменьшенной металлоемкостью, повышенной энергоэффективностью при сохранении широкого спектра функциональных возможностей.

Номинальный режим работы устройства заключается в формировании на нагрузке напряжения с действующей величиной  $220 \text{ В} \pm 1,5 \%$  путем стабилизации сетевого напряжения с допустимым отклонением в диапазоне  $\pm 10 \%$ . Компенсация отклонений сетевого напряжения происходит за счет формирования на регулировочной ступени обмотки трансформатора электродвижущей силы (ЭДС) заданной величины, синфазно при повышении и в противофазе при понижении напряжения. Дополнительная ЭДС, введенная последовательно в контур (сеть – ключ  $S1$  – регулировочная ступень – нагрузка), создается за счет протекания тока в первичной обмотке трансформатора от питающей сети через двойное преобразование, работающее на мощность регулирования. Динамические свойства контура стабилизации

ограничены частотой работы полупроводниковых ключей основного силового инвертора, постоянной времени выходного фильтра и индуктивностью регулировочной ступени трансформатора.

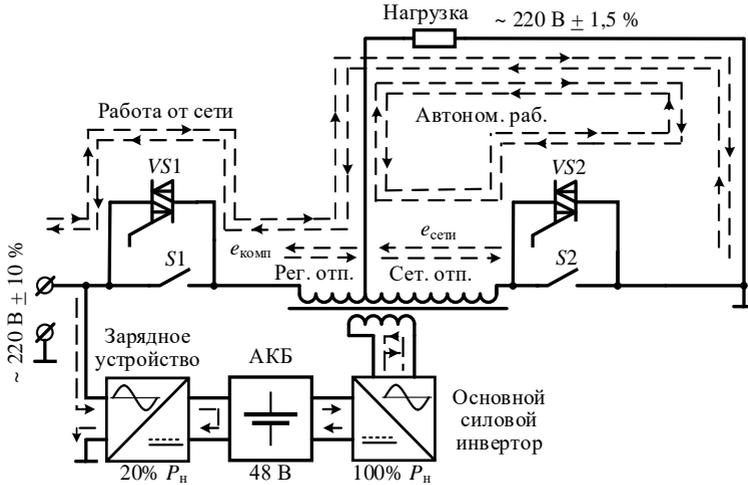


Рис. 1. Гибридная схемотехника ИБП на базе дельта-трансформатора

Fig. 1. Hybrid UPS circuitry based on a delta transformer

При выходе мгновенного значения питающего напряжения из зоны регулирования устройство переходит в режим работы от батареи. При этом ключ  $S1$  размыкается, и вступает в работу симистор  $VS2$ . Основной поток мощности продолжает протекать уже по контуру: АКБ – основной силовой инвертор – первичная обмотка трансформатора – сетевая часть вторичной обмотки гибридного дельта-трансформатора – симистор  $VS2$  – нагрузка. Как только ключ  $S1$  разомкнется, ключ  $S2$  шунтирует симистор  $VS2$  при минимальной величине напряжения, и устройство входит в установившийся режим работы. Если напряжение сети исчезло не полностью, а просело по величине ниже допустимых отклонений, зарядное устройство может продолжать работать на основной силовой инвертор совместно с АКБ [14]. При достижении действующего значения сетевого напряжения за заданное время (например, за период сетевого напряжения) до диапазона стабилизации система управления возвращает преобразователь в исходное состояние. При этом ключ  $S2$  размыкается, и вступает в работу симистор  $VS1$ . Основной поток мощности продолжает протекать в нагрузку от электросети через регулировочную ступень вторичной обмотки дельта-трансформатора. Как только ключ  $S2$  разомкнется, ключ  $S1$  шунтирует симистор  $VS1$  при мини-

мальной величине напряжения, и устройство входит в установившийся режим работы, потребляя мощность от сети. Работа по действующей величине позволяет исключить многократные срабатывания при кратковременных бросках напряжения. Условие возвращения ИБП в режим работы от сети при минимальной величине напряжения позволяет осуществить переключение контакторов в менее нагруженных условиях, исключив перенапряжения. Поясняющая режимы работы диаграмма изображена на рис. 2.

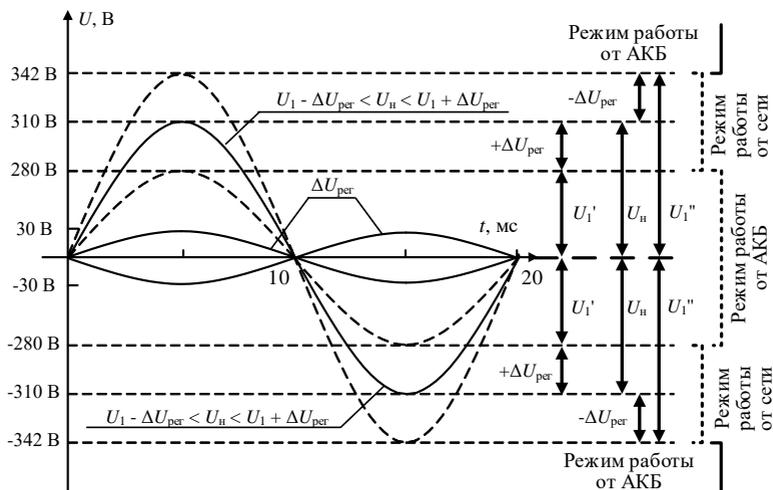


Рис. 2. Диапазоны напряжений, при которых производится переход между режимами работы ИБП

Fig. 2. Voltage ranges at which the transition between UPS operation modes is performed

Также данная схемотехника позволяет реализовать коррекцию коэффициента мощности сети при работе на реактивную нагрузку за счет регулирования вводимой ЭДС не только по амплитуде, но и по фазовому смещению относительно сетевого напряжения [15]. При этом реактивная мощность сети замыкается в контуре между нагрузкой и силовым инвертором напряжения. Таким образом, область регулирования ограничена в пределах, зависящих от мощности основного силового инвертора и максимальной амплитуды ЭДС, вводимой в контур регулирования. Так как основной силовой инвертор выполняется на полную мощность нагрузки, главным ограничением, накладываемым на величину угла компенсации реактивной мощности, является амплитуда вводимой ЭДС, которая зависит от напряжения АКБ или соотношения витков вольтодобавочной части вторичной и первичной обмотки. Поясняющая диаграмма представлена на рис. 3.

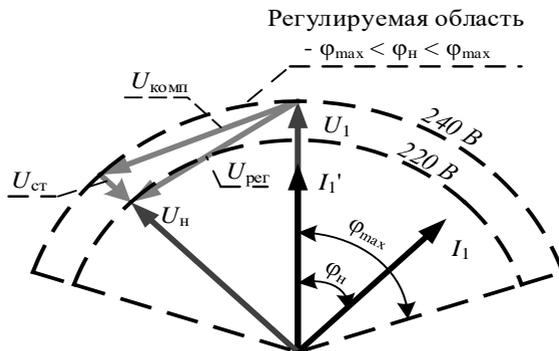


Рис. 3. Векторная диаграмма, поясняющая режим компенсации реактивной мощности

Fig. 3. Vector diagram explaining the reactive power compensation mode

Предлагаемая схемотехника ИБП позволяет дополнительно реализовать режим компенсации высших гармонических составляющих напряжения сети. Принцип работы корректора напряжения заключается в формировании и передаче в систему электроснабжения напряжения вольтодобавки, которое находится в противофазе с высшими гармониками напряжения сети. Таким образом, форма напряжения на нагрузке может не зависеть от формы питающего напряжения [16, 17]. Данное устройство может быть выполнено по однофазной топологии на мощность до 10 кВт, по трехфазной топологии до 100 кВт, и дальнейшее увеличение мощности возможно за счет построения модульной конструкции. Далее представлены результаты исследования работы данного типа ИБП на мощность нагрузки 5 кВт.

### III. Определение параметров

#### статических и динамических режимов работы ИБП

В среде *Matlab Simulink* разработана имитационная модель предлагаемого ИБП (рис. 4). Она позволяет оценить параметры переходных и статических процессов для основных режимов работы устройства:

- переключение питания с электросети на АКБ и обратно;
- стабилизация сетевого напряжения;
- компенсация реактивной мощности сети.

Модель содержит следующие основные блоки:

- модель однофазного источника напряжения, действующее значение которого отклоняется в пределах 10 %, а также искусственно формируется провал напряжения до величины 50 % от номинальной;

- модель ИБП, в состав которого входят модели: сетевого трансформатора с демфирующими RC-цепями, подключенными параллельно вторичным обмоткам; гибридных контакторов; выходного Г-образного фильтра; АКБ и инвертора; при этом зарядное устройство не моделируется для сокращения времени моделирования; измерительные приборы;
- модель системы управления;
- модель нагрузки.

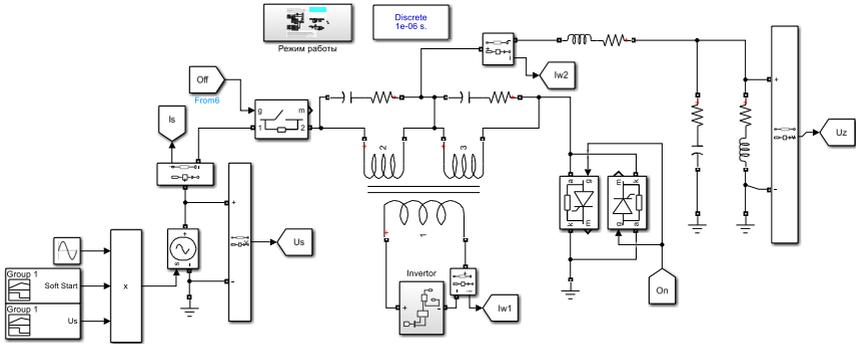


Рис. 4. Модель ИБП на базе гибридного трансформатора в *Simulink*

Fig. 4. UPS model based on hybrid transformer in *Simulink*

Модель системы управления представлена на рис. 5.

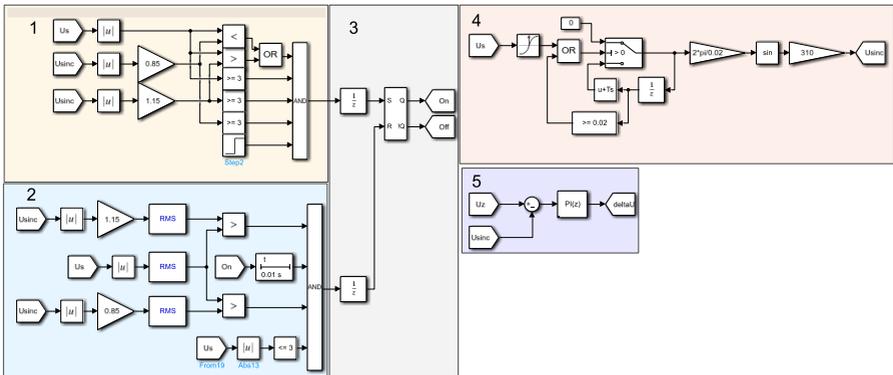


Рис. 5. Имитационная модель системы управления режимами работы

Fig. 5. Simulation model of the control system

*Блок 1* системы управления контролирует мгновенное значение сетевого напряжения и следит за тем, чтобы напряжение сети было не меньше, чем пониженное на 10 % опорное напряжение, и не больше, чем повышенное на 10 % опорное напряжение. В случае невыполнения хотя бы одного из этих условий блок 1 формирует сигнал на переход в автономный режим работы в момент времени, когда напряжение на контакторах имеет низкое значение.

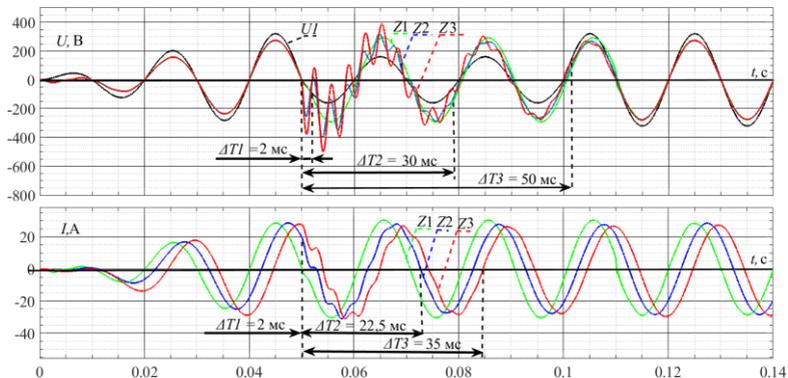
*Блок 2* контролирует действующее значение сетевого напряжения и следит за тем, чтобы напряжение сети находилось в диапазоне между повышенным и пониженным на 10 % опорным напряжением. В случае выполнения условия блок 2 формирует сигнал на возврат устройства в режим работы от сети в момент времени, когда напряжение на контакторах минимально. Возврат в режим работы от сети после перехода в автономный режим выполняется по истечении минимального заданного промежутка времени работы.

*Блок 3* представляет собой триггер, выходной сигнал которого определяет режим работы устройства и, соответственно, состояние входного и выходного гибридных контакторов. Сигнал на установку триггера подает блок 1 в случае сбоя электросети, а сигнал на сброс триггера подает блок 2 в случае восстановления напряжения электросети до допустимых значений.

Цепь формирования опорного напряжения представлена в блоке 4 и содержит генератор синусоиды частотой 50 Гц с заданной величиной выходного напряжения 220 В. Формируемый синус синхронизирован с сетью при наличии напряжения в сети за счет внешнего сигнала сброса внутреннего счетчика. При сбое питающего напряжения внутренний счетчик сбрасывается по цепи обратной связи. Алгоритм стабилизации напряжения на нагрузке представлен в блоке 5. Он состоит из сумматора, на вход которого поступают опорное напряжение со знаком плюс и напряжение на нагрузке со знаком минус. Затем сигнал ошибки усиливается пропорционально-интегральным регулятором, коэффициенты которого  $K_{пр} = 5$ ,  $K_{инт} = 2$ . Моделирование переходных процессов при сбое электросети и питания ИБП от АКБ, а также возврата устройства в исходное состояние происходит для активно-индуктивной нагрузки. Семейство временных диаграмм токов и напряжений нагрузки для данного режима приведены на рис. 6.

В момент спада питающего напряжения в 2 раза напряжение на нагрузке не пропадает, но имеет некие гармонические искажения в течение переходного процесса. При активно-индуктивной нагрузке с преобладающей активной частью переходный процесс длится 2 мс и сопровождается отклонением напряжения от номинального на 5 %, что допустимо для питания чувствительной критической нагрузки. При равных активных и индуктивных составляющих переходный процесс длится 30 мс и сопровождается отклонениями в 50 %. При преобладании индуктивной составляющей над

активной переходный процесс длится 50 мс и сопровождается отклонениями в 100 %.

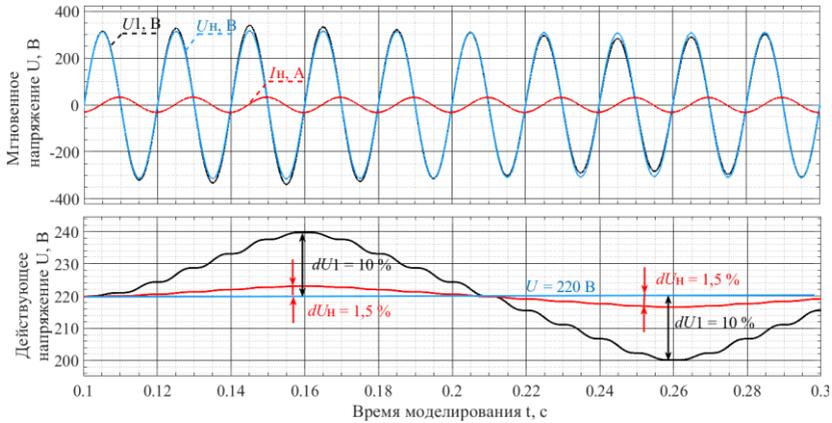


**Рис. 6. Временные диаграммы переходных процессов токов и напряжений на нагрузке для сопротивлений:**  
 $Z_1$  – 10 Ом, 2 эл. гр.;  $Z_2$  – 10 Ом, 45 эл. гр.;  $Z_3$  – 10 Ом, 88 эл. гр.

**Fig. 6. Timing diagrams of transient currents and voltages on the load for resistances:  $Z_1$  – 10 Ohm, 2°;  $Z_2$  – 10 Ohm, 45°;  $Z_3$  – 10 Ohm, 88°**

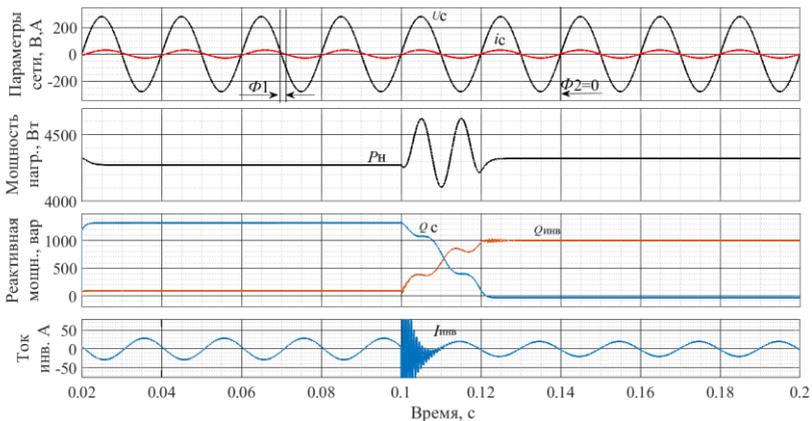
Согласно полученным результатам, устройство позволяет питать нагрузку особого назначения активно-индуктивного характера с преобладающей активной составляющей, а также нагрузку общего назначения активно-индуктивного характера с выраженной индуктивной составляющей. Данный режим является наиболее тяжелым для большинства источников бесперебойного питания, однако, несмотря на это, предлагаемое решение справляется с процессом переключения. Процесс стабилизации сетевого напряжения проводится для нагрузки активно-индуктивного характера, номинальное значение которой 10 Ом и угол 88 эл. гр. На рис. 7 представлены временные диаграммы напряжения нагрузки, сети, а также тока сети/нагрузки. На интервале времени моделирования действующее значение сетевого напряжения изменяется от 0 до +10 % и затем в обратную сторону от 0 до –10 %.

ИБП следит за мгновенным значением сетевого напряжения и формирует реакцию на отклонения от заданной формы, тем самым стабилизируя напряжение на нагрузке так, что максимальное отклонение составляет не более 1,5 % действующего значения напряжения сети при 10 % отклонении номинального значения сетевого напряжения. Таким образом, ИБП, помимо стабилизации действующего значения напряжения, также выполняет роль фильтра гармонических составляющих и обеспечивает защиту ответственного потребителя от высокочастотных флуктуаций в сети.



**Рис. 7. Временные диаграммы установившегося режима работы ИБП от сети**

**Fig. 7. Timing diagrams of the steady state operation of the UPS from the network**



**Рис. 8. Временные диаграммы режима работы компенсации реактивной мощности**

**Fig. 8. Time diagrams of the operation mode of reactive power compensation**

Режим компенсации реактивной мощности сети исследуется для нагрузки активно-индуктивного характера, номинальное сопротивление которой 10 Ом и фазовый угол сдвига 5 эл. гр. Малый фазовый угол сдвига нагрузки объясняется ограничением напряжения АКБ до 48 В. Диапазон может быть расширен за счет увеличения напряжения АКБ. Временные диаграммы приведены на рис. 8.

Быстрый процесс перехода из режима стабилизации сетевого напряжения в режим компенсации реактивной мощности сопровождается переходным процессом тока в цепи инвертора. Длительность переходного процесса, а также амплитуда колебаний могут быть снижены за счет снижения скорости перехода из одного режима в другой путем плавного изменения как амплитуды, так и фазового угла вводимой ЭДС. При установившемся режиме реактивная составляющая тока, потребляемого из сети, снижается посредством замыкания контура ее протекания в основном силовом инверторе.

#### IV. Заключение

Анализ тематической литературы показывает, что проблема построения ИБП, контур стабилизации которого работает только на мощность регулирования, рассматривалась достаточно широко. В то же время ряд вопросов повышенной металлоемкости аналогов ИБП на базе дельта-преобразователя в связи с применением двух сетевых трансформаторов в одном устройстве остается малоизученным. Построение ИБП на базе гибридного дельта-трансформатора является перспективным решением, позволяющим уменьшить металлоемкость, а также реализовать ряд режимов работы, при которых напряжение на нагрузке стабилизируется с высокой динамикой и низким расходом энергии, реактивная мощность замыкается в основном силовом инверторе, дополнительно не нагружая сеть, а в случае сбоя электросети происходит динамическое переключение на резервное питание от АКБ. Результаты имитационного моделирования показывают, что ИБП на базе гибридного дельта-трансформатора позволяет питать нагрузку особого назначения активно-индуктивного характера с сохранением высоких динамических и энергетических показателей. Компенсация реактивной мощности ограничена в некоторых пределах и может быть расширена за счет применения вместо низковольтной АКБ накопителя электроэнергии с большим значением напряжения.

© Ульянов Д.А., 2023

© Вихорев Н.Н., 2023

*Поступила в редакцию 17.01.2023*

*Принята к публикации 28.04.2023*

*Received 17.01.2023*

*Accepted 28.04.2023*

#### Библиографический список

- [1] Карагодин В.В., Полянский К.А. Методика построения системы гарантированного электроснабжения специального объекта на базе статических источников бесперебойного питания // Труды Военно-Космической Академии имени А.Ф. Можайского. 2018. № 663. С 115-120.

- [2] Карагодин В.В., Полянский К.А., Ревяков Б.А. Оптимизация параметров дизель-генераторных установок и источников бесперебойного питания в системах гарантированного электроснабжения // Труды Военно-Космической Академии имени А.Ф. Можайского. 2019. № 669. С. 246-253.
- [3] Коробко Г.И., Лебедев В.В., Ахлестин П.В. Использование принципа вольтодобавки для компенсации нелинейных искажений напряжения // Вестник ВГАВТ. 2015. № 43. С. 305-309.
- [4] Носков Д.Д., Аверин С.В. Модульный принцип построения ИБП // Сб. тезисов докладов XLIV Межд. молод. науч. конф. «Гагаринские чтения – 2018», Апрель 17–20, 2018, Москва-Байконур-Ахтубинск, Россия. М.-Байконур-Ахтубинск: МАИ, 2018. Т.2. С. 313.
- [5] Сироткин Д. Как российское решение на базе AR-технологий помогает «ТА-НЕКО» обеспечить надежность источников бесперебойного питания на заводе // Энергетическая Политика. 2022. № 12(178). С. 35-39.  
DOI: 10.46920/2409-5516\_2022\_12178\_35
- [6] Гельман М.В., Дудкин М.М., Преображенский К.А. Преобразовательная техника. Челябинск: ЮУрГУ, 2009. – 425 с.
- [7] Яцынин П.В., Дьяченко Р.А., Чалов Р.В., Серeda А.Л. Анализ промышленных источников бесперебойного питания // Сб. науч. статей VI Межд. науч.-практ. конф. «Научные чтения имени профессора Н.Е. Жуковского», Декабрь 17–18, 2015, Краснодар, Россия. Краснодар: ООО «Издательский Дом – Юг», 2016. С. 118-120.
- [8] Самсыгин В.К., Соколов Д.В., Улитовский Д.И., Сергеев М.Ю., Мартынов А.А. Разработка и создание источников бесперебойного питания систем энергообеспечения морского исполнения // Труды Крыловского Государственного Научного Центра. 2019. № 2 (388). С. 101-111.  
DOI: 10.24937/2542-2324-2019-2-388-101-111.
- [9] Сажнев А.М., Рогулина Л.Г. Источники бесперебойного электропитания переменного тока. Новосибирск: СибГУТИ, 2015. – 312 с.
- [10] Understanding delta conversion online “Power Balance” – Part 4, American Power Conversion, 2004. – 5 с. [Электронный ресурс]. URL: [https://www.apc.com/us/en/download/document/SPD\\_TDOY-5UQVDB\\_EN/](https://www.apc.com/us/en/download/document/SPD_TDOY-5UQVDB_EN/) (дата обращения 10.01.2023).
- [11] Rasmussen N. The Different Types of UPS Systems, Schneider Electric, 2011. – 10 с. [Электронный ресурс]. URL: [https://www.memorybank.ie/wp-content/uploads/2020/02/SADE-5TNM3Y\\_R7\\_EN.pdf](https://www.memorybank.ie/wp-content/uploads/2020/02/SADE-5TNM3Y_R7_EN.pdf) (дата обращения 10.01.2023).
- [12] Дудкин М.М. Однофазные обратимые преобразователи напряжения для улучшения качества электрической энергии в сетях ограниченной мощности // Практическая Силовая Электроника. 2012. № 2 (46). С. 19-27.
- [13] Vikhorev N., Kurkin A., Aleshin D., Ulyanov D., Konstantinov M., Shalukho A. Battery dynamic balancing method based on calculation of cell voltage reference value // Energies. 2023. № 16(9). 3733. DOI: 10.3390/en16093733
- [14] Аббасова Т.С. Методика выбора и подключения источника бесперебойного питания в компьютерных сетях // Электротехнические и Информационные Комплексы и Системы. 2007. Т.3. № 3. С. 27-29.

- [15] Ульянов Д.А., Вихорев Н.Н. Анализ коммутационных процессов в гибридном источнике бесперебойного питания // Актуальные проблемы электроэнергетики, Декабрь 22, 2022, Нижний Новгород, Россия: НГТУ, 2022. С. 50-56. DOI: 10.46960/47355565\_2022\_50
- [16] Фетисов Л.В., Роженцова Н.В., Булатов О.А. Повышение качества электрической энергии в сетях низкого напряжения // Известия Высших Учебных Заведений. Проблемы Энергетики. 2018. Т. 20. № 11-12. С 99-106. DOI: 10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-99-106
- [17] Сугаков В.Г., Варламов Н.С., Малышев Ю.С. Вольтодобавочный корректор напряжения с использованием эталонной формы напряжения // Вестник государственного университета морского и речного флота им. Адмирала С.О. Макарова. 2018. Т. 10. № 6. С 1264-1276. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1264-1276

### References

- [1] V.V. Karagodin and K.A. Polyanskiy, "Constructing method of a guaranteed power supply system of a special object on the basis of a static uninterruptible power supply", *Proceedings of the Mozhaisky Military Space Academy*, no. 663, pp. 115-120, 2018.
- [2] V.V. Karagodin, K.A. Polyansky and B.A. Revyakov, "Optimization of parameters of diesel-driven generators and uninterrupted power systems in continuous power systems", *Proceedings of the Military Space Academy*, no. 669, pp. 246-253, 2019.
- [3] G.I. Korobko, V.V. Lebedev and P.V. Akhlestin, "Using of the voltage boost principle for nonlinear voltage distortion compensation", *Bulletin of VSAWT*, no. 43, pp. 305-309, 2015.
- [4] Noskov D.D and S.V. Averin, "Modul'nyy princip postroeniya IBP [Modular principle of UPS construction]", in proc. *XLIV Int. young scient. conf. "Gagarinskie chteniya – 2018 [Gagarin Readings – 2018]"*, Apr. 17-20, 2018, Moscow-Baikonur-Akh-tubinsk, Russia, vol. 2, pp. 313 (in Russian).
- [5] D. Sirotkin, "How a Russian solution based on AR technologies helps TANECO ensure the reliability of uninterruptible power supplies at the plant", *Energy Policy*, no. 12. pp. 35-39, Dec. 2022. DOI: 10.46920/2409-5516\_2022\_12178\_35
- [6] M.V. Gel'man, M.M. Dudkin and K.A. Preobrazhensky, *Preobrazovatel'naya tekhnika [Converting technology]*. Chelyabinsk: SUSU, 2009 (in Russian).
- [7] P.V. Yatsynin, R.A. Dyachenko, R.V. Chalov and A.L. Sereda, "Analiz promyshlennykh istochnikov bosperebojnogo pitaniya [Analysis of industrial uninterruptible power supplies]", in proc. *VI Int. scient.-pract. conf. "Nauchnye chteniya imeni professora N.E. Zhukovskogo [Scientific readings named after Professor N.E. Zhukovskiy]"*, Dec. 17-18, 2015, Krasnodar, Russia, pp. 118-120 (in Russian).
- [8] V.K. Samsygin, D.V. Sokolov, D.I. Ulitovsky, M.Yu. Sergeev and A.A. Martynov, "Design and development of ups for marine power systems", *Transactions of the Krylov State Research Centre*, no. 2 (388). pp. 101-111, 2019. DOI: 10.24937/2542-2324-2019-2-388-101-111
- [9] A.M. Sazhnev and L.G. Rogulina, *Istochniki bosperebojnogo elektropitaniya peremennogo toka [AC uninterruptible power supplies]*. Novosibirsk: SibGUTI, 2015 (in Russian).

- [10] *Understanding delta conversion online “Power Balance” – Part 4*, American Power Conversion, 2004. [Online]. Available at: [https://www.apc.com/us/en/download/document/SPD\\_TDOY-5UQVDB\\_EN/](https://www.apc.com/us/en/download/document/SPD_TDOY-5UQVDB_EN/) [Accessed: Jan. 10, 2023].
- [11] N. Rasmussen, *The different types of UPS Systems*, Schneider Electric, 2011. [Online]. Available at: [https://www.memorybank.ie/wp-content/uploads/2020/02/SADE\\_5TNM3Y\\_R7\\_EN.pdf](https://www.memorybank.ie/wp-content/uploads/2020/02/SADE_5TNM3Y_R7_EN.pdf) [Accessed: Jan. 10, 2023].
- [12] M.M. Dudkin, “Reversible single-phase converters for electric power quality improvement in restricted power electric mains”, *Practicheskaya Silovaya Electronica*, vol. 2, no. 46, pp. 19-27, 2012.
- [13] N. Vikhorev, A. Kurkin, D. Alyoshin, D. Ulyanov, M. Konstantinov and A. Shalukho, “Battery dynamic balancing method based on calculation of cell voltage reference value”, *Energies*, no 16 (9), 3733, 2023. DOI: 10.3390/en16093733
- [14] T.S. Abbasova, “Metodika vybora i podklyucheniya istochnika besperebojnogo pitaniya v kompyuternyh setyah [Methodology for selecting and connecting an uninterruptible power supply in computer networks]”, *Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, vol. 3, no. 3, pp. 27-29, 2007 (in Russian).
- [15] D.A. Ulyanov and N.N. Vikhorev, “Analysis of switching processes in a hybrid uninterruptible power supply”, in proc. *Actual problems of the electric power industry*, Dec. 22, 2022, Nizhny Novgorod, Russia, pp. 50-56. DOI: 10.46960/47355565\_2022\_50
- [16] L.V. Fetisov, N.V. Rozhentsova and O.A. Bulatov, “Improving the quality of electric power in low voltage networks”, *Izvestia of Higher Educational Institutions. Energy Problems*, vol. 20, no. 11-12, pp. 99-106, 2018. DOI: 10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-99-106
- [17] V.G. Sugakov, N.S. Varlamov and Yu.S. Malyshev, “Booster voltage corrector with use of standard voltage form”, *Vestnik Gosudarstvennogo Universiteta Morskogo i Rechnogo Flota imeni Admirala S. O. Makarova*, vol. 10, no. 6, pp. 1264-1276, 2018. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1264-1276

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Ульянов Данил Александрович**, магистрант Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация

**Danil A. Ulyanov**, master student of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation

**Вихорев Николай Николаевич**, кандидат технических наук, доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация

**Nikolay N. Vikhorev**, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation

УДК 621.311.25

DOI 10.46960/2658-6754\_2023\_3\_38

## КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ СОЛНЕЧНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

**Д.М. Кочеганов**

ORCID: 0009-0009-5128-2144 e-mail: dk402@yandex.ru

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева  
*Нижний Новгород, Россия*

**А.В. Серебряков**

ORCID: 0000-0002-2050-3241 e-mail: artemserebryakov@yandex.ru

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева  
*Нижний Новгород, Россия*

**А.С. Стеклов**

ORCID: 0000-0002-8122-3358 e-mail: steklov84@mail.ru

АО «ОКБМ Африкантов»  
*Нижний Новгород, Россия*

Разработана имитационная модель системы количественной оценки технического состояния оборудования солнечной электростанции малой мощности в среде *Matlab Simulink*. Предложена модификация существующего подхода к определению количественной оценки технического состояния, основанного на вычислении индекса технического состояния оборудования. Разработана система количественной оценки технического состояния оборудования с использованием аппарата нечеткой логики Мамдани-Заде, генерирующая количественную оценку технического состояния оборудования на основании диагностических параметров. Использование аппарата нечеткой логики с перечнем экспертных правил позволяет в полной мере учесть нелинейность объектов диагностики, наличие специфических комбинаций величин диагностических признаков, а также их эмерджентные свойства, что не удастся сделать при использовании существующего подхода по вычислению индекса технического состояния с использованием формулы и весовых коэффициентов для различных диагностических признаков. Полученная количественная оценка технического состояния оборудования обрабатывается при помощи сети с долгой кратковременной памятью (*Long Short Term Memory network, LSTM*), формируя прогноз технического состояния оборудования на заданном временном отрезке. Описываемая система количественной оценки технического состояния оборудования может быть использована для поддержки принятия решений оператором электроэнергетической установки при определении необходимости ремонта и замены оборудования.

**Ключевые слова:** индекс технического состояния, количественная оценка технического состояния, нечеткая логика.

Для цитирования: Кочеганов Д.М., Серебряков А.В., Стеклов А.С. Количественная оценка технического состояния оборудования солнечной электростанции // Интеллектуальная Электротехника. 2023. № 3. С. 38-50.  
DOI: 10.46960/2658-6754\_2023\_3\_38

## TECHNICAL CONDITION QUANTITATIVE ASSESSMENT OF SOLAR POWER PLANT EQUIPMENT

**D.M. Kocheganov**

ORCID: **0009-0009-5128-2144** e-mail: **dk402@yandex.ru**  
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev  
*Nizhny Novgorod, Russia*

**A.V. Serebryakov**

ORCID: **0000-0002-2050-3241** e-mail: **artemserebryakov@yandex.ru**  
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev  
*Nizhny Novgorod, Russia*

**A.S. Steklov**

ORCID: **0000-0002-8122-3358** e-mail: **steklov84@mail.ru**  
JSC «OKBM Afrikantov»  
*Nizhny Novgorod, Russia*

**Abstract.** The development of a Matlab Simulink model of a system for quantitative assessment of the technical condition of the small solar power plant equipment is described. Small solar power plant consists of photoelectric converters, voltage inverter, 10 kVA active-inductive electric load ( $\cos\phi$  0.9). It is proposed to modify the existing approach to determining the quantitative assessment of the technical condition based on the calculation of the index of the equipment technical condition. A system of quantitative assessment of the equipment technical condition using the apparatus of Mamdani-Zadeh fuzzy logic was developed. It generates the quantitative assessment of the equipment technical condition based on diagnostic parameters by the basis of expert rules. The expert rule-based fuzzy logic allows to take into account non-linearity of diagnostic objects, the presence of specific combinations of diagnostic features, as well as their emergency properties, which cannot be done when using the existing approach to calculating the technical condition using formulas and weight coefficients for various diagnostic features. The resulting quantitative assessment of the equipment technical condition is processed using a Long Short Term Memory network (LSTM), forming a forecast of the equipment technical condition at a given time period. The proposed system of quantitative assessment of the equipment technical condition can be used to support the decision of the electric power plant operator in determining the need to repair and replace equipment.

**Keywords:** technical condition index, technical condition quantitative assessment, fuzzy logic.

**For citation:** D.M. Kochegyanov, A.V. Serebryakov and A.S. Steklov, “Technical condition quantitative assessment of solar power plant equipment”, *Smart Electrical Engineering*, no. 3, pp. 38-50, 2023. DOI: 10.46960/2658-6754\_2023\_3\_38

## 1. Введение

Для поддержания работоспособности электротехнического оборудования общепринятой практикой в настоящее время является проведение планового технического обслуживания, в ходе которого осуществляется оценка технического состояния оборудования и принимается решение о необходимости его ремонта или замены. В качестве исходной для определения периодичности планового технического обслуживания выступает информация о надежности элементов (интенсивность отказов, среднее время безотказной работы), предоставляемых производителем на основании результатов испытаний определенного количества образцов. Но, поскольку условия эксплуатации и события, возникающие при работе каждого конкретного образца оборудования, уникальны, каждая единица оборудования может выйти из строя раньше или позже срока, заявленного производителем. В связи с этим, для предупреждения внезапных отказов и уменьшения затрат на проведение планового технического обслуживания, происходит переход к техническому обслуживанию по состоянию, для чего необходимо осуществлять мониторинг технологических и физических параметров оборудования, а также использовать не только качественную оценку технического состояния оборудования, но и количественную, позволяющую отслеживать динамику его изменения, осуществлять ранжирование и прогнозирование. Разработки данных систем мониторинга ведут такие научно-производственные компании, как Систэм Электрик (*Systeme Electric*), *Semiotic Labs*, *CMS Condition Monitoring Systems*, *Dynapar*, *Briuel & Kjaer Vibro*, *Ifm efector Canada*. В научных работах предлагаются различные подходы по оценке технического состояния оборудования: методом реконструкционного моделирования [1], спектрального анализа [2] и др.

В законодательстве РФ закреплена методика количественной оценки путем вычисления индекса технического состояния оборудования [3]. Предлагаются ее различные видоизменения [4-8], направленные на увеличение достоверности оценки технического состояния путем корректировки весовых коэффициентов и формул, по которым вычисляется индекс технического состояния оборудования. Однако данный подход характеризуется значительной линеаризацией свойств объекта оценки технического состояния и может привести к игнорированию некоторых эмерджентных свойств объекта, а также специфических комбинаций величин диагностических признаков, что негативно сказывается на корректности оценки технического состояния.

Целью исследования является получение количественной оценки и

прогнозирование технического состояния оборудования солнечной электростанции малой мощности, для чего решается задача разработки имитационной модели солнечной электростанции с системой количественной оценки и прогнозирования технического состояния оборудования.

## II. Методы исследования

В качестве основного метода исследования в рамках данной работы используется имитационное моделирование в среде *Matlab Simulink* с применением расширений *Fuzzy Logic Toolbox* и *Deep Network Designer*. На рис. 1 представлена имитационная модель в среде *Matlab Simulink*.

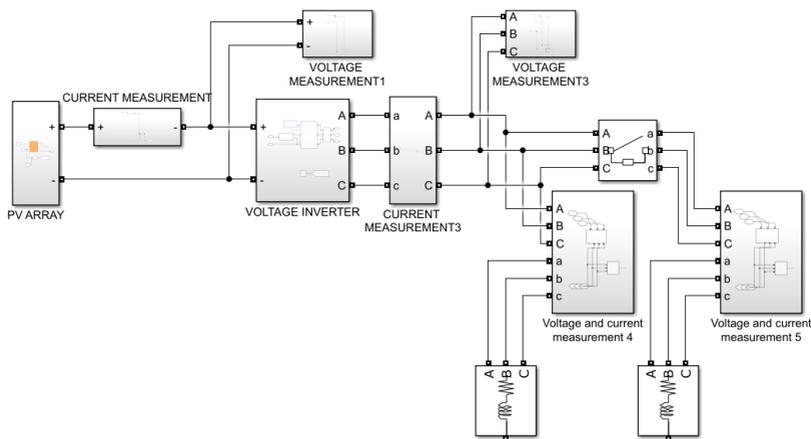


Рис. 1. Имитационная модель солнечной электростанции в *Matlab Simulink*

Fig. 1. Solar power plant Simulink model

Имитационная модель включает следующие элементы: блок фотоэлектрических модулей *PV Array* с номинальной электрической мощностью 10 кВт, трехфазный мостовой инвертор напряжения, блоки трехфазной электрической нагрузки с  $\cos\phi$  0,9 мощностью 10 кВА. Величины диагностических признаков, полученные в результате имитационного моделирования, передаются в систему количественной оценки и прогнозирования технического состояния. В данной работе предлагается новый подход, заключающийся в построении экспертной системы, вычисляющей количественную оценку технического состояния (КОТС) оборудования на основании величин диагностических признаков по установленному перечню логических правил, что позволяет при формировании оценки в полной мере учесть любые характерные состояния объекта оценки и комбинации величин диагностических признаков. Для обеспечения робастности системы применяется аппарат нечеткой логики Мамдани-Заде [9-11]. Структурная схема системы представлена на рис. 2.

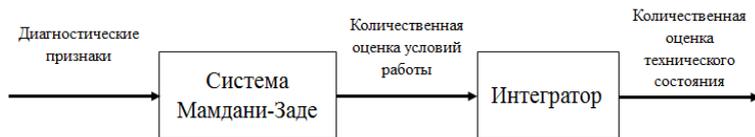


Рис. 2. Структурная схема системы КОТС

Fig. 2. Structural diagram of the technical condition quantitative assessment system

В качестве диагностических признаков фотоэлектрических преобразователей были выбраны: температура фотоэлектрических преобразователей, ток, напряжение, освещенность; в качестве диагностических признаков инвертора напряжения – температура силовых ключей преобразователя, выходные линейные напряжения инвертора, выходные токи фаз инвертора. Поскольку данная система является демонстрационной и не имеет привязки к конкретному образцу оборудования, перечень диагностических признаков, вид функций принадлежности и набор логических правил подлежат уточнению. Физические величины выражаются в относительных единицах.

**Таблица 1.**  
Логические правила

**Table 1.**  
Rules

Фотоэлектрический преобразователь					
№	Напряжение	Ток	Температура	Освещенность	КОУР
1	Нормальный	Нормальный	Нормальный	Нормальный	Хороший
2	Высокий	Нормальный	Нормальный	Высокий	Нормальный
3	Низкий	Нормальный	Нормальный	Низкий	Нормальный
4	Высокий	Высокий	Высокий	–	Низкий
5	Низкий	Высокий	Не нормальный	Нормальный	Низкий
6	Низкий	Не нормальный	–	Нормальный	Низкий
Инвертор напряжения					
№	Напряжение	Ток	Температура	КОУР	
1	Нормальный	Нормальный	Нормальный	Хороший	
2	Высокий	Нормальный	Низкий	Нормальный	
3	Низкий	Нормальный	Нормальный	Нормальный	
4	Высокий	Высокий	Не нормальный	Низкий	
5	Высокий	Низкий	Низкий	Низкий	
6	Низкий	Высокий	Нормальный	Нормальный	

Для величин каждого из диагностических признаков используются термины «Низкий», «Высокий», «Нормальный». Основываясь на них, система нечеткого вывода формирует количественную оценку условий работы оборудования (КОУР, *Operation Condition, OC*) в соответствии с за-

данными перечнями логических правил. Для фотоэлектрических преобразователей и инвертора напряжения они приведены в табл. 1. Данные перечни правил являются эскизными и требуют уточнения при работе с оборудованием.

На основании полученной количественной оценки условий работы вычисляется количественная оценка технического состояния (КОТС, *Technical Condition, TC*). Для этого используется выражение:

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

где  $TC(p)$  – количественная оценка технического состояния;  $OC(p)$  – количественная оценка условий работы;  $T$  – постоянная времени интегрирования;  $k$  – настроечный коэффициент;  $p$  – оператор Лапласа.

Для получения корректных результатов оценки технического состояния, коэффициент настройки и постоянная времени интегрирования должны быть определены экспертным путем с учетом особенностей и результатов экспериментальных исследований конкретного объекта диагностики. В рамках данной работы применяются тестовые значения. На основе полученных количественных оценок технического состояния может быть сформирована шкала с указанием необходимых мероприятий, к примеру: КОТС 1-0,7 – техническое обслуживание не требуется, КОТС 0,69-0,25 – техническое обслуживание необходимо провести в плановые сроки, КОТС 0,24-0 необходимо незамедлительное техническое обслуживание.

Формирование прогноза количественной оценки технического состояния осуществляется при помощи сети с долгой кратковременной памятью (*Long Short Term Memory network, LSTM*), которая является особым видом рекуррентной нейронной сети [12]. Сеть *LSTM* хорошо приспособлена для прогнозирования на основе данных временных рядов в случаях, когда важные события в них разделены временными задержками с неопределенной продолжительностью. Для построения сети с долгой кратковременной памятью в среде *Matlab* используется инструмент *Deep Network Designer*. Структура сети в рабочей области программы приводится на рис. 3.

Она включает в себя следующие элементы: входной слой, преобразующий входные данные в последовательность для обработки нейронной сетью, слой долгой кратковременной памяти, необходимый для анализа долгосрочных зависимостей в последовательности данных, исключающий слой, необходимый для исключения переобученности сети, полносвязный слой, перемножающий выходные сигналы предыдущего слоя и матрицы весов, и суммирующий с вектором смещения, а также слой регрессии, вычисляющий функцию потерь для оценки точности и качества работы системы. В результате обучения сети ошибка прогнозирования для тестового временного ряда, соответствующего диаграмме изменения количественной оценки

технического состояния длительностью один час, не превысила 6 %.

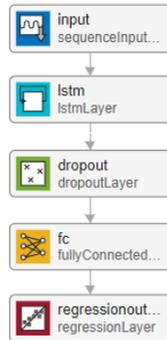


Рис. 3. Структурная схема сети с долгой кратковременной памятью

Fig. 3. Structural diagram of the LSTM network

### III. Результаты исследования

В процессе моделирования была рассмотрена работа системы в пределах нормального режима работы, при котором величины диагностических признаков не превышают нормальных значений, а также при ступенчатом увеличении электрической нагрузки сверх номинального значения.

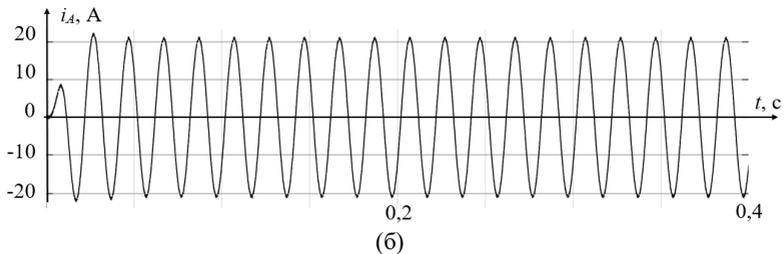
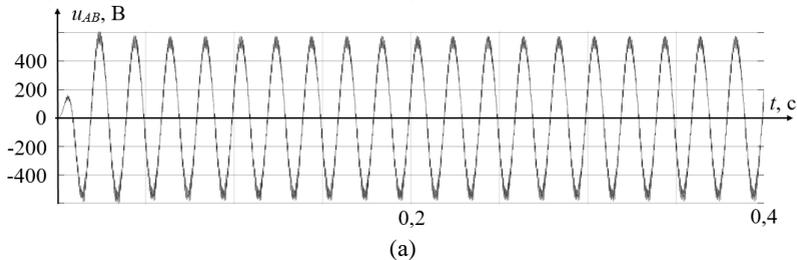
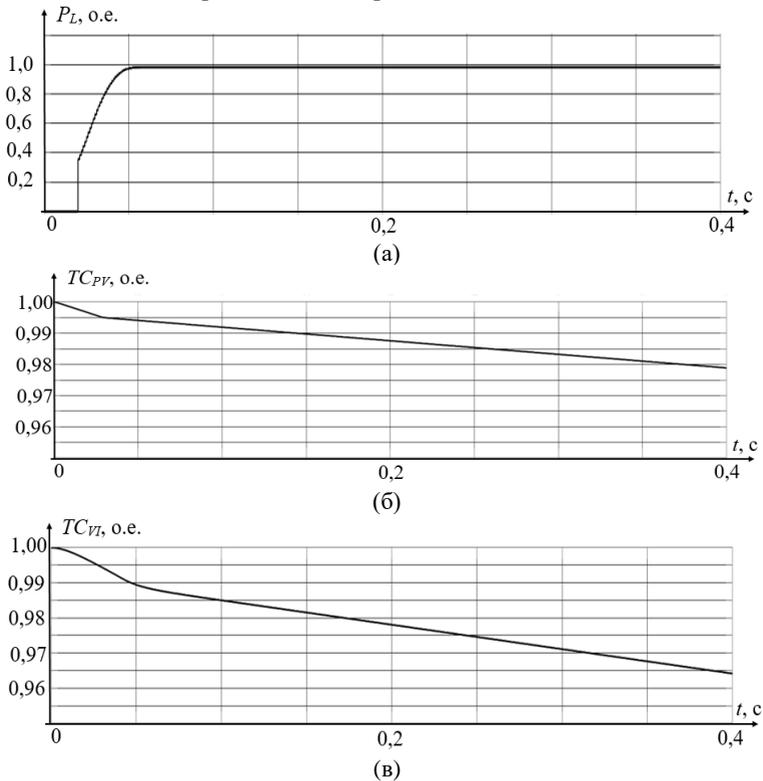


Рис. 4. Диаграммы нагрузки при работе солнечной электростанции в нормальном режиме: линейное напряжение нагрузки  $AB$  (а); ток фазы нагрузки (б)

Fig. 4. Load diagrams during normal operation of the solar power plant: linear load voltage  $AB$  (a); load current phase A (b)

На рис. 4 представлены диаграммы линейного напряжения нагрузки  $AB$ , тока фазы нагрузки  $A$  при работе солнечной электростанции в нормальном режиме с электрической мощностью нагрузки, равной 10 кВА с  $\cos\varphi 0,9$ . Действующее значение первой гармоники напряжения равно 381 В. Действующее значение первой гармоники тока равно 14,8 А.  $THD$  (Total Harmonic Distortion) напряжения нагрузки составляет 1,3 %.

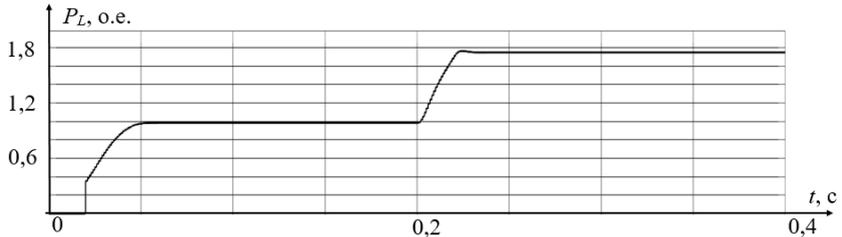
На рис. 5 приводятся графики изменения КОТС фотоэлектрических преобразователей и инвертора напряжения, полученные при работе модели электростанции с номинальной величиной электрической нагрузки. Для большей наглядности графиков тестовый коэффициент изменения технического состояния в системе оценки был увеличен, так как моделирование выполняется на малом временном интервале.



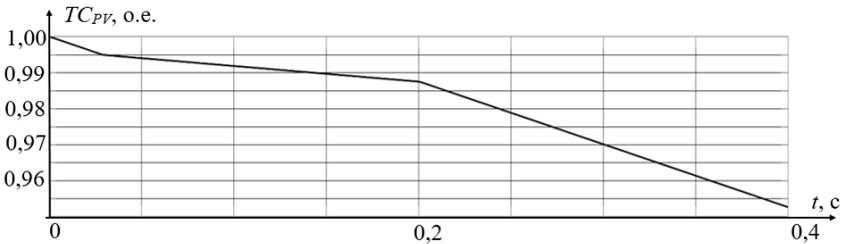
**Рис. 5. КОТС при номинальной нагрузке:**  
мощность нагрузки (а); КОТС фотоэлектрических преобразователей (б);  
КОТС инвертора напряжения (в)

**Fig. 5. TC at rated load power:**  
load power (a); TC of photovoltaic cells (b); TC of voltage converter (v)

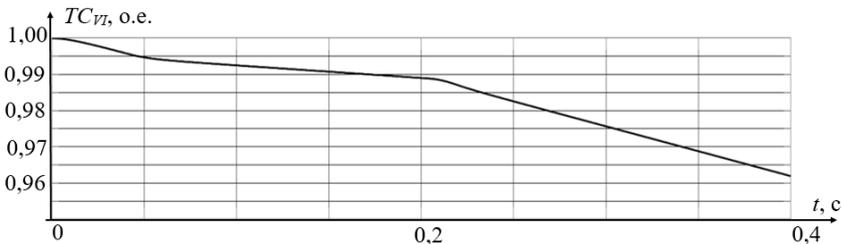
Рассмотрим изменение КОТС оборудования при увеличении мощности нагрузки до 175 % от номинального значения в результате подключения второго блока нагрузки в момент 0,2 с (рис. 6).



(а)



(б)



(в)

**Рис. 6. КОТС при увеличении мощности нагрузки:**

*мощность нагрузки (а); КОТС фотоэлектрических преобразователей (б); КОТС инвертора напряжения (в)*

**Fig. 6. TC with increasing load power:**

*load electrical power (a); TC of photovoltaic cells (b); TC of voltage converter (в)*

Можно отметить, что с момента времени 0,2 с КОТС уменьшаются интенсивнее, чем на рис. 5, что вызвано выходом диагностических признаков оборудования за пределы нормального режима. Функционирование систем КОТС оборудования соответствует ожидаемому.

Рассмотрим работу системы прогнозирования КОТС оборудования на примере графиков оценок технического состояния, полученных в результате моделирования работы оборудования длительностью один час, с горизонтом прогнозирования, равным 500 с, и со ступенчатым увеличением электрической мощности нагрузки до 175 % от номинальной величины в момент времени 2 000 с. На рис. 7 представлены графики КОТС фотоэлектрических преобразователей и инвертора напряжения, сплошной линией показана оценка, полученная в результате имитационного моделирования, пунктирной линией показана спрогнозированная оценка. Наличие пробелов в начальных отрезках графиков прогноза объясняется тем, что точки графика на интервале от 0 до 185 с используются для инициализации нейронной сети, и прогнозирование на данном интервале не осуществляется. В рассматриваемом случае ошибка прогнозирования не превысила 5 %.

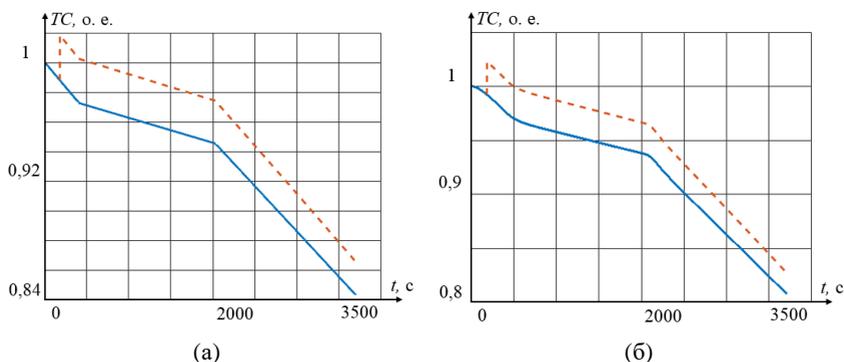


Рис. 7. Прогнозирование КОТС: фотоэлектрических преобразователей (а); инвертора напряжения (б)

Fig. 7. TC forecasting: photovoltaic cells (a); voltage converter (b)

#### IV. Заключение

В статье приводятся результаты разработки системы количественной оценки технического состояния солнечной электростанции малой мощности. Проведено моделирование работы системы в *Matlab Simulink*. Получены графики КОТС оборудования при работе с номинальной мощностью нагрузки, а также при увеличении мощности нагрузки до 175 % от номинального значения. Получены прогнозы КОТС оборудования для графиков, длительностью один час, в рассматриваемом примере ошибка прогнозирования не превысила 5 %. Разработанная модель может быть использована при построении систем мониторинга электротехнического оборудования с целью предотвращения внезапных отказов и оказания помощи в принятии решений о проведении технического обслуживания и ремонта.

*Исследование выполнено в рамках государственного задания в сфере научной деятельности (тема №FSWE-2022-0005).*

© Кочеганов Д.М., 2023

© Серебряков А.В., 2023

© Стеклов А.С., 2023

*Поступила в редакцию 01.03.2023*

*Принято к публикации 23.03.2023*

*Received 01.03.2023*

*Accepted 23.03.2023*

### Библиографический список

- [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. № 133. P. 433-441. DOI: 10.1016/j.renene.2018.10.062
- [2] 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. 106908.
- [3] Приказ Министерства энергетики Российской Федерации от 26 июля 2017 г. № 676. Об утверждении методики оценки технического состояния основного технологического оборудования и линий электропередачи электрических станций и электрических сетей. [Электронная ресурс]. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201710060003> (дата обращения 01.02.2023).
- [4] 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*, Июль 04-09, 2016, Сыктывкар, Россия: ООО «Коми республиканская типография», 2016. С. 171-179.
- [5] Назарычев А.Н., Андреев Д.А. Совершенствование методики определения индекса технического состояния электрооборудования // 91-е заседание Межд. науч. семинара им. Ю.Н. Руденко «Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики», Сентябрь 23-27, 2019, Ташкент, Узбекистан: ИСЭМ СО РАН, 2019. С. 316-326.
- [6] Оклей П.И. Методика оценки интегрального технического состояния оборудования тепловых электростанций // *Транспортное Дело России*. 2015. № 6. С. 72-76.
- [7] Давиденко И.В. Индекс технического состояния: улучшение методики расчета на основе опыта работы ЭДИС «Альбатрос» // XXIII Межд. науч.-тех. и практ. конф. «Силовые и распределительные трансформаторы. Реакторы. Системы диагностики», Июнь 21-22, 2016, Москва, Россия. М.: Международная Ассоциация «ТРАВЭК», 2016.
- [8] Попов Г.В., Игнатьев Е.Б. Определение индекса технического состояния силовых трансформаторов в процессе их эксплуатации // *Вестник Ивановского Государственного Энергетического Университета*. 2014. № 4. С. 25-32.

- [9] Zadeh L.A. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning - I // *Information Sciences*. 1975. № 8 (3). P. 199-249. DOI: 10.1016/0020-0255(75)90036-5
- [10] Zadeh L.A. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning - II // *Information Sciences*. 1975. № 8 (4). P. 301-357. DOI: 10.1016/0020-0255(75)90046-8
- [11] Zadeh L.A. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning – III // *Information Sciences*. 1975. № 9 (1). P. 43-80. DOI: 10.1016/0020-0255(75)90017-1
- [12] Hochreiter S., Schmidhuber J. Long short-term memory // *Neural Computation*. 1997. № 9 (8). P. 1735-1780. DOI: 10.1162/neco.1997.9.8.1735

### References

- [1] C. Yang, J. Liu, Y. Zeng and G. Xie, “Real-time condition monitoring and fault detection of components based on machine-learning reconstruction model”, *Renewable Energy*, no. 133, pp. 433-441, Apr. 2019. DOI: 10.1016/j.renene.2018.10.062
- [2] P. Gangsar and R. Tiwari, “Signal based condition monitoring techniques for fault detection and diagnosis of induction motors: A state-of-the-art review”, *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 144, 106908, Oct. 2020.
- [3] Order of the Ministry of Energy of the Russian Federation dated July 26, 2017 No. 676 “Ob utverzhdenii metodiki ocenki tekhnicheskogo sostoyaniya osnovnogo tekhnologicheskogo oborudovaniya i linij elektroperedachi elektricheskikh stancij i elektricheskikh setej [On approval of the methodology for assessing the technical condition of the main technological equipment and transmission lines of power plants and electrical networks]”. [Online]. Available at: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201710060003> [Accessed: Feb. 1, 2023] (in Russian).
- [4] A.N. Nazarychev, E.V. Novomlinskij and D.A. Andreev, “Ocenka tekhnicheskogo sostoyaniya elektrooborudovaniya na osnove raschetov integral'nyh pokazatelej [Assessment of the technical condition of electrical equipment based on calculations of integral indicators]”, in proc. *Metodicheskie voprosy issledovaniya nadezhnosti bol'shih sistem energetiki [Methodical issues of researching the reliability of large energy systems]*, July 04-09, 2016, Syktyvkar, Russia, pp. 171-179 (in Russian).
- [5] A.N. Nazarychev and D.A. Andreev, “Sovershenstvovanie metodiki opredeleniya indeksa tekhnicheskogo sostoyaniya elektrooborudovaniya [Improving the methodology for determining the index of the technical condition of electrical equipment]”, in proc. *91st meeting of the International. scientific seminar n.a. Yu.N. Rudenko “Metodicheskie voprosy issledovaniya nadezhnosti bol'shih sistem energetiki [Methodological issues of researching the reliability of large energy systems]”*, September 23-27, 2019, Tashkent, Uzbekistan, pp. 316-326 (in Russian).
- [6] P.I. Okley, “Methodology to evaluate the integral technical state of equipment for thermal power stations”, *Transport Business in Russia*, no. 6, pp. 72-76, 2015.
- [7] I.V. Davidenko, “Health Index: improved calculation method, based on experience of EDIS “Albatross””, in proc. *XXIII Int. sci.-tech. and pract. conf. “Silovye i raspredelitel'nye transformatory. Reaktory. Sistemy diagnostiki [Power and distribution transformers. Reactors. Diagnostic systems]”*, June 21-22, 2016, Moscow, Russia (in Russian).

- [8] G.V. Popov and E.B. Ignatiev, "Calculation of technical condition index of power transformers in operation", *Vestnik IGEU*, no. 4, pp. 25-32, 2014 (in Russian).
- [9] L.A. Zadeh, "The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning – I", *Information Sciences*, vol. 8, no. 3, pp. 199-249, 1975. DOI: 10.1016/0020-0255(75)90036-5
- [10] L.A. Zadeh, "The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning – II", *Information Sciences*, vol. 8, no. 4, pp. 301-357, 1975.
- [11] L.A. Zadeh, "The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning – III", *Information Sciences*, vol. 9, no. 1, pp. 43-80, 1975.
- [12] S. Hochreiter and J. Schmidhuber, "Long short-term memory", *Neural Computation*, vol. 9, no. 8, pp. 1735-1780, 1997. DOI: 10.1162/neco.1997.9.8.1735

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Кочеганов Дамир Михайлович**, аспирант Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация

**Damir M. Kocheganov**, postgraduate student of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation

**Серебряков Артем Владимирович**, кандидат технических наук, доцент Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексева, г. Нижний Новгород, Российская Федерация

**Artyom V. Serebryakov**, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation

**Стеклов Алексей Сергеевич**, кандидат технических наук, инженер-проектировщик АО «ОКБМ Африкантов», г. Нижний Новгород, Российская Федерация

**Aleksei S. Steklov**, Cand. Sci. (Eng.), design engineer of JSC «OKBM Afrikantov», Nizhny Novgorod, Russian Federation

УДК 621.318.5:681.5.09

DOI 10.46960/2658-6754\_2023\_3\_51

## ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПРИНЦИПОВ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ И ХРОНОКОНТРОЛЯ ДЛЯ СИНТЕЗА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ РЕЛЕ АВТОМАТИКИ

**В.Г. Сугаков**

ORCID: 0000-0003-2712-7717 e-mail: [elektrikasp@mail.ru](mailto:elektrikasp@mail.ru)  
Волжский государственный университет водного транспорта  
*Нижний Новгород, Россия*

**Ю.С. Малышев**

ORCID: 0000-0001-9008-1198 e-mail: [malyuriyserg@yandex.ru](mailto:malyuriyserg@yandex.ru)  
Волжский государственный университет водного транспорта  
*Нижний Новгород, Россия*

Описаны возможные принципы организации самодиагностики и реконструктивной диагностики цифровых реле автоматики. Предложены два принципа для организации диагностики: принцип последовательности – рассматривается последовательность формирования кодов на выходе многоканальных реле, которая сопоставляется с естественной последовательностью; принцип хроноконтроля – рассматривается приращение контролируемой физической величины, которая сопоставляется с нормативным приращением, зависящим от постоянного времени контролируемого объекта. Приведен вариант технической реализации реконструктивной диагностики, построенной на принципах последовательности и хроноконтроля для трехканального реле частоты вращения, и дано описание его работы. Дано описание общего случая технической реализации самодиагностики, построенной на принципе последовательности, на примере синтезированного  $n$ -канального реле. Новизна разработки – методика проверки и коррекции информационных сигналов на выходе приемных реле с целью предотвращения сбоев и аварий в работе систем автоматического управления, связанных с поступлением недостоверной информации от неисправных реле. Практическая значимость состоит в разработке схемных решений устройств, позволяющих оценивать адекватность сигналов, приходящих с приемных реле, и, при наличии ошибок в информационном канале, выполнять их коррекцию, а также обеспечивать сигнализацию, указывающую на поврежденное реле. Предложенные устройства позволят сократить время восстановления системы управления за счет самодиагностики и сохранить их работоспособность до выполнения ремонта за счет реконструктивной диагностики.

**Ключевые слова:** автоматизация, реконструктивная диагностика, самодиагностика, система управления, хроноконтроль, цифровые реле.

Для цитирования: Сугаков В.Г., Малышев Ю.С. Оценка возможности применения принципов последовательности и хроноконтроля для синтеза интеллектуальных реле автоматики // Интеллектуальная Электротехника. 2023. № 3. С. 51-64. DOI: 10.46960/2658-6754\_2023\_3\_51

## **EVALUATION OF POSSIBILITY OF APPLYING SEQUENCE AND CHRONOCONTROL PRINCIPLES FOR SMART AUTOMATION RELAYS SYNTHESIS**

**V.G. Sugakov**

ORCID: **0000-0003-2712-7717** e-mail: **elektrikasp@mail.ru**  
Volga State University of Water Transport  
*Nizhny Novgorod, Russia*

**Yu.S. Malyshev**

ORCID: **0000-0001-9008-1198** e-mail: **malyuriyserg@yandex.ru**  
Volga State University of Water Transport  
*Nizhny Novgorod, Russia*

**Abstract.** The article describes the possible principles of organization of self-diagnostics and reconstructive diagnostics of digital automation relays. Two principles for organizing diagnostics are considered: the principle of sequence – the sequence of generating codes at the output of multichannel relays is considered, which is compared with the natural sequence; the principle of chronocontrol – the increment of the controlled physical quantity is considered, which is compared with the normative increment, depending on the constant time of the controlled object. A variant of the technical implementation of reconstructive diagnostics based on the principles of sequence and chronocontrol for a three-channel rotational speed relay is presented and a description of its operation is given. A description of the general case of the technical implementation of self-diagnostics built on the principle of sequence is given on the example of a synthesized n-channel relay. The scientific novelty of the article lies in the development of a methodology for checking and correcting information signals at the output of receiving relays in order to prevent failures and accidents in the operation of automatic control systems associated with the receipt of unreliable information from faulty relays. The practical significance lies in the development of circuit solutions for devices that allow assessing the adequacy of the signals coming from the receiving relays and perform their correction in the presence of errors in the information channel, as well as provide an alarm indicating a damaged relay. The proposed devices will reduce the recovery time of the control system due to self-diagnosis and maintain their performance until repairs are performed due to reconstructive diagnostics.

**Keywords:** automation, digital relays, chronocontrol, control system, reconstructive diagnostics, self-diagnostics.

**For citation:** V.G. Sugakov and Yu.S. Malyshev, "Evaluation of possibility of applying of sequence and chronocontrol principles for smart automation relays synthesis", *Smart Electrical Engineering*, no. 3, pp. 51-64, 2023.  
DOI: 10.46960/2658-6754\_2023\_3\_51

## I. Введение

Все больше различных функций деятельности человека, включая транспорт, в начале XXI в. передаются искусственному интеллекту, углубляющему автоматизацию различных процессов [1-3]. В связи с этим, растут требования к адекватности систем автоматического управления (САУ) [4-9]. Известно, что с увеличением числа выполняемых операций и функций возрастает количество приемных реле САУ. Надежное и адекватное функционирование систем управления различными объектами во многом зависит от достоверности информации, которую получает САУ от приемных реле, контролирующих параметры физических величин или состояние элементов САУ. Недостоверная информация от неисправного реле может привести к сбою в работе САУ и даже аварии. Поэтому разработка методов самодиагностики приемных реле автоматики и их каскадов представляется актуальной [9-11].

## II. Материалы и методы

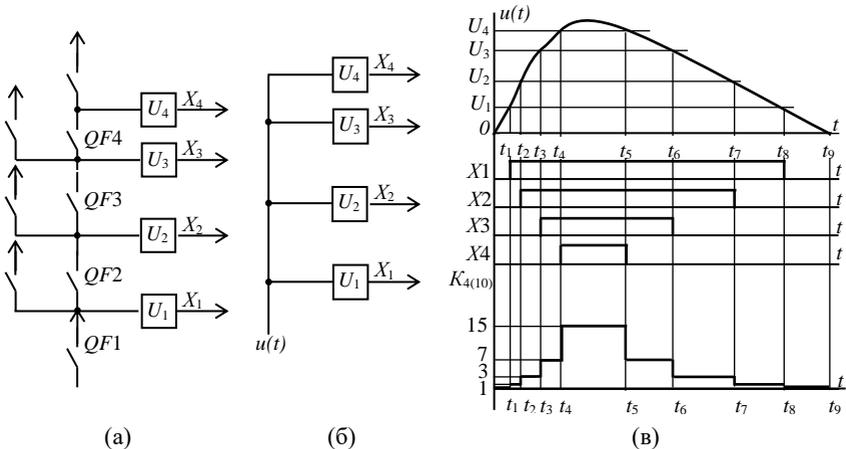
Адекватная работа САУ может быть обеспечена путем реконструктивной диагностики или самодиагностики информации, поступающей от приемных реле. При реконструктивной диагностике поступающая информация проверяется на достоверность и при выявлении несоответствий осуществляется ее коррекция. При самодиагностике устанавливается факт неисправности в информационном канале и выдается сигнал о сбое. Анализ достоверности информации, поступающей в САУ, возможен методом, использующим принципы последовательности и хроноконтроля.

Использование принципа последовательности предполагает выявление факта появления сбойного кода  $K_i$  не соответствующего штатному коду  $K_{ши}$ , т.е. ситуации, когда  $K_i \neq K_{ши}$ . Для обеспечения достоверности сбойный код  $K_i$  дополняется корректирующим кодом  $K_{ки}$  до штатного кода  $K_{ши}$ , т.е.  $K_i + K_{ки} = K_{ши}$ .

Принцип хроноконтроля может использоваться самостоятельно или совместно в системах самодиагностики с применением принципа последовательности. Он основан на контроле приращения ( $dU/dt$ ); контролируемого параметра  $dU$  за фиксированный промежуток времени  $dt$ , которое зависит от постоянных времени объектов системы и имеет для каждого объекта вполне определенный диапазон значений. Например, изменение частоты вращения коленчатого вала судовых дизель генераторов происходит в соответствии с механической постоянной, имеющей значения в диапазоне  $0,1 \dots 3,5$  с [9]. Если приращение параметра превышает реально возможную

величину  $(dU/dt)_{i \text{ доп}}$ , которая определяется постоянной времени контролируемого параметра, то соотношение  $(dU/dt)_i > (dU/dt)_{i \text{ доп}}$  является признаком сбоя.

Принцип последовательности применим при последовательном и параллельном подключении приемных реле, и заключается в проверке последовательности появления информационных сигналов на выходе приемных реле. Так при последовательном подключении приемных реле  $U_1, U_2, U_3$  и  $U_4$  (рис. 1, а) к четырем участкам последовательной электрической цепи появлению сигнала  $X_2$  должно предшествовать появление сигнала  $X_1$ , сигналу  $X_3$  – предшествуют сигналы  $X_1$  и  $X_2$ , а сигналу  $X_4$  – сигналы  $X_1, X_2$  и  $X_3$ . При параллельном подключении реле  $U_1, U_2, U_3$  и  $U_4$  (рис. 1, б), когда, например, контролируются четыре уровня физической величины  $u(t)$  (рис. 1, в), до формирования сигнала  $X_2$  на выходе реле, фиксирующего высший уровень, должен присутствовать сигнал  $X_1$  на выходе реле с меньшей уставкой физической величины.



**Рис. 1. Схема реализации принципа последовательности:**  
**при последовательном подключении реле к участкам цепи (а);**  
**при параллельном подключении реле к контролируемому параметру (б);**  
**эпюры срабатывания реле при параллельном подключении (в)**

**Fig. 1. Scheme for implementing the principle of sequence:**  
**when the relay is connected in series to circuit sections (a);**  
**when the relay is connected in parallel to the controlled parameter (b);**  
**diagrams of relay operation with parallel connection (v)**

Принимая наличие сигнала на выходе реле за «1», а отсутствие сигнала за «0», можно составить двоичный код состояния для группы, содержащей 4 реле,  $K_{(2)} = X_4 X_3 X_2 X_1$ , разряды которого соответствуют контролируемым уровням физической величины. Причем младший (первый) разряд

кода принадлежит сигналу реле, срабатывающему при наименьшей уставке физической величины, а старший разряд – сигналу реле с наибольшей уставкой. В общем случае для  $n$ -уровневой ( $n$ -канальной) градации код состояния имеет вид  $K_{(2)} = X_n X_{n-1} \dots X_2 X_1$ . Этому коду соответствует десятичный код  $K_{(10)} = X_1 + 2^1 X_2 + 2^2 X_3 + \dots + 2^{n-1} X_n$ .

Общее число состояний (кодов) равно  $n_{\text{сост}} = 2^n$ . В это число входят  $n_{\text{шт}} = n + 1$  штатных кодов. Для четырехканальной градации штатные состояния имеют коды: 0000, 0001, 0011, 0111 и 1111. Такую последовательность появления кодов называют естественной. Коды состояний, не входящие в естественную последовательность кодов, являются сбойными и указывают на неисправности, возникшие в измерительном канале.

Число сбойных кодов  $n_{\text{сб}} = n_{\text{сост}} - n_{\text{шт}} = 2^n - n - 1$  определяет число состояний, при которых информация, поступающая от приемных реле, должна подвергаться коррекции. Коррекция сводится к замене в соответствующем разряде кода состояния «0» на «1» или наоборот. При этом скорректированный код становится равным одному из кодов штатного состояния. В некоторых случаях, например, при повреждении нескольких информационных каналов, возникает несколько вариантов перехода к тому или другому коду штатного состояния. Разрешение такой неопределенности возможно при использовании метода хроноконтроля, который основан на утверждении, что изменение физической величины за фиксированный промежуток времени не может превышать некоторое фиксированное значение. Применение метода хроноконтроля сводится к оценке приращения физической величины или сопоставлению кодов состояния соответствующим смежным моментам времени.

### III. Результаты и обсуждение

Рассмотренные принципы организации самодиагностики и реконструктивной диагностики реализованы в многоканальных реле [10, 11]. Для пояснения организации указанных принципов диагностики рассмотрим реле частоты вращения, описанное в [10] которое имеет три канала. Функция реконструктивной диагностики у реле организована на указанных принципах последовательности и хроноконтроля. Принцип последовательности в реле реализован следующим образом: при разгоне для исправных каналов уставок естественной является последовательность кодов  $000_2$ ,  $001_2$ ,  $011_2$  и  $111_2$ , остальные коды ( $010_2$ ,  $100_2$ ,  $101_2$  и  $110_2$ ), служат признаком выхода из строя канала определенной уставки. Эти коды являются дефектными, и требуется их коррекция.

При сбое в канале второй или первой уставки возникает код  $010_2$ . Если появлению кода  $010_2$  предшествовал код  $000_2$ , то указывается причина неисправности «сбой канала 2-й уставки» и исправленный код будет иметь вид  $000_2$ . Если появлению кода  $010_2$  предшествовал код  $011_2$ , то имеет место повреждение реле первого канала и выдается сигнал «сбой канала 1-й

уставки», а исправленный код  $011_2$  передается в систему управления. Если при сбое в третьем канале возникает код  $100_2$ , то указывается причина неисправности «сбой канала 3-й уставки» и выдается откорректированный код  $000_2$ . Подобным образом выполняется коррекция при сбое в канале второй уставки с кода  $101_2$  на исправленный код  $111_2$ . или при сбое канала 1-й уставки с кода  $110_2$  на код  $111_2$ . В результате каждый дефектный код подвергается коррекции.

Если измерительная часть реле исправна, сигналы с выходов компараторов поступят на выход реле и далее в систему управления. Исправность измерительной части реле методом хроноконтроля оценивается по величине приращения кода частоты следующим образом. В случае появления при очередном измерении частоты запредельного приращения, указывающего на неисправность измерительной части реле выдается сигнал «сбой измерительного блока» в систему управления, а неисправности каналов уставок реле устанавливаются по последовательности появления сигналов уставок следующим образом.

Если частота вращения вала контролируемого объекта монотонно возрастает, то на разрядах входа дешифратора диагностической схемы в начале оказывается нулевой код ( $000_2$ ). В процессе разгона по мере увеличения частоты вращения последовательно появляются сигналы  $001_2$ ,  $011_2$  и при дальнейшем разгоне достигается третья уставка частоты и формируется код  $111_2$ . В результате при разгоне для исправных каналов уставок естественной является последовательность кодов  $000_2$ ,  $001_2$ ,  $011_2$  и  $111_2$ , которые без коррекции подаются поразрядно на выходные каскады реле. Переход от предыдущего кода к последующему выполняется путем сравнения текущего приращения частоты с кодом допустимого приращения частоты за заданный промежуток времени. Остальные коды ( $010_2$ ,  $100_2$ ,  $101_2$  и  $110_2$ ), аналогично принципу последовательности, служат признаком выхода из строя канала определенной уставки, являются дефектными, и требуют коррекции. Таким образом, в САУ поступает достоверная информация, а при возникновении сбоя в информационных каналах указывается неисправный элемент.

Общий случай технической реализации самодиагностики, построенной на принципе последовательности можно рассмотреть на примере  $n$ -канального реле (рис. 2) [11]. Обозначения на рис. 2: 1-1, 1-2..., 1- $i$ ..., 1- $n$  – приемные датчики соответствующих уставок; 2-1, 2-2..., 2- $i$ ..., 2- $n$ , 9 – логические элементы НЕ; 3-1, 3-2..., 3- $i$ ..., 3- $n$ , 4-1, 4-2..., 4- $i$ ..., 4- $n$ , 5 – формирователи коротких импульсов; 6 – индикатор сбоя в информационных каналах; 7, 8 – RS-триггеры; 10, 11, 12, 13, 14 – логические элементы ИЛИ; 15 – шину СБРОС; 16, 17 – логические элементы И; 18, 19 – числовые компараторы; 20, 21 – блоки памяти; 22 – регистр памяти; 23 – дешифратор.

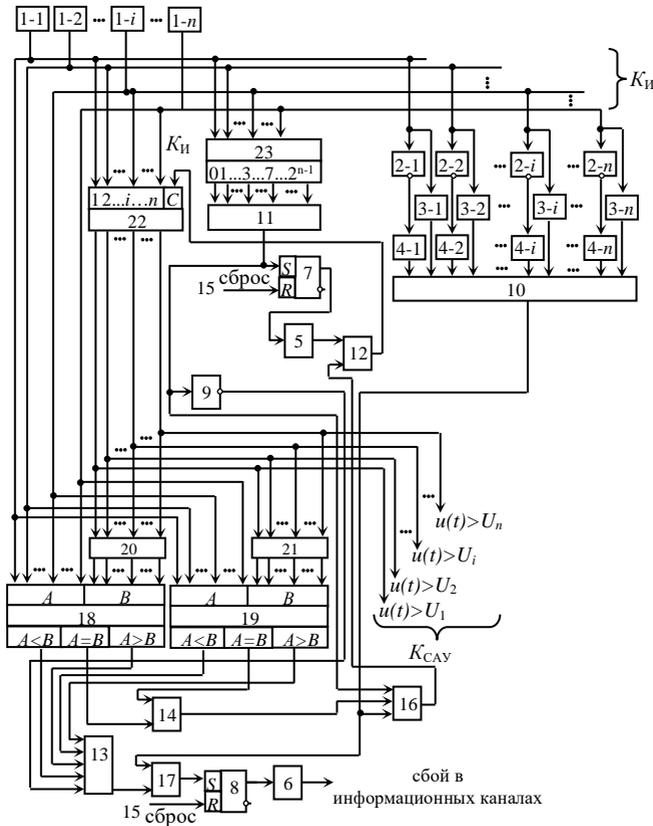


Рис. 2. Схема  $N$ -канального реле с функцией самодиагностики

Fig. 2. Diagram of an  $N$ -channel relay with a self-diagnostic function

Реле работает следующим образом. Датчики 1-1, 1-2, ..., 1- $i$ , ..., 1- $n$  настроены на параметры срабатывания соответственно  $U_1, U_2, \dots, U_i, \dots, U_n$ , причем  $U_n > U_{n-1} > \dots > U_i > U_{i-1} > \dots > U_2 > U_1$  (рис. 1, в). Одновременно с включением САУ подается сигнал на шину СБРОС 15. Этот сигнал поступают на сбросовые входы триггеров 7 и 8. Триггеры 7 и 8 переводятся в нулевое состояние и сигналы на их прямых выходах исчезают.

Если в момент времени  $t = 0$  (рис. 1, в) контролируемая величина  $u(t)$  меньше первой уставки  $U_1$ , на выходах датчиков 1-1, 1-2, ..., 1- $i$ , ..., 1- $n$  сигналы  $X_1, X_1, \dots, X_i, \dots, X_n$  отсутствуют. На вход регистра 22 и дешифратора 23 поступает нулевой код  $K_H$ . На нулевом выходе дешифратора 23 появляется сигнал, поступающий на вход элемента ИЛИ 11. На выходе элемента ИЛИ 11 появляется сигнал, который переводит триггер 7 в единичное

состояние. Появляется сигнал на прямом выходе триггера 7, по фронту которого формирователь коротких импульсов 5 вырабатывает импульс. Этот импульс проходит через элемент ИЛИ 12 и поступает на вход записи регистра 22. В регистр 22 заносится нулевой код  $K_{САУ} = K_{И} = 00...000...0000_2 = 0_{10}$ , который подается в САУ и на входы адреса блоков памяти 20 и 21. По адресам блоков памяти 20 и 21 записаны коды, представленные в табл. 1.

С ростом контролируемой величины  $u(t)$  в момент времени  $t_1$  (рис. 1, в) срабатывает датчик 1-1, на выходе которого появляется сигнал  $X_1$ . Одновременно на первый вход компаратора 18, вход регистра 22 и дешифратора 23 поступает код  $K_{И} = 00...000...0001_2 = 1_{10}$ . Появляется сигнал на первом выходе дешифратора 23, который через элемент ИЛИ 11 подготавливает по первому входу логический элемент И 16. На входе адреса блока памяти 20 устанавливается нулевой код, в соответствии с которым с выхода блока памяти 20 на второй вход компаратора 18 подается код, совпадающий с кодом  $K_{И}$  на его первом входе (табл. 1). На выходе РАВНО компаратора 18 появляется сигнал, который через элемент ИЛИ 14 подготавливает по второму входу элемент И 16. Сигнал  $X_1$  с выхода датчика 1-1 кроме того поступает на формирователь коротких импульсов 3-1. Формирователь 3-1 выдает импульс, который через элемент ИЛИ 10, элемент И 16 и элемент ИЛИ 12 поступает на вход записи регистра 22, в который заносится очередной код  $K_{САУ} = K_{И} = 00...000...0001_2 = 1_{10}$ , поступающий в САУ и на входы адреса блоков памяти 20 и 21.

По мере роста контролируемой величины в момент времени  $t_2$  (рис. 1, в) срабатывает датчик 1-2. На выходе датчика 1-2 появляется сигнал  $X_2$ . При этом на первый вход компаратора 18, входы дешифратора 23 и регистра 22 поступает код  $K_{И} = 00...000...0011_2 = 3_{10}$ . На входе адреса блока памяти 20 присутствует предыдущий код  $K_{И}$ , по которому на выходе блока 20 появляется код, совпадающий с кодом на первом входе компаратора 18 (табл. 1). Проходя через элемент ИЛИ 14 сигнал с выхода РАВНО компаратора 18 подготавливает по второму входу элемент И 16, который по первому входу подготовлен сигналом с третьего выхода дешифратора 23, поступающим через элемент ИЛИ 11. Формирователь коротких импульсов 3-2 по фронту сигнала  $X_2$  с выхода датчика 1-2 вырабатывает импульс, который проходя через элементы И 16 и ИЛИ 12 записывает в регистр 22 новый код  $K_{САУ} = K_{И} = 00...000...0011_2 = 3_{10}$ , подаваемый в САУ и на входы адреса блоков памяти 20 и 21.

Таблица 1.  
Коды, записанные по адресам блоков памяти 20 и 21

Table 1.  
Codes recorded at the addresses of memory blocks 20 and 21

№	Код адреса блока памяти 20											Выходной код блока памяти 20											
	разряды двоичного кода										де-ся-тич-ный	разряды двоичного кода										деся-тич-ный	
	$n$	$n-1$	...	$i+1$	$i$	$i-1$	...	4	3	2		1	$n$	$n-1$	...	$i+1$	$i$	$i-1$	...	4	3		2
0	0	0	...	0	0	0	...	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	...	0	0	0	1	1
1	0	0	...	0	0	0	...	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	...	0	0	1	1	3
2	0	0	...	0	0	0	...	0	0	1	1	3	3	0	0	0	0	...	0	1	1	1	7
3	0	0	...	0	0	0	...	0	1	1	1	7	7	0	0	0	0	...	1	1	1	1	15
			...				...										...						
$i$	0	0	...	0	1	1	...	1	1	1	1	$2^{i-1}$	$2^{i-1}$	0	0	...	1	1	1	...	1	1	$2^{i+1-1}$
			...				...										...						
$n$	1	1	...	1	1	1	...	1	1	1	1	$2^{n-1}$	$2^{n-1}$	1	1	...	1	1	1	...	1	1	$2^n-1$
Код адреса блока памяти 21											Выходной код блока памяти 21												
0	0	0	...	0	0	0	...	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	...	0	0	0	0	0
1	0	0	...	0	0	0	...	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	...	0	0	0	0	0
2	0	0	...	0	0	0	...	0	0	1	1	3	3	0	0	0	0	...	0	0	0	1	1
3	0	0	...	0	0	0	...	0	1	1	1	7	7	0	0	0	0	...	0	0	1	1	3
			...				...										...						
$i$	0	0	...	0	1	1	...	1	1	1	1	$2^{i-1}$	$2^{i-1}$	0	0	...	0	0	1	...	1	1	$2^{i-1-1}$
			...				...										...						
$n$	1	1	...	1	1	1	...	1	1	1	1	$2^{n-1}$	$2^{n-1}$	0	1	...	1	1	1	...	1	1	$2^{n-1-1}$

При последующем возрастании контролируемой величины  $u(t)$  с появлением каждого очередного сигнала  $X_i$  на выходах датчиков  $1-i$  формирователь  $3-i$  вырабатывает импульс, посредством которого в регистр 22 производится запись очередного большего кода  $K_{САУ} = K_i = 00...011...1111_2 = (2^i - 1)_{10}$ . Запись кода предваряется его проверкой на компараторе 18, как описано выше. Когда контролируемая величина  $u(t)$  достигает предельного значения в момент времени  $t_4$  (рис. 1, в) и появляется сигнал  $X_n$  на выходе датчика  $1-n$  формирователь  $3-n$  вырабатывает импульс, которым в регистр 22 записывается единичный код  $K_{САУ} = K_i = 11...111...1111_2 = (2^n - 1)_{10}$ .

Таким образом, по мере монотонного возрастания контролируемой величины  $u(t)$  и исправном состоянии информационных каналов они формируют естественную последовательность кодов:  $K_i = 00...000...0000_2 = 0_{10}$ ,  $K_i = 00...000...0001_2 = 1_{10}$ ,  $K_i = 00...000...0011_2 = 3_{10}$ , ...,  $K_i = 00...011...1111_2 = (2^i - 1)_{10}$ , ...,  $K_i = 11...111...1111_2 = (2^n - 1)_{10}$ , поступающих в САУ. Приведенная естественная последовательность кодов подчиняется закону  $K_i = (2^i - 1)_{10}$ , при  $i = 0, 1, 2, 3, \dots, n$ .

При уменьшении контролируемой величины  $u(t)$  в момент времени  $t_5$  (рис. 1, в) исчезает сигнал  $X_n$  на выходе датчика  $1-n$ . На входы регистра 22, дешифратора 23 и первый вход компаратора 19, поступает код  $K_i = 01...111...1111_2 = (2^{n-1} - 1)_{10}$ . Появляется сигнал на выходе дешифратора 23, который проходит через элемент ИЛИ 11 и подготавливает элемент И 16 по первому входу. С выхода регистра 22 на вход адреса блока памяти 21 поступает единичный код. Блок памяти 21 выдает на второй вход компаратора 19 код равный коду на первом его входе (табл. 1). Появляется сигнал на выходе РАВНО компаратора 19, который через элемент ИЛИ 14 подготавливает элемент И 16 по второму входу. При исчезновении сигнала  $X_n$  на выходе датчика  $1-n$ , появляется сигнал на выходе элемента НЕ  $2-n$ , поступающий на вход формирователя  $4-n$ . Формирователь  $4-n$  выдает импульс, который через элемент ИЛИ 10 поступает на третий вход элемента И 16. Появляется импульс на выхода элемента И 16, который проходит через элемент ИЛИ 12 и поступает на вход записи регистра 22, производя запись нового кода  $K_{САУ} = K_i = 01...111...1111_2 = (2^{n-1} - 1)_{10}$ , поступающего в САУ.

По мере дальнейшего уменьшения контролируемой величины  $u(t)$  в момент времени  $t_6$  (рис. 1, в) исчезает сигнал  $X_i$  на выходе очередного датчика  $1-i$ , а на выходе элемента НЕ  $2-i$  сигнал появляется, и по его фронту формирователь  $4-i$  вырабатывает импульс, с участием которого в регистр 22 заносится новый меньший код  $K_{САУ} = K_i = 00...011...1111_2 = (2^i - 1)_{10}$ . Перед записью код проверяется на компараторе 19, как описано выше.

Аналогично происходит перезапись кода в регистр 22 при последующем уменьшении контролируемой величины. В момент времени  $t_7$  (рис. 1, в), когда исчезает сигнал  $X_2$  на выходе датчика  $1-2$  и появлении импульса на

выходе формирователя 4-2 в регистр 22 заносится код  $K_{САУ} = K_{И} = 00...000...0001_2 = 1_{10}$ . В момент времени  $t_8$  (рис. 1, в) пропадает сигнал  $X_1$  на выходе датчика 1-1. Появляется импульс на выходе формирования 4-1, и в регистр 22 заносится код  $K_{САУ} = K_{И} = 00...000...0000_2 = 0_{10}$ . В результате при монотонном уменьшении контролируемой величины и исправности измерительных каналов в САУ поступают коды из указанной выше естественной последовательности кодов.

Таким образом, при любом поведении контролируемой величины и исправности измерительных каналов в САУ поступают коды, входящие в естественную последовательность кодов. Появление сбойного кода, не принадлежащего этой последовательности, или нарушение очередности появления кодов является признаком неисправности измерительного канала.

Поступление сбойного кода предотвращается устройством следующим образом. К входам логического элемента ИЛИ 11 подключены выходы дешифратора 23 с номерами соответствующими естественной последовательности кодов 0, 1, 3, 7, 15, ...,  $(2^n-1)$ . Пусть в исходном состоянии на выходах всех датчиков 1-1 ... 1-n присутствуют сигналы и в регистр 22 записан код  $K_{САУ} = K_{И} = 11...111...1111_2$ , подаваемый в САУ. Если возникает сбой, например, датчика 1-1 и сигнал  $X_1$  на его выходе пропадает, на вход дешифратора 23 поступает код  $K_{И} = 11...111...1110_2$ , не принадлежащий к числу кодов из естественной последовательности, то сигнал появляется на том выходе дешифратора 23, который не связан с входом элемента ИЛИ 11. Сигнал на выходе элемента ИЛИ 11 отсутствует. По первому входу закрывается логический элемент И 16, предотвращая перезапись кода в регистр 22. Одновременно появляется сигнал на выходе элемента НЕ 9, который проходит через элемент ИЛИ 13 и подготавливает элемент И 17 по второму входу. При исчезновении сигнала  $X_1$  на входе датчика 1-1 появляется сигнал на выходе элемента НЕ 2-1. Формирователь 4-1 по фронту этого сигнала вырабатывает импульс, который через элемент И 17 поступает на единственный вход триггера 8. Триггер 8 меняет состояние и появляется сигнал на его прямом выходе, включающий индикатор 6, который указывает на сбой в информационных каналах. При возникновении других сбойных кодов работа устройства осуществляется, как описано выше.

Коды, входящие в естественную последовательность, должны появляться в определенном порядке. За кодом  $K_{И} = (2^i-1)_{10}$  при росте контролируемой величины должен следовать код  $K_{И} = (2^{i+1}-1)_{10}$ , а при уменьшении – код  $K_{И} = (2^{i-1}-1)_{10}$ . Нарушение такой последовательности появления кодов является признаком сбоя в информационных каналах. В таких случаях устройство работает следующим образом. В блоке памяти 20 по адресам записаны последующие коды при возрастании контролируемой величины, а в

блоке памяти 21 – при снижении контролируемой величины. Пусть в регистр 22 записан код  $K_{CAУ} = K_{И} = 00...000...0011_2$  при возрастании контролируемой величины, а в результате сбоя в информационных каналах одновременно появляются сигналы  $X_3, X_4$  на выходах датчиков 1-3, 1-4 и формируется код  $K_{И} = 00...000...1111_2$ , который поступает на входы регистра 22, дешифратора 23 и первые входы компараторов 18 и 19. По адресу, заданному регистром 22 на выходе блока памяти 20 установится код  $00...000...0111_2$  (табл. 1), который поступает на второй вход компаратора 18. Появляется сигнал на выходе БОЛЬШЕ ( $A > B$ ) компаратора, который подается на третий вход элемента ИЛИ 13. Логический элемент ИЛИ 13 открывается и сигнал с его выхода подготавливает элемент И 17 по второму входу. Одновременно формирователи 2-3, 2-4 по фронту сигналов  $X_3, X_4$  с выходов датчиков 1-3, 1-4 выдают импульсы, которые поступают на входы элемента ИЛИ 10. С выхода элемента ИЛИ 10 сигнал поступает на первый вход элемента И 17. Логический элемент И 17 открывается, подавая импульс на единичный вход триггера 8, который меняет свое состояние. Появляется сигнал на прямом выходе триггера 8, который включает индикатор 6, указывающий на сбой в информационных каналах. Вместе с тем по адресу, заданному регистром 22, на выходе блока памяти 21 установится код  $00...000...0001_2$  (табл. 1), который поступает на второй вход компаратора 19. Появляется сигнал на выходе БОЛЬШЕ ( $A > B$ ) компаратора 19. На выходах РАВНО компараторов 18 и 19 сигналы отсутствуют, поэтому сигнал отсутствует на выходе элемента ИЛИ 14, а элемент И 16 оказывается закрытым по второму входу, препятствуя записи в регистр 22 недостоверного кода  $K_{И}$ .

При других случаях нарушения последовательности появления кодов устройство работает аналогично описанному выше.

В результате в САУ поступает достоверная информация от измерительных реле, а при возникновении неисправности выдается сигнал, предупреждающий о сбое.

#### IV. Заключение

Рассмотренные принципы последовательности и хроноконтроля, позволяют, таким образом, разрабатывать интеллектуальные реле автоматики с функциями реконструктивной и самодиагностики. Использование интеллектуальных реле в системах автоматического управления позволит повысить надежность САУ и сократить время восстановления при возникновении сбоев.

© Сугаков В.Г., 2023  
© Малышев Ю.С., 2023

Поступила в редакцию 12.02.2023  
Принята к публикации 25.05.2023

Received 12.02.2023

Accepted 25.05.2023

**Библиографический список**

- [1] Герман Л.А., Субханвердиев К.С., Герман В.Л. Автоматизация электроснабжения тяговой сети переменного тока. М.: ФГБУ ДПО «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2022. – 264 с.
- [2] Черкесов Г.Н. Надежность аппаратно-программных комплексов. СПб.: Питер, 2005. – 478 с.
- [3] Зубрикас И.И. Математические методы анализа и обработки индивидуальной диагностической информации. Великий Новгород: НовГУ, 2006. – 64 с.
- [4] Кулагин А.В. Диагностирование состояния судовых дизельных двигателей вероятностным методом распознавания неисправностей // Научные проблемы водного транспорта. 2021. № 69 (4). С. 109-122. DOI: 10.37890/jwt.vi69.220
- [5] Соловьев А.В., Поселенов Е.Н. Обзор современных систем управления двигателями внутреннего сгорания // Научные проблемы водного транспорта. 2021. № 67 (2). С.42-52. DOI: 10.37890/jwt.vi67.192
- [6] Кулагин А.В. Формирование информационных потоков при диагностировании судовых энергетических установок // Научные проблемы водного транспорта. 2022. № 70 (1). С. 77-86. DOI: 10.37890/jwt.vi70.237
- [7] Лесной Б.В., Крылов Е.Г. Надежность и диагностика автоматизированных систем. Волгоград: Политехник, 2007. – 80 с.
- [8] Бржозовский Б.М., Игнагьев А.А., Мартынов В.В., Схиртладзе А.Г. Надежность и диагностика технологических систем. Саратов: СГТУ, 2006. – 303 с.
- [9] Малышев Ю.С., Сугаков В.Г. Реконструктивная диагностика системы автоматического управления судовой электростанции с математической коррекцией значений аргументов функций управления // Эксплуатация Морского Транспорта. 2011. № 3 (65). С. 60-66.
- [10] Сугаков В.Г., Малышев Ю.С. Цифровое реле частоты вращения с функцией реконструктивной диагностики, Пат. 2618495 RU, заявл. 30.03.16; опубл. 03.05.17. – Бюл. № 13.
- [11] Сугаков В.Г., Малышев Ю.С., Ягзов И.И. Цифровое n-канальное реле с функцией самодиагностики, Пат. 2685445 RU, заявл. 21.03.18; опубл. 18.04.19. – Бюл. № 11.

**References**

- [1] L.A. German, K.S. Subkhanverdiev and V.L. German, *Avtomatizatsiya ehlektrosnabzheniya tyagovoi seti peremennogo toka [Automation of power supply of AC traction network]*. Moscow: FGBU DPO “Educational and methodological center for education in railway transport”, 2022 (in Russian).
- [2] G.N. Cherkesov, *Nadezhnost' apparatno-programmnykh kompleksov [Reliability of hardware and software systems]*. St. Petersburg: Piter, 2005 (in Russian).
- [3] I.I. Zubrikas, *Matematicheskie metody analiza i obrabotki individual'noi diagnosticheskoi informatsii [Mathematical methods of analysis and processing of individual diagnostic information]*. Veliky Novgorod: NovSU, 2006 (in Russian).

- [4] A.V. Kulagin, “Diagnosing the state of marine diesel engines by probabilistic fault recognition method”, *Russian Journal of Water Transport*, vol. 69, no. 4, pp. 109-122, 2021. DOI: 10.37890/jwt.vi69.220
- [5] A.V. Solov'ev and E.N. Poselenov, “Overview of modern control systems for internal combustion engines”, *Russian Journal of Water Transport*, vol. 67, no. 2, pp. 42-52, 2021. DOI: 10.37890/jwt.vi67.192
- [6] A.V. Kulagin, “Formation of information flows during diagnostics of ship power plants”, *Russian Journal of Water Transport*, vol. 70, no. 1, pp. 77-86, 2022. DOI: 10.37890/jwt.vi70.237
- [7] B.V. Lesnoi and E.G. Krylov, *Nadezhnost' i diagnostika avtomatizirovannykh sistem [Reliability and diagnostics of automated systems]*. Volgograd: Politehnik, 2007 (in Russian).
- [8] B.M. Brzhozovskii, A.A. Ignat'ev, V.V. Martynov and A.G. Skhirtladze, *Nadezhnost' i diagnostika tekhnologicheskikh sistem [Reliability and diagnostics of technological systems]*. Saratov: SSTU, 2006 (in Russian).
- [9] Y.S. Malyshev and V.G. Sugakov, “Reconstructive diagnostics of the automatic control system of the ship power station with mathematical correction of arguments of control functions”, *Operation of Maritime Transport*, vol. 3, no. 65, pp. 60-66, 2011.
- [10] V.G. Sugakov and Yu.S. Malyshev, “*Cifrovoe rele chastoty vrashcheniya s funkciej rekonstruktivnoj diagnostiki [Digital speed relay with reconstructive diagnostics]*”, Patent RU 2618495, May 03, 2017 (in Russian).
- [11] V.G. Sugakov and Yu.S. Malyshev and I.I. Yagzhov, “*Cifrovoe n-kanal'noe rele s funkciej samodiagnostiki [Digital n-channel relay with self-diagnosis function]*”, Patent RU 2685445, Apr. 18, 2019 (in Russian).

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Сугаков Валерий Геннадьевич**, доктор технических наук, профессор Волжского государственного университета водного транспорта, г. Нижний Новгород, Российская Федерация

**Valerii G. Sugakov**, D. Sci. (Eng.), professor of the Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russian Federation

**Малышев Юрий Сергеевич**, кандидат технических наук, доцент Волжского государственного университета водного транспорта, г. Нижний Новгород, Российская Федерация

**Yurii S. Malyshev**, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russian Federation

УДК 621.3.064

DOI 10.46960/2658-6754\_2023\_3\_65

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ УПРАВЛЯЕМОЙ КОММУТАЦИИ ВАКУУМНЫМ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕМ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ**

**Д.Е. Шевцов**

ORCID: 0000-0003-0792-9624 e-mail: shevtsov@corp.nstu.ru

Новосибирский государственный технический университет  
*Новосибирск, Россия***Д.А. Павлюченко**

ORCID: 0000-0003-4522-9557 e-mail: pavlyuchenko@corp.nstu.ru

Новосибирский государственный технический университет  
*Новосибирск, Россия***Л.И. Шевцова**

ORCID: 0000-0003-2550-1576 e-mail: shevczova@corp.nstu.ru

Новосибирский государственный технический университет  
*Новосибирск, Россия***Н.В. Александров**

ORCID: 0009-0004-8208-4056 e-mail: alexandrov@mail.ru

Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления  
*Улан-Удэ, Россия***Э.Г. Ядагаев**

ORCID: 0009-0001-6298-5306 e-mail: yadagaev@mail.ru

АО «Чукотэнерго»  
*Анадырь, Россия*

Представлены результаты исследования переходных процессов, возникающих при управляемой коммутации вакуумными выключателями электродвигателей 6 (10) кВ в режиме пуска. Для управления коммутацией размыкание или замыкание полюсов выключателя происходит в разное время. В *MatLab/Simulink* разработана модель синхронного вакуумного выключателя 6 (10) кВ. Произведено моделирование переходных процессов при управляемой коммутации вакуумным выключателем электродвигателей. Рассмотрено влияние моментов коммутации полюсов выключателя на уровень перенапряжений. Проведенные исследования показали, что использование средств управляемой коммутации в электрических сетях 6 (10) кВ при включениях и отключениях электродвигателей позволяет проводить коммутацию в оптимальных для оборудования условиях с минимальными переходными напряжениями.

**Ключевые слова:** вакуумный выключатель, высокочастотные перенапряжения, переходные процессы, синхронный выключатель, управляемая коммутация, электродвигатель.

**Для цитирования:** Шевцов Д.Е., Павлюченко Д.А., Шевцова Л.И., Александров Н.В., Ядагаев Э.Г. Исследование переходных процессов при управляемой коммутации вакуумным выключателем электродвигателей // Интеллектуальная Электротехника. 2023. № 3. С. 65-83. DOI: 10.46960/2658-6754\_2023\_3\_65

## **THE STUDY OF TRANSIENTS UNDER CONTROLLED SWITCHING OF ELECTRIC MOTORS BY VACUUM CIRCUIT BREAKER**

**D.E. Shevtsov**

ORCID: **0000-0003-0792-9624** e-mail: **shevtsov@corp.nstu.ru**  
Novosibirsk State Technical University  
*Novosibirsk, Russia*

**D.A. Pavlyuchenko**

ORCID: **0000-0003-4522-9557** e-mail: **pavlyuchenko@corp.nstu.ru**  
Novosibirsk State Technical University  
*Novosibirsk, Russia*

**L.I. Shevtsova**

ORCID: **0000-0003-2550-1576** e-mail: **shevczova@corp.nstu.ru**  
Novosibirsk State Technical University  
*Novosibirsk, Russia*

**N.V. Alexandrov**

ORCID: **0009-0004-8208-4056** e-mail: **alexandrov@mail.ru**  
East Siberian State University of Technology and Management  
*Ulan-Ude, Russia*

**E.G. Yadagaev**

ORCID: **0009-0001-6298-5306** e-mail: **yadagaev@mail.ru**  
JSC “Chukotenergo”  
*Anadyr, Russia*

**Abstract.** The paper presents the results of a study of transients during controlled switching of 6 (10) kV electric motors by vacuum circuit breakers in the start-up mode. The opening or closing of the circuit breaker poles occurs at different times to control the switching. A MatLab/Simulink model of a 6 (10) kV synchronous vacuum circuit breaker was developed. Simulation of transients during controlled switching of electric motors by

a vacuum circuit breaker was carried out. The influence of switching moments of switch poles on the overvoltage level is considered. The conducted studies have shown that the use of controlled switches in 6 (10) kV electrical networks during electric motors switching on and off makes it possible to carry out switching in conditions that are optimal for equipment with minimal transient voltages.

**Keywords:** controlled switching, current surges, electric motor, high-frequency overvoltages, synchronous circuit breaker, transients, vacuum circuit breaker.

**For citation:** D.E. Shevtsov, D.A. Pavlyuchenko, L.I. Shevtsova, N.V. Alexandrov and E.G. Yadagaev, "The study of transients under controlled switching of electric motors by vacuum circuit breaker", *Smart Electrical Engineering*, no. 3, pp. 65-83, 2023. DOI: 10.46960/2658-6754\_2023\_3\_65

## I. Введение

В электрических сетях 6 (10) кВ преимущественно используются вакуумные выключатели, имеющие ряд эксплуатационных преимуществ [1, 2]. Однако, наряду с этим у вакуумных аппаратов имеется существенный недостаток, связанный с коммутациями индуктивных нагрузок. Коммутации такими аппаратами могут инициировать многократные повторные зажиганиями (ПЗ) дуги и, соответственно, высокочастотные перенапряжения, что представляет опасность для изоляции электрооборудования, особенно электродвигателей и кабелей из сшитого полиэтилена, имеющих наименьший запас электрической прочности [3-7].

При отключении электродвигателей основное влияние на уровень перенапряжений оказывают: мощность и режим работы двигателя, длина линии электропередачи и момент коммутации аппарата. Отключение нагруженного и ненагруженного электродвигателя дает обычно перенапряжения не более  $2,7 \cdot U_{\phi m}$  при возникновении ПЗ дуги [4, 8]. Отключение электродвигателя в режиме пуска приводит к более опасным значениям, при возникновении виртуальных срезов тока до  $5 \cdot U_{\phi m}$  и более [6, 7, 9]. При включении двигательной нагрузки большое влияние на переходной процесс оказывают характеристики выключателя [8, 10]: неодновременность в работе полюсов аппарата и скорость снижения электрической прочности при сближении контактов. По теоретическим сведениям, наибольшая величина перенапряжений достигает  $3 \cdot U_{\phi m}$  [7]. По экспериментальным данным [7, 8, 10], уровень перенапряжений доходит до  $2,7 \cdot U_{\phi m}$ .

В настоящее время отсутствуют эффективные способы ограничения высокочастотных перенапряжений. Разрядники, ограничители перенапряжения, искровые промежутки не влияют на частоту воздействующего напряжения. RC-цепи требуют точного моделирования для правильного выбора параметров в каждом отдельном случае [5, 6, 8, 9, 11]. Кроме того, имеющиеся средства снижения воздействий переходного процесса не решают

первопричину образования перенапряжений, так как коммутация электрической сети проводится в произвольный момент времени, а значит, может произойти в наихудшей фазе напряжения.

Управление моментом включения или отключения сети позволит исключить неблагоприятные условия коммутации и с этой точки зрения является принципиально новым подходом в снижении уровней перенапряжения и бросков тока, увеличении коммутационного ресурса выключателей. Управляемая (или синхронная) коммутация представляет собой разновременное переключение полюсов выключателя в строго определенный момент времени в наиболее подходящих для оборудования условиях [12-14]. Таким образом, целью работы является исследование переходных процессов в электрической сети 6 (10) кВ при разновременном включении и отключении фаз электродвигателя вакуумным выключателем и определение наилучших для оборудования условий управляемой коммутации.

## II. Материалы и методы

Модель электрической сети 6 (10) кВ, представленная на рис. 1, позволяет проводить исследования процессов коммутации вакуумными выключателями индуктивной нагрузки. В модели реализовано независимое управление моментов включения и отключения полюсов вакуумного выключателя. Модель разработана с использованием стандартных блоков *MatLab/Simulink* [15].

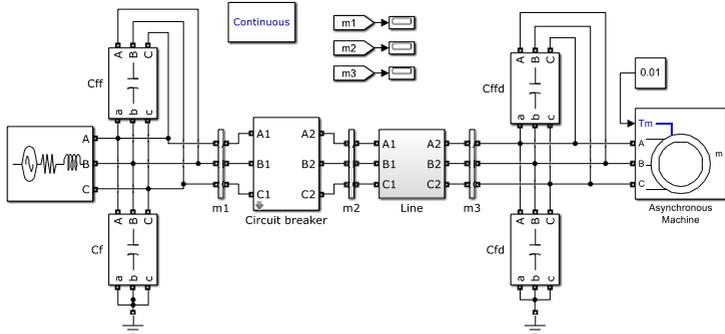


Рис. 1. Модель электрической сети

Fig. 1. Electric network model

Моделирование источника питания выполнено блоком *Three-Phase Source*. Источник питания имитирует точку подключения к энергосистеме с заданными параметрами в виде внутреннего сопротивления и имеет изолированную нейтраль.

В основе исследования коммутационных процессов лежит разработанная авторами модель синхронного вакуумного выключателя (рис. 2-4),

реализующая уникальную функцию управляемого включения и отключения [16]. Момент времени коммутации полюсов синхронного выключателя задается при помощи блоков *Start1-Start3* (рис. 3 и 4). Силовые контакты и электрическая дуга в межконтактном промежутке моделируются блоками *Contact1-Contact3* и *Arc1-Arc3* (рис. 2). Сопротивление электрической дуги в модели выключателя учитывается активным сопротивлением, пропорциональным величине отключаемого тока.

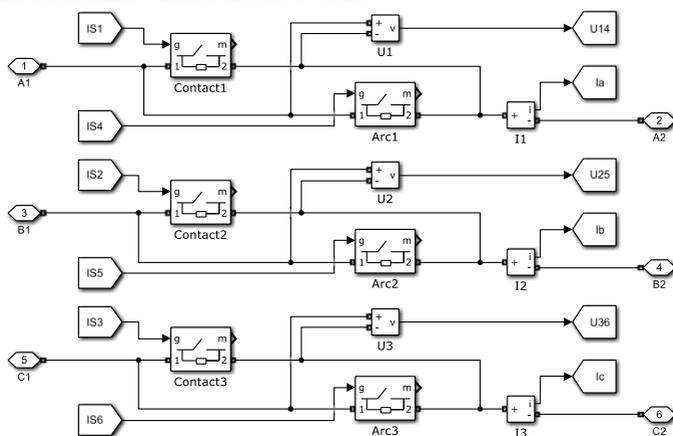


Рис. 2. Внешний вид модели синхронного вакуумного аппарата

Fig. 2. Appearance of the synchronous vacuum circuit breaker model

Управление включением и отключением синхронного выключателя реализовано специально разработанными блоками *ControlledOpening* и *ControlledClosing*, представленных на рис. 3 и 4.

При подаче команды на отключение (рис. 3) происходит возрастание электрической прочности межконтактного промежутка, что реализовано для каждого полюса выключателя блоками *DielectricStrength1-DielectricStrength3*. Для измерения токов в фазах применяются амперметры *I1-I3*, и в случае достижения током в одной из фаз значения тока среза выключателя подается команда на гашение электрической дуги в этой фазе при помощи блоков *ArcExtinction1-ArcExtinction3*.

Между контактами выключателя измеряется напряжение восстановления вольтметрами *U1-U3*, и в случае недостаточной электрической прочности межконтактного промежутка блоками *ArcReignition1-ArcReignition3* направляется управляющий сигнал на зажигание дуги. Далее гашение дуги возможно только при прохождении тока через нулевое значение со скоростью не более заданной или виртуальных срезах тока. Блоки *ArcExtinction4-ArcExtinction6* формируют управляющий сигнал на погасание дуги.



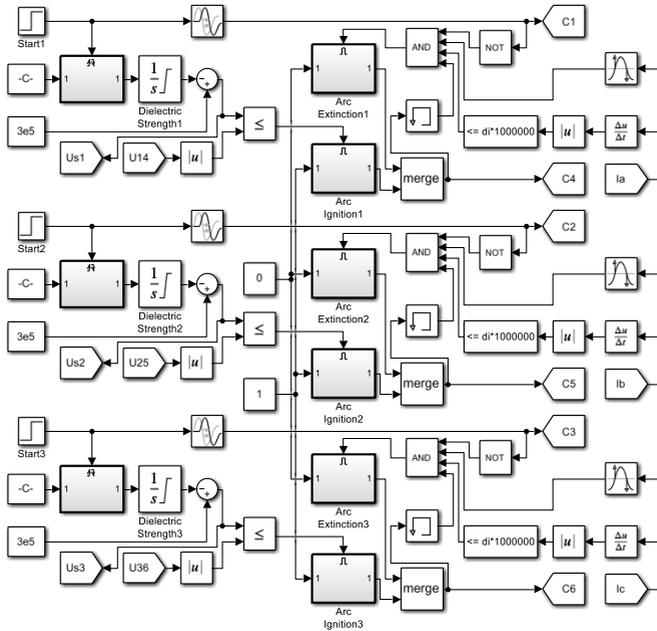


Рис. 4. Блок ControlledClosing

Fig. 4. Block ControlledClosing

Моделирование электродвигателя выполнено блоком *Asynchronous Machine*. Блок асинхронного двигателя состоит из моделей электрической части и механической части [5]. Параметры блока определяются по методике из [15] и подходят для моделирования нормального режима работы электродвигателя, однако в пусковом режиме токи завышены. Поэтому для режима пуска сопротивления двигателя определяются по выражениям, представленным в [17].

Исследование коммутационных перенапряжений требует учета емкостных связей в элементах сети, что реализовано стандартными блоками *RLC Branch*. Проверка работоспособности и адекватности разработанной имитационной модели электрической сети 6 (10) кВ при коммутации реактивных нагрузок выполнено на основе сравнения полученных результатов с экспериментальными данными, представленными в [10, 18].

На рис. 5, а [18] приведены экспериментальные осциллограммы напряжений при отключении пускового тока заторможенного электродвигателя напряжением 6 кВ мощностью 200 кВт вакуумным выключателем. Длина кабельной линии между двигателем и выключателем составляет

100 м. Для сравнения на рис. 5, б показаны осциллограммы напряжений, выполненные с помощью модели для условий этого эксперимента.

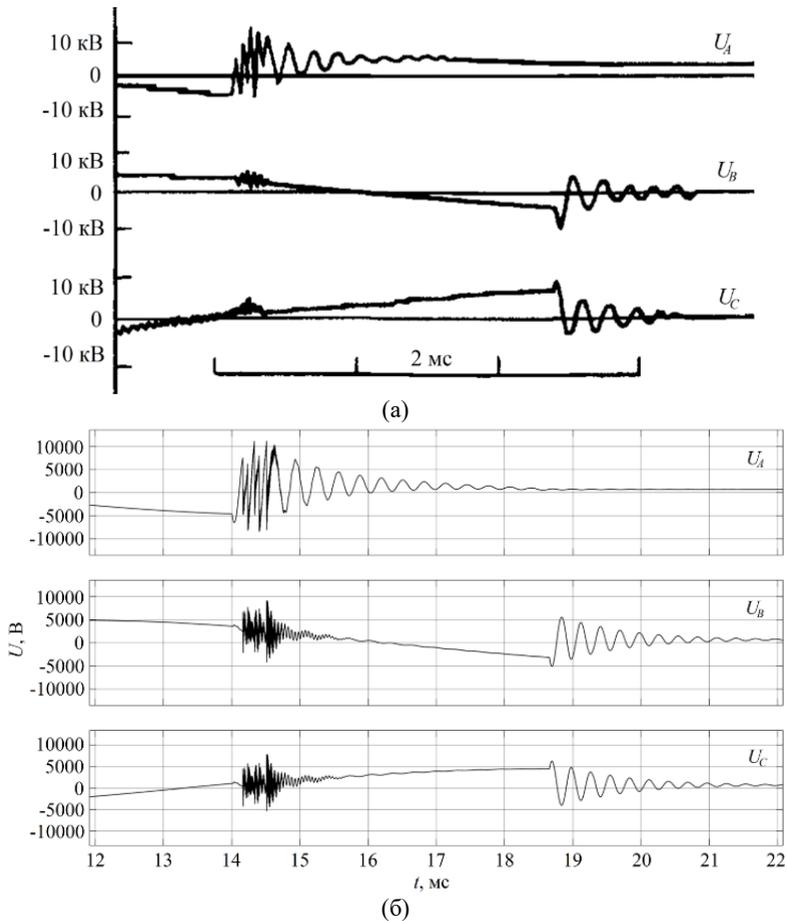
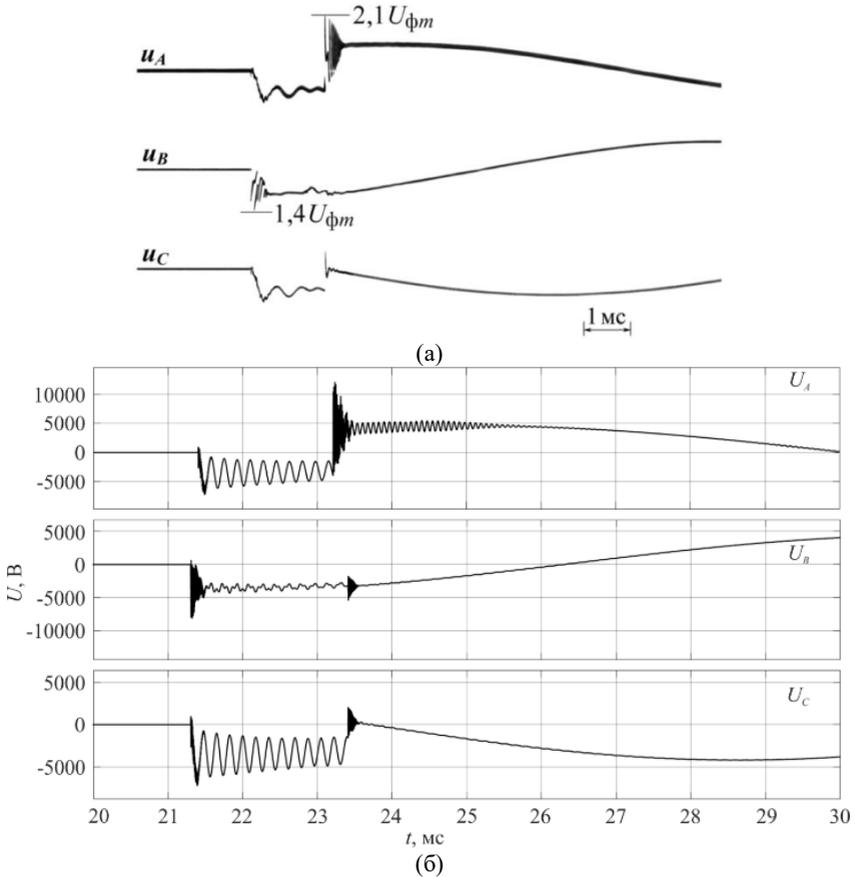


Рис. 5. Напряжения при отключении пускового тока электродвигателя: экспериментальные данные (а); моделирование (б)

Fig. 5. Voltage when the starting current of the electric motor is switched off: experimental data (a); simulation (b)

Экспериментальные осциллограммы процесса включения электродвигателя (напряжение 10 кВ, мощность 2000 кВт, длина кабеля 290 м) вакуумным выключателем представлены на рис. 6, а [10]. Соответствующие

кривые, полученные при помощи имитационного моделирования, приведены на рис. 6, б.



**Рис. 6. Напряжения при включении электродвигателя: экспериментальные данные (а); моделирование (б)**

**Fig. 6. Voltage when the electric motor is switched on: experimental data (a); simulation (b)**

Результаты, полученные по предложенной модели электрической сети 6 (10) кВ, имеют хорошее соответствие с экспериментальными данными.

### III. Результаты и обсуждение

Основными критериями управляемого отключения электродвигателя являются минимизация уровня перенапряжений и исключение ПЗ дуги.

Наилучшее решение управляемого отключения электродвигателя может быть найдено варьированием момента времени размыкания полюсов выключателя. Дальнейшие исследования проведены для электродвигателей небольшой мощностью (200-500 кВт), работающих в режиме пуска и подключенных короткими кабельными линиями (до 25 м).

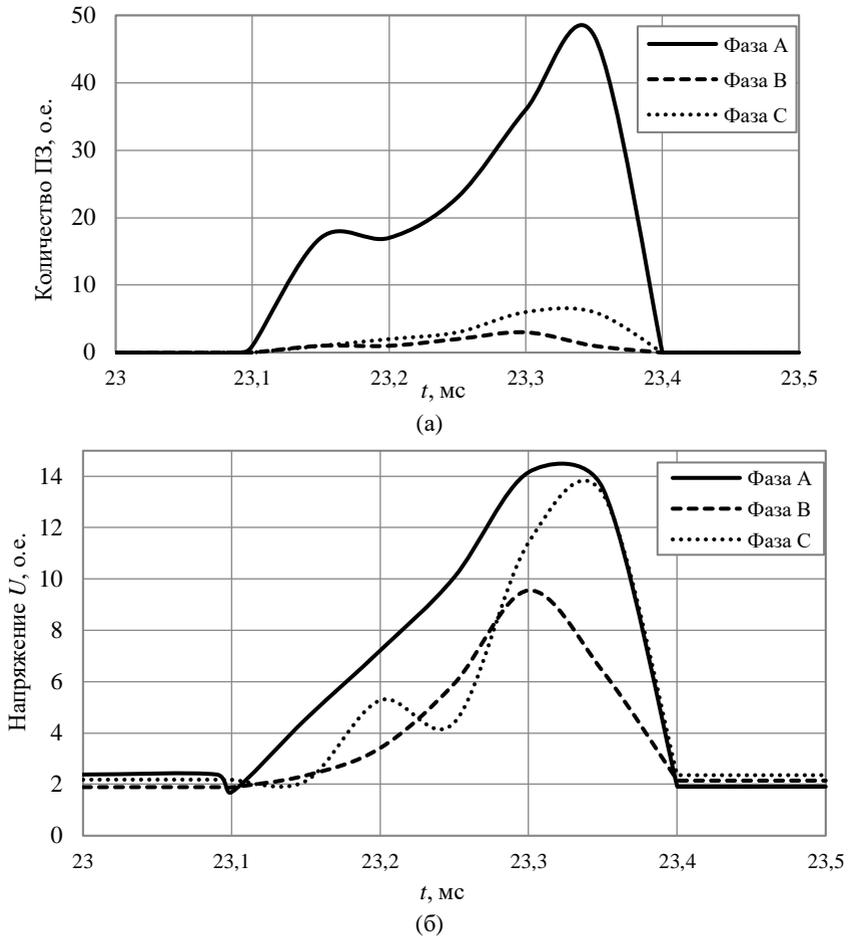
На рис. 7 представлены результаты исследования одновременного отключения трех фаз выключателя в разные моменты времени. В этом случае высокие уровни перенапряжений и ПЗ дуги возникают в течение малого промежутка времени, которое соответствует наименьшим значениям тока в одной из трех фаз. Причиной появления высоких уровней перенапряжений являются ПЗ дуги в первом отключаемом полюсе выключателя, вызывающие значительные колебания токов во всех фазах и, как следствие, виртуальные срезы тока. Для исключения причин образования виртуальных токов среза требуется производить коммутацию фаз выключателя разновременно.

На рис. 8 представлены результаты исследования разновременного отключения полюсов вакуумного выключателя. Коммутация первой фазы (рис. 8, а, в) в большинстве случаев не сопровождается высокочастотными перенапряжениями, однако в моменты времени, соответствующие значениям тока не более тока среза выключателя, наблюдаются ПЗ дуги и, соответственно, перенапряжения. Поэтому для исключения ПЗ дуги отключение первой фазы выключателя целесообразно проводить заранее до пересечения током нулевого значения.

При этом следует учитывать, что увеличение времени горения дуги в межконтактном промежутке негативно отражается на ресурсе выключателя. Таким образом, для обеспечения надежного отключения электродвигателя, момент размыкания первого полюса выключателя следует задавать с опережением пересечения током нулевого значения на 1,25 мс.

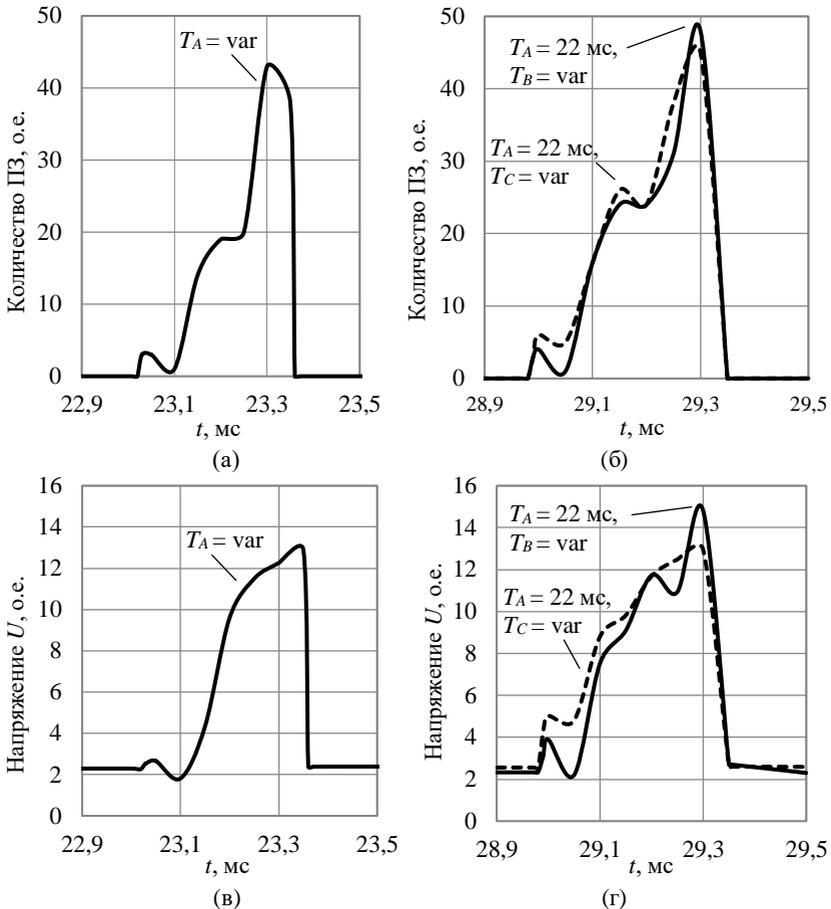
При известном моменте коммутации первой фазы производится размыкание второго полюса выключателя (рис. 8, б, г). В этом случае ПЗ дуги возникают при коммутации в течение малого промежутка времени, что также соответствует низким значениям тока.

На рис. 9 представлены осциллограммы напряжений и токов при реализации управляемого отключения двигательной нагрузки. Размыкание полюсов аппарата необходимо производить разновременно с опережением достижения токами значений токов среза выключателя для исключения ПЗ дуги, виртуальных срезов тока и сохранения ресурса выключателя. Управляемое отключение двигательной нагрузки позволяет снизить перенапряжения до значений не более  $2,3 \cdot U_{ном}$ .



**Рис. 7. Одновременное отключение фаз электродвигателя: зависимость количества повторных зажиганий (а); напряжения от момента коммутации (б)**

**Fig. 7. Simultaneous shutdown of electric motor phases: dependence of the number of re-ignitions (a); voltage from the moment of switching (b)**



**Рис. 8. Разновременное отключение фаз электродвигателя: зависимость количества повторных зажиганий дуги (а, б); напряжения от момента коммутации (в, г)**

**Fig. 8. Shutdown of electric motor phases at different times: dependence of the number of re-ignitions (a, b); voltage from the moment of switching (в, г)**

В качестве критериев управляемого включения двигательной нагрузки целесообразно принять отсутствие предпробоев и минимизацию перенапряжений. При одновременном включении фаз электродвигателя предпробой возникает в любой момент коммутации.

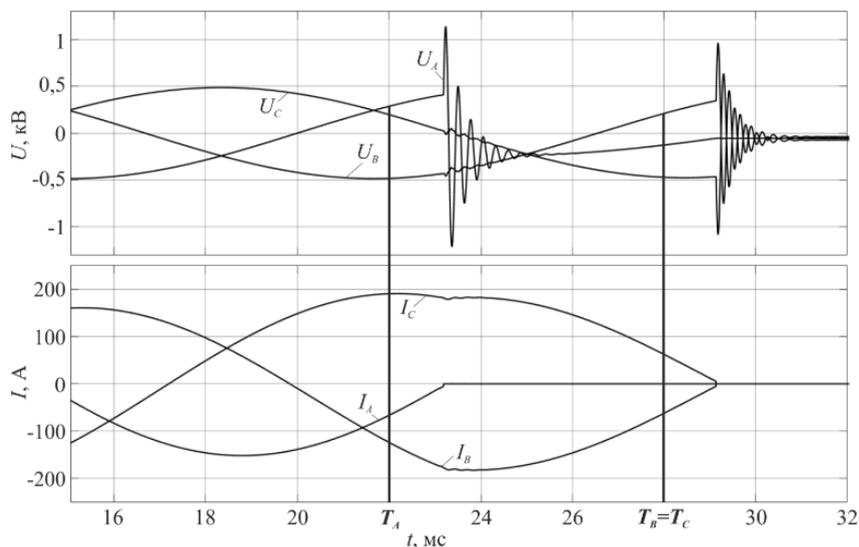


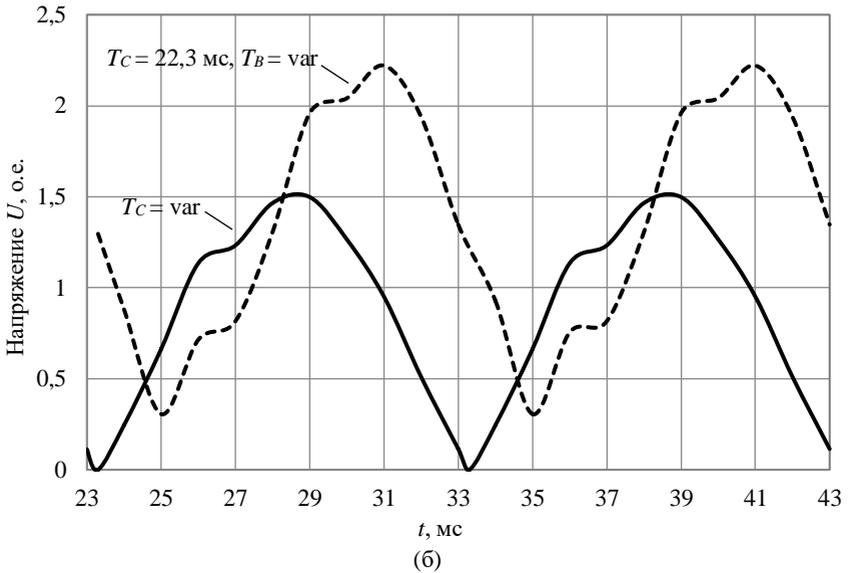
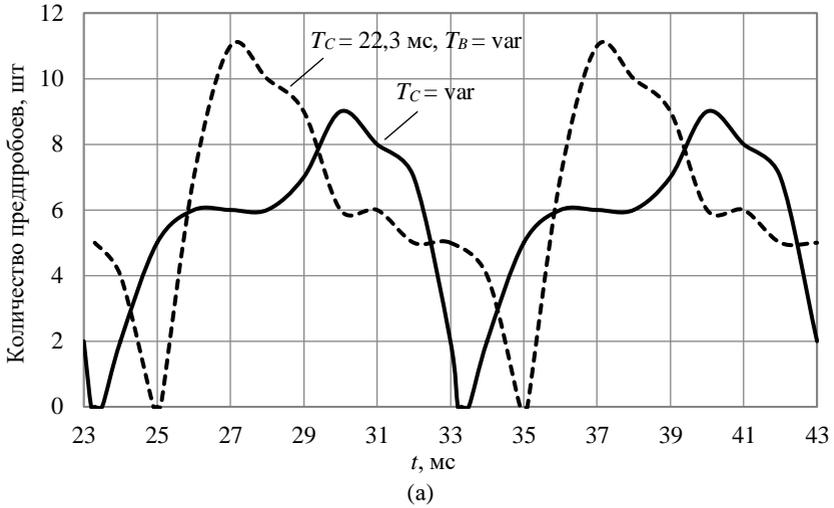
Рис. 9. Управляемое отключение двигательной нагрузки

Fig. 9. Controlled shutdown of electric motor

На рис. 10 представлены результаты исследования одновременного включения фаз выключателя. Замыкание первого полюса вакуумного выключателя около нулевого значения фазного напряжения не вызывает предпробоев и высокочастотных перенапряжений. Замыкание второго полюса выключателя в большинстве случаев сопровождается предпробоями и высокочастотными перенапряжениями, однако в моменты времени около нулевого значения линейного напряжения между первыми включаемыми фазами не вызывает предпробоев и перенапряжений. Замыкание оставшегося в работе полюса выключателя без предпробоев возможно вблизи нулевого значения фазного напряжения на этом полюсе.

Исходя из вышесказанного, управляемое включение двигательной нагрузки без предпробоев и перенапряжений возможно по следующему алгоритму: коммутация первого и последнего полюсов выключателя осуществляется при переходе их фазных напряжений через нулевое значение, второго полюса – при переходе линейного напряжения между первой и второй фазами через нулевое значение. Напряжения и токи при управляемом включении электродвигателя представлены на рис. 11.

Управляемое включение электродвигателей предъявляет к выключателю высокие требования по стабильности времени срабатывания полюсов аппарата. Разброс замыкания полюсов синхронного выключателя должен составлять не более 0,05 мс.



**Рис. 10. Разновременное включение фаз электродвигателя: зависимость количества предпробоев (а); напряжения от момента коммутации (б)**

**Fig. 10. Switching-on of electric motor phases at different times: dependence of the number of pre-breakdowns (a); voltage from the moment of switching (b)**

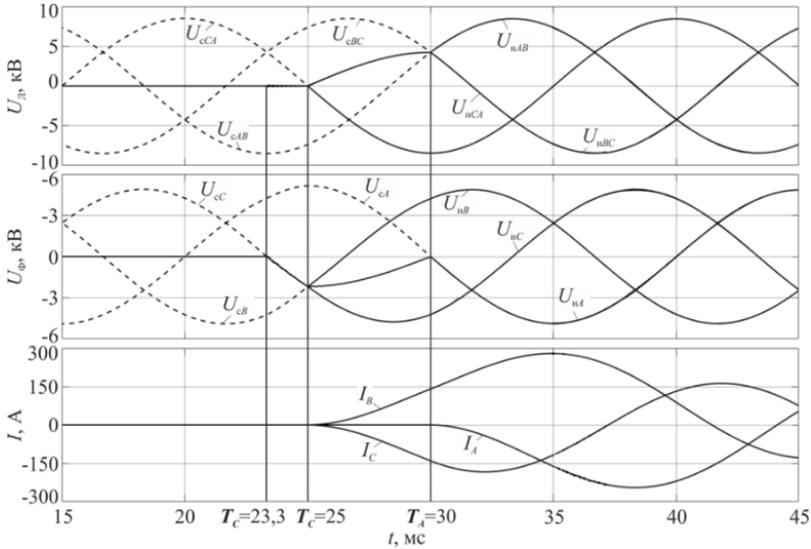


Рис. 11. Управляемое включение двигательной нагрузки

Fig. 11. Controlled electric motor start

В [16] представлены результаты экспериментального исследования точности работы вакуумного выключателя типа *EX-BBC SMARTIC 6(10)-20/1000* производства ООО «КЭПС» с функцией одновременной коммутации полюсов. Максимальные разбросы времени срабатывания полюсов выключателя не превышают 0,5 мс при отключении и включении.

Из результатов исследования следует, что управляемое включение электродвигателей без предпробов современными вакуумными выключателями не осуществимо. Реализация управляемого отключения электродвигателей без возникновения ПЗ дуги и высокочастотных перенапряжений в настоящее время возможна.

#### IV. Заключение

В статье рассмотрено влияние моментов коммутации полюсов выключателя на уровень перенапряжений. Выявлено, что при отключении электродвигателя в моменты опережающие переход фазных токов через нулевые значения ПЗ дуги и высокочастотные перенапряжения не возникают. Включение электродвигателя без предварительных пробоев и высокочастотных перенапряжений возможно в случае замыкания первого по последовательности коммутации и последнего полюсов выключателя при переходе фазных напряжений через нулевое значение, второго полюса – при переходе линейного напряжения между первой и второй фазами через нулевое значение.

Проведенные исследования показывают, что внедрение методов управляемой коммутации в вакуумных выключателях 6 (10) кВ позволит проводить коммутации электродвигателей в оптимальных условиях без ПЗ дуги и высокочастотных перенапряжений. Однако управляемое включение электродвигателей предъявляет к выключателю высокие требования по стабильности времени срабатывания полюсов аппарата, разброс замыкания полюсов должен составлять не более 0,05 мс.

© Шевцов Д.Е., 2023

© Павлюченко Д.А., 2023

© Шевцова Л.И., 2023

© Александров Н.В., 2023

© Ядагаев Э.Г., 2023

*Поступила в редакцию 07.03.2023*

*Принята к публикации 25.05.2023*

*Received 07.03.2023*

*Accepted 25.05.2023*

### **Библиографический список**

- [1] Кравченко А., Метельский В. Вакуумные выключатели нагрузки зарубежных производителей // *Электрик*. 2013. № 3. С. 14-17.
- [2] Назарычев А.Н. Анализ основных преимуществ применения вакуумных выключателей // *Энергоэксперт*. 2007. № 4-5. С. 58-63.
- [3] Nicolae P.M., Nicolae M.S., Nicolae I.D., Netoiu A. Overvoltages induced in the supplying line by an electric railway vehicle // *proc. 2021 IEEE International Joint EMC/SI/PI and EMC Europe Symposium*, Jul. 26-Aug. 13, Raleigh, NC, USA: IEEE, 2021. P. 653-658. DOI: 10.1109/EMC/SI/PI/EMCEurope52599.2021.9559345
- [4] Куликовский В.С., Ковалева О.А. Моделирование коммутационных перенапряжений при коммутации высоковольтных электродвигателей вакуумными выключателями // *Вестник КРАСГАУ*. 2012. № 5 (68). С. 337-343.
- [5] Шпиганович А.Н., Пушница К.А. Имитационная модель системы электроснабжения кислородноконвертерного производства для анализа коммутационных перенапряжений // *Электротехника*. 2016. № 6. С. 21а-25.
- [6] Воркунов О.В., Афанасьева Т.И. Физические процессы в вакуумных выключателях при возникновении коммутационных перенапряжений // *Международный технико-экономический журнал*. 2021. № 5. С. 7-17.  
DOI: 10.34286/1995-4646-2021-80-5-7-17
- [7] Vojtovich R.A., Lavro Y.A., Petrova N.F., Tolstobrova L.I. Electromagnetic compatibility of vacuum circuit breakers with electrical equipment of medium voltage // *Actual problems of electronic instrument engineering (APEIE) - Proceedings APEIE-2018*, Oct. 02-06, 2018, Novosibirsk, Russia: NSTU, 2018. P. 483-487.  
DOI: 10.1109/APEIE.2018.8546295
- [8] Коновалов Е.Ф., Дроздов Н.В., Зубрилин А.В. О защите действующих электрических сетей от перенапряжений // *Энергетик*. 1998. № 4. С. 12-14.

- [9] Халилов Ф.Х., Евдокунин Г.А., Поляков В.С., Подпоркин Г.В., Таджибаев А.И. Защита сетей 6-35 кВ от перенапряжений. СПб.: Энергоатомиздат, 2002. – 270 с.
- [10] Иванов А.В., Дегтярев И.Л. Теоретическое и экспериментальное исследование электрофизических процессов и характеристик вакуумной дугогасительной камеры при коммутации электродвигателей // Нефтегазовое дело. 2007. № 1. С. 1-10.
- [11] Кадомская К.П. Системный подход к обеспечению надежной эксплуатации изоляции электрооборудования в электрических сетях среднего и высокого напряжения // Главный энергетик. 2006. № 1. С. 54-60.
- [12] Working group 13.07. Controlled switching of HVAC circuit-breakers: guide for application lines, reactors, capacitors, transformers (first part) // Electra. 1999. No. 183. P. 43-73.
- [13] Working group 13.07. Controlled switching of HVAC circuit-breakers: guide for application lines, reactors, capacitors, transformers (2nd part) // Electra. 1999. No. 185. P. 37-57.
- [14] Павлюченко Д.А., Шевцов Д.Е. Особенности управляемой коммутации при нормальных и аварийных режимах в электрических сетях среднего напряжения // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2015. № 5. С. 41-44.
- [15] Герман-Галкин С.Г. MatLab and Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. СПб.: Корона-Принт, 2014. – 368 с.
- [16] Шевцов Д.Е., Павлюченко Д.А., Лавринович В.А., Шальнев В.Г. Разработка имитационной модели синхронного вакуумного выключателя 6 (10) кВ с учетом реальных характеристик аппарата // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2017. № 1. С. 38-44.
- [17] Мошинский Ю.А., Беспалов В.Я., Кирякин А.А. Определение параметров схемы замещения асинхронной машины по каталожным данным // Электричество. 1998. № 4. С. 38-42.
- [18] Евдокунин Г.А., Корепанов А.А. Перенапряжения при коммутации цепей вакуумными выключателями и их ограничение // Электричество. 1998. № 4. С. 2-14.

## References

- [1] A. Kravchenko and V. Metel'skii, "Vakuumnye vykliuchateli nagruzki zarubezhnykh proizvoditelei [Vacuum load switches of foreign manufacturers]", *Elektrik [Electrician]*, no. 3, pp. 14-17, 2013 (in Russian).
- [2] A.N. Nazarychev, "Analiz osnovnykh preimushchestv primeneniia vakuumnykh vykliuchatelei [Analysis of the main advantages of using vacuum circuit breakers]", *Energoekspert [Energy Expert]*, no. 4-5, pp. 58-63, 2007 (in Russian).
- [3] P.M. Nicolae, M.S. Nicolae, I.D. Nicolae and A. Netoiu, "Overvoltages induced in the supplying line by an electric railway vehicle", in proc. *2021 IEEE International Joint EMC/SI/PI and EMC Europe Symposium*, Jul. 26-Aug. 13, 2021, Raleigh, NC, USA, pp. 653-658. DOI: 10.1109/EMC/SI/PI/EMCEurope52599.2021.9559345
- [4] V.S. Kulikovskiy and O.A. Kovaleva, "Switching overvoltage modeling in the process of switching the high-voltage electric motors by the vacuum switches", *Bulletin of KSAU*, vol. 5, no. 68, pp. 337-343, 2012.

- [5] A.N. Shpiganovich and K.A. Pushnitsa, "An imitation model of a power-supply system of oxygen-converter manufacturing to analyze switching overvoltage", *Russian Electrical Engineering*, vol. 87, no. 6, pp. 316-319, 2016. DOI: 10.3103/S1068371216060092
- [6] O.V. Vorkunov and T.I. Afanasyeva, "Physical processes in vacuum circuit breakers under switching overvoltages", *International Technical and Economic Journal*, no. 5, pp. 7-17, 2021. DOI: 10.34286/1995-4646-2021-80-5-7-17
- [7] R.A. Vojtovich, Y.A. Lavro, N.F. Petrova and L.I. Tolstobrova, "Electromagnetic compatibility of vacuum circuit breakers with electrical equipment of medium voltage", in proc. *Actual problems of electronic instrument engineering (APEIE) - Proceedings APEIE-2018*, Oct. 02-06, 2018, Novosibirsk, Russia, pp. 483-487. DOI: 10.1109/APEIE.2018.8546295
- [8] E.F. Kononov, N.V. Drozdov and A.V. Zubrilin, "O zashchite deistvuiushchikh elektricheskikh setei ot perenapriazhenii [On the protection of existing electrical networks from overvoltage]", *Energetik*, no. 4, pp. 12-14, 1998 (in Russian).
- [9] F.Kh. Khalilov, G.A. Evdokunin, V.S. Polyakov, G.V. Podporkin and A.I. Tazhibayev, *Zashchita setei 6-35 kV ot perenapriazhenii [Protection of 6-35 kV networks from overvoltage]*. St. Petersburg: Energoatomizdat, 2002 (in Russian).
- [10] A.V. Ivanov and I.L. Degtiarev, "Teoreticheskoe i eksperimental'noe issledovanie elektrofizicheskikh protsessov i kharakteristik vakuumnoi dugogasitel'noi kamery pri kommutatsii elektrodvigateli [Theoretical and experimental study of electrophysical processes and characteristics of a vacuum arc-extinguishing chamber when switching electric motors]", *Oil and Gas Business*, no. 1, pp. 1-10, 2007 (in Russian).
- [11] K.P. Kadomskaia, "Sistemnyi podkhod k obespecheniiu nadezhnoi ekspluatatsii izoliatsii elektrooborudovaniia v elektricheskikh setiakh srednego i vysokogo napriazheniia [A systematic approach to ensuring reliable operation of electrical equipment insulation in medium and high voltage electrical networks]", *Glavnyj Energetik [Chief Power Engineer]*, no. 1, pp. 54-60, 2006 (in Russian).
- [12] Working group 13.07, "Controlled switching of HVAC circuit-breakers: guide for application lines, reactors, capacitors, transformers (1st part)", *Electra*, no. 183, pp. 43-73, 1999.
- [13] Working group 13.07, "Controlled switching of HVAC circuit-breakers: guide for application lines, reactors, capacitors, transformers (2nd part)", *Electra*, no. 185, pp. 37-57, 1999.
- [14] D.A. Pavlyuchenko and D.E. Shevtsov, "Osobennosti upravliaemoi kommutatsii pri normal'nykh i avariinykh rezhimakh v elektricheskikh setiakh srednego napriazheniia [Features of controlled switching under normal and emergency operating conditions in medium voltage networks]", *Elektro. Elektrotehnika, Elektroenergetika, Elektrotekhnicheskaya Promyshlennost' [Electro. Electrical Engineering, Power Industry, Electrical Industry]*, no. 5, pp. 41-44, 2015 (in Russian).
- [15] S.G. German-Galkin, *MatLab and Simulink. Proektirovanie mekhatronnykh sistem na PK [MatLab and Simulink. Designing mechatronic systems on a PC]*. St. Petersburg: Korona-Print, 2014 (in Russian).
- [16] D.E. Shevtsov, D.A. Pavlyuchenko, V.A. Lavrinovich and V.G. Shalnev, "Razrabotka imitatsionnoi modeli sinkhronnogo vakuumnogo vykliuchatelia 6 (10) kV s uchetom real'nykh kharakteristik apparata [Development of the controlled vacuum 6

- (10) kV circuit Breaker model with real parameters”], *Elektro. Elektrotehnika, Elektroenergetika, Elektrotehnicheskaya Promyshlennost' [Electro. Electrical Engineering, Power Industry, Electrical Industry]*, no. 1, pp. 38-44, 2017 (in Russian).
- [17] Iu.A. Moshchinskii, V.Ia. Bepalov and A.A. Kiriakin, “Opreделение parametrov skhemy zameshcheniia asinkhronnoi mashiny po kataloghnym dannym [Determination of parameters of the asynchronous machine substitution scheme based on catalog data]”, *Elektrichestvo*, no. 4, pp. 38-42, 1998 (in Russian).
- [18] G.A. Evdokunin and A.A. Korepanov, “Perenapriazheniia pri kommutatsii tsepei vakuumnymi vykliuchateliami i ikh ogranichenie [Overvoltage during circuit switching by vacuum circuit breakers and their limitation]”, *Elektrichestvo*, no. 4, pp. 2-14, 1998 (in Russian).

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Шевцов Дмитрий Евгеньевич**, кандидат технических наук, доцент Новосибирского государственного технического университета, г. Новосибирск, Российская Федерация

**Dmitry E. Shevtsov**, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation

**Павлюченко Дмитрий Анатольевич**, кандидат технических наук, заведующий кафедрой Новосибирского государственного технического университета, г. Новосибирск, Российская Федерация

**Dmitry A. Pavlyuchenko**, Cand. Sci. (Eng.), head of the department of the Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation

**Шевцова Лилия Ивановна**, кандидат технических наук, доцент Новосибирского государственного технического университета, г. Новосибирск, Российская Федерация

**Lilia I. Shevtsova**, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation

**Александров Николай Васильевич**, кандидат технических наук, доцент Восточно-Сибирского государственного университета технологий и управления, г. Улан-Удэ, Российская Федерация

**Nikolay V. Alexandrov**, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Siberian State University of Technology and Management, Ulan-Ude, Russian Federation

**Ядагаев Эркемен Геннадьевич**, кандидат технических наук, начальник отдела ремонтов АО «Чукотэнерго», г. Анадырь, Российская Федерация

**Erkemen G. Yadagaev**, Cand. Sci. (Eng.), head of the repair department of Chukotenergo JSC, Anadyr, Russian Federation

## ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.332:621.316.728

DOI 10.46960/2658-6754\_2023\_3\_84

**ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ  
СТАТИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА РЕАКТИВНОЙ  
МОЩНОСТИ НА ПОСТУ СЕКЦИОНИРОВАНИЯ  
ТЯГОВОЙ СЕТИ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ****Л.А. Герман**e-mail: [lagerman@mail.ru](mailto:lagerman@mail.ru)

Филиал Самарского государственного университета путей сообщения  
в Нижнем Новгороде  
*Нижний Новгород, Россия*

**К.В. Галкин**e-mail: [nexti83@mail.ru](mailto:nexti83@mail.ru)

Красноуфимская ДЭС Горьковской ДЭО Трансэнерго ОАО «РЖД»  
*Красноуфимск, Россия*

Раскрыта необходимость и возможность на каждом конкретном участке железной дороги снижать принятый уровень стабилизации напряжения с 27...28 кВ на 26...27 кВ. Актуальность работы определяется тем, что на посту секционирования контактной сети переменного тока железных дорог устанавливают статические генераторы реактивной мощности (СГРМ), получившие названия СТАТКОМ (статические синхронные компенсаторы), повышающие пропускную способность межподстанционных зон. Существующая автоматика регулирования мощности СГРМ в зависимости от тяговой нагрузки обеспечивает генерирование емкостной мощности для стабилизации напряжения на постах секционирования на уровне 27...28 кВ. Эксперименты показали, что, наряду с успешным повышением уровня напряжения в контактной сети и соответствующим повышением пропускной способности, СГРМ имеет ряд недостатков: значительное превышение установленной мощности в сравнении с потребляемой мощностью тяговой нагрузки, что значительно повышает стоимость установки; значительные потери мощности непосредственно в СГРМ с учетом дополнительного расхода энергии на охлаждение силовых транзисторов. Предлагаемое мероприятие практически не изменит принятую повышенную пропускную способность, но снизит потери мощности в СГРМ на 30 %, что доказано при реализации описанного предложения на действующем участке тяговой сети.

**Ключевые слова:** контактная сеть, пост секционирования, стабилизация напряжения, статический генератор реактивной мощности, СТАТКОМ, тяговая сеть, фильтрокомпенсирующая установка.

**Для цитирования:** Герман Л.А., Галкин К.В. Техничко-экономические показатели статического генератора реактивной мощности на посту секционирования тяговой сети железной дороги // Интеллектуальная Электротехника. 2023. № 3. С. 84-100. DOI: 10.46960/2658-6754\_2023\_3\_84

## TECHNICAL AND ECONOMIC INDICATORS OF STATIC VAR GENERATOR AT RAILWAY TRACTION NETWORKS SECTIONING POST

**L.A. German**

e-mail: [lagerman@mail.ru](mailto:lagerman@mail.ru)

The Branch of the Samara State Transport University in Nizhny Novgorod  
*Nizhny Novgorod, Russia*

**K.V. Galkin**

e-mail: [nexti83@mail.ru](mailto:nexti83@mail.ru)

Krasnoufimsk power supply distance of the Gorky Directorate for Energy Supply  
– a structural subdivision of Transenergo – a branch of the JSCo «RZD»  
*Krasnoufimsk, Russia*

**Abstract.** Static var generators (SVG), called static synchronous compensators (STATCOM) are installed at the sectioning post of the railway AC contact network to increase the throughput of inter-substation zones. The existing SVG automatic power control provides the generation of reactive power depending on the traction load to stabilize the voltage at the sectioning posts at the level of 27 ... 28 kV. The results of experiments have shown that, along with a successful increase in the voltage level in the contact network and a corresponding increase in the throughput, the SVG has a number of disadvantages: a significant excess of the SVG installed power in comparison with the power consumption of the traction load, which significantly increases the cost of the installation; significant power losses directly in the SVG, taking into account the additional energy consumption for cooling power transistors. The paper shows the necessity and possibility to reduce the accepted level of voltage stabilization from 27...28 kV to 26...27 kV in each particular section. Proposed decision will practically not change the accepted increased capacity, but will reduce SVG power losses by 30%, which was proved during the implementation of this proposal on the existing section of the traction network.

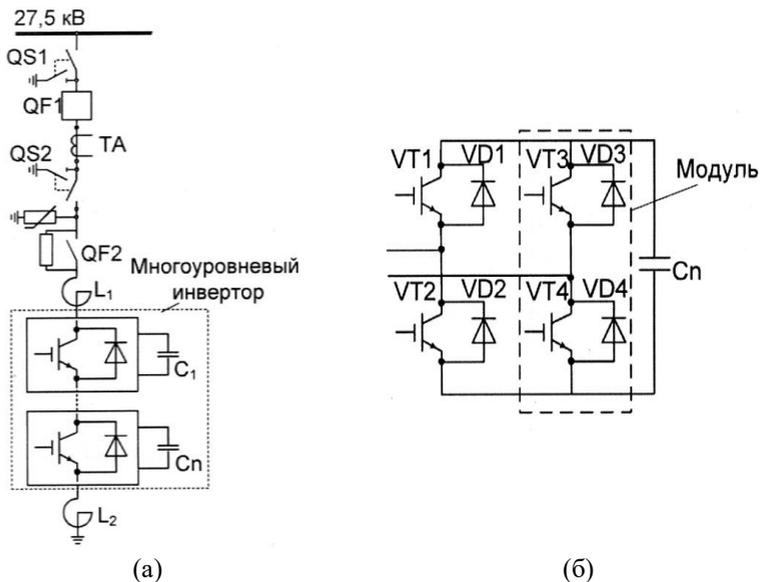
**Keywords:** contact network, sectioning post, voltage stabilization, static var generator, STATCOM, traction network, filter compensating unit.

**For citation:** L.A. German and K.V. Galkin, “Technical and economic indicators of static var generator at railway traction networks sectioning post”, *Smart Electrical Engineering*, no. 3, pp. 84-100, 2023. DOI: 10.46960/2658-6754\_2023\_3\_84

### 1. Введение

Статические синхронные компенсаторы (СТАТКОМ) решают проблему качества электроэнергии в электрических сетях и широко используются в электроэнергетических системах с нелинейной нагрузкой: в нефтехимической и металлургической отраслях, на железнодорожном транспорте и т.д. Они имеют множество преимуществ по сравнению с аналогичными устройствами (например, конденсаторными батареями) [1].

Для повышения пропускной способности железных дорог переменного тока в последние годы стали применять статические генераторы реактивной мощности (СГРМ) на базе силовых транзисторов *IGBT* на постах секционирования (ПС) контактной сети переменного тока мощностью 10...15 Мвар (рис. 1, а) [2].



**Рис. 1. Статический генератор реактивной мощности:**  
схема СТАТКОМ (а); принципиальная схема силовой ячейки (б)

**Fig. 1. Static var generator:**  
STATCOM (a); power cell circuit diagram (b)

Опыт их эксплуатации и анализ замечаний по технико-экономическим характеристикам позволяет определить пути дальнейшего совершенствования СГРМ, что определяя актуальность представленной работы.

## II. Характеристика СГРМ

Для исследования показателей СГРМ в эксплуатационных условиях выбран пост секционирования *Черная речка* межподстанционной зоны *Красноуфимск-Чад* Горьковской железной дороги (ГЖД) номинальной мощностью установки по первой гармонике 15 Мвар. Активная мощность тяговой нагрузки участка *Красноуфимск-Чад* составляет 9,37 МВт, а реактивная – 7,5 Мвар. На участке 48 пар поездов, из них до 20 % – тяжеловесные и сдвоенные поезда. Как указано в [3], 30 % мощности (т.е. 5 Мвар) используется для формирования активных фильтров, а основная мощность СГРМ (т.е. 10 Мвар) – для компенсации реактивной мощности тяговой нагрузки.

Основное предназначение СГРМ заключается в компенсации реактивного тока тяговой нагрузки, снижении колебаний напряжения в тяговой сети и повышении пропускной способности железной дороги. СГРМ выполнен по схеме преобразователя напряжения на основе биполярных *IGBT*-транзисторов с изолированным затвором [1, 3]. В соответствии с техническим заданием, СГРМ подавляет высшие гармонические составляющие 150, 250, 350, 450, 550 Гц. В результате кривая напряжения на шинах ПС приближается к синусоиде 50 Гц, а в токе СГРМ четко прослеживается гармоника 150 Гц (рис. 2).

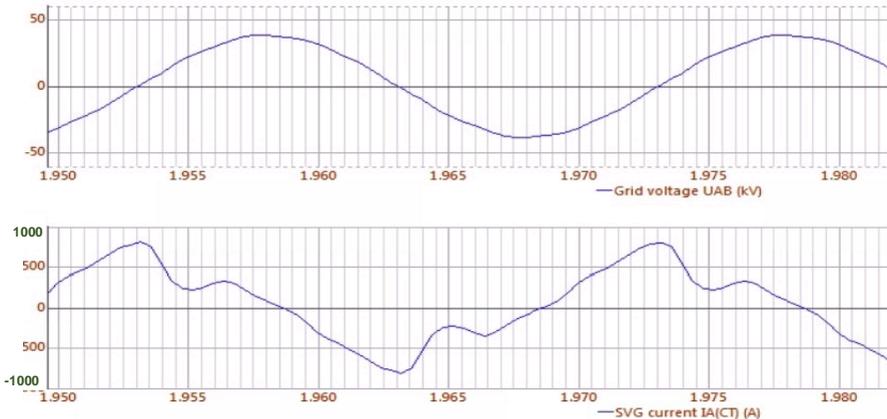


Рис. 2. Напряжение на шинах ПС, кВ; ток СГРМ, А

Fig. 2. Voltage on the buses of the sectioning post, kV; SVG current, A



Подключение к рельсам двухпутного участка осуществляется через дроссель-трансформатор ДТ к его средней точке. Для секционирования контактной сети установлены продольные разъединители РЛНД-16-35/1000. Собственные нужды ПС обеспечивает трансформатор ТМЖ-27,5/25, подключенный к линии ДПР-27,5кВ. Для снижения помех на связь к СГРМ подключен конденсаторный фильтр БР.

Межподстанционная зона *Красноуфимск-Чад* характеризуется сложным профилем по четному и нечетному пути с подъемами до 17 промилей, тремя туннелями по 1-му пути (рис. 4), у каждого участка указаны подъемы в промилях. Для исследований специально подключен счетчик электроэнергии к вводному трансформатору тока ТОЛ-35-600/5 и трансформатору напряжения ТН 27,5 кВ шин ПС.

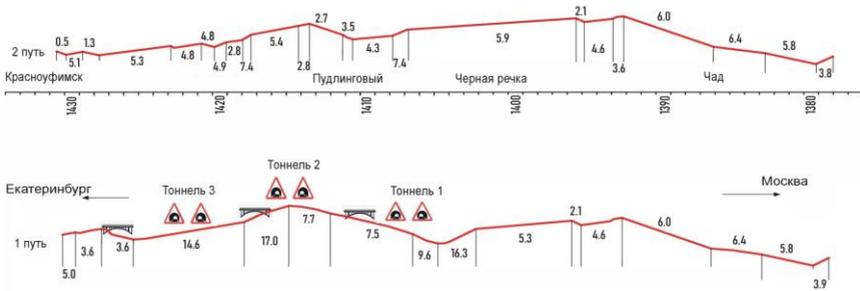


Рис. 4. Профиль межподстанционной зоны *Красноуфимск-Чад*

Fig. 4. Profile of intersubstation zone *Krasnoufimsk-Chad*

### III. Анализ генерации реактивной мощности СГРМ

Регулирование СГРМ по проекту реализовано по закону «регулирование напряжения», при этом установлен уровень стабилизации напряжения (принято 27,5 кВ) и генерируемый ток СГРМ определяется этим напряжением. Если напряжение превышает 27,5 кВ, то генерируемый ток переключается с емкостного на индуктивный. Представленный суточный график реактивной мощности СГРМ ПС *Черная речка* (рис. 5) показывает необходимость в реактивной мощности на межподстанционной зоне для стабилизации напряжения на посту секционирования.

Генерируемая мощность изменяется в пределах 1,09-4,83 Мвар при среднем значении 3,28 Мвар. За три года эксплуатации СГРМ не было ни одного случая пониженного напряжения на рассматриваемом участке. Как указано в [4], приближенное значение мощности нерегулируемой установки поперечной емкостной компенсации для поста секционирования для максимального снижения потерь мощности составило бы  $7,5/2 = 3,75$  Мвар.



Рис. 5. Генерируемая мощность СГРМ

Fig. 5. SVG generated power

Можно сделать вывод, что спроектированная мощность 15 Мвар, из которых 10 Мвар необходимы для компенсации реактивной мощности, существенно завышена для указанного участка. В настоящий момент отсутствуют документы, регламентирующие расчет реактивной мощности СГРМ. Формула расчета реактивной мощности в системе тягового электрооборудования из нормативных документов предназначена для расчета традиционных конденсаторных установок (КУ) с последовательным соединением батареи конденсаторов и реактора [5], так как в ней учитывается снижение мощности КУ при снижении напряжения в тяговой сети. Однако на участке рабочей характеристики СГРМ напряжение стабильное на уровне заданной уставки (по опыту работы СГРМ на отечественных ж.д. обычно принято  $U_{уст} = 27...28$  кВ).

Повышенное напряжение устанавливают на уровне  $U_{ст} = 27...28$  кВ для решения приоритетной задачи – увеличения скорости движения тяжелых поездов (когда вес поезда повышается от принятого 7100 т до 12000 т и выше). Однако при этом увеличивается потребление реактивной мощности электроподвижного состава (ЭПС) (при переходе от номинального напряжения на токоприемнике до 28 кВ рост реактивной мощности на 25 %), увеличивается перекомпенсация реактивной мощности в тяговой сети, что ведет к повышенным потерям электроэнергии. Следует учитывать, что режим повышенного напряжения  $U_{ст}$  на СГРМ в течение суток постоянный (как это принято в настоящее время), а длительность режима повышенных нагрузок (выше средних), например, по рис. 5 – около половины суток.

Этот пример свидетельствует о необходимости корректировки принятого закона стабилизации напряжения или выбора другого закона регулирования мощности СГРМ на посту секционирования.

#### IV. Исследования потерь мощности в СГРМ

Потери электроэнергии в КУ не превышают 0,002-0,0025 кВт/квар [6]. Однако в статических тиристорных компенсаторах и в СТАТКОМ, предназначенных для работы в регулируемых режимах для снижения гармоник, колебаний и провалов напряжения в сетях с резкопеременными нагрузками, потери мощности значительно больше и составляют 1...3 % от номинальной мощности установок компенсации [6]. Общие потери мощности в СТАТКОМ складываются из потерь во входном и в выходном реакторах  $L1$ ,  $L2$ , а также в многоуровневом инверторе, состоящем из 64 последовательно соединенных силовых ячеек. Каждая силовая ячейка включает в себя два *IGBT* модуля (рис. 1, б), состоящие из двух последовательно соединенных *IGBT* транзисторов.

Впервые исследования потерь мощности в СГРМ в тяговой сети были выполнены в [7, 8], где показано, что потери мощности сопоставимы с составляющей экономии энергии, получаемой за счет регулирования установки компенсации. Это значит, что отсутствует эффект регулирования при учете экономии потерь мощности, а значит эффект СГРМ по потерям мощности следует считать только по составляющей экономии электроэнергии от среднего значения генерируемой реактивной мощности, как для нерегулируемой установки.

Суммарное снижение потерь мощности в тяговой сети при включении СГРМ равно [9]:

$$\delta P = \delta P_{\text{нер}} + \delta P_{\text{рег}}, \quad (1)$$

где  $\delta P_{\text{нер}}$  – снижение потерь мощности при учете среднего значения тока СГРМ, то есть, считая СГРМ нерегулируемой;  $\delta P_{\text{рег}}$  – дополнительное снижение потерь мощности при учете изменения тока СГРМ в зависимости от изменения тока тяговой нагрузки, то есть при учете регулируемого эффекта СГРМ.

Поскольку потери в СГРМ сопоставимы со значением  $\delta P_{\text{рег}}$ , предлагается при расчете потерь мощности в тяговой сети принимать расчеты с СГРМ, как с нерегулируемой установкой с эффектом снижения потерь мощности  $\delta P_{\text{нер}}$ . На рассматриваемой установке на ПС *Черная речка* для подтверждения данных по реальным потерям мощности в СГРМ выполнены исследования потерь активной мощности в различных режимах. Изучаемые потери электроэнергии состоят из двух частей: потери электроэнергии

непосредственно в СГРМ  $\Delta P_1$ , обусловленные процессом коммутации в биполярных *IGBT*-транзисторов (*SVG*) и потерями в реакторах  $L1$  и  $L2$  и потерями электроэнергии  $\Delta P_2$  собственных нужд СГРМ на вентиляцию транзисторов.

Для определения потерь в СГРМ, как было сказано, специально дополнительно смонтирован учет на счетчике, который за сутки показал активные потери  $\Delta P_1 = 37,1$  кВт (рис. 6, а), а измеренные потери на собственные нужды  $\Delta P_2 = 15$  кВт.

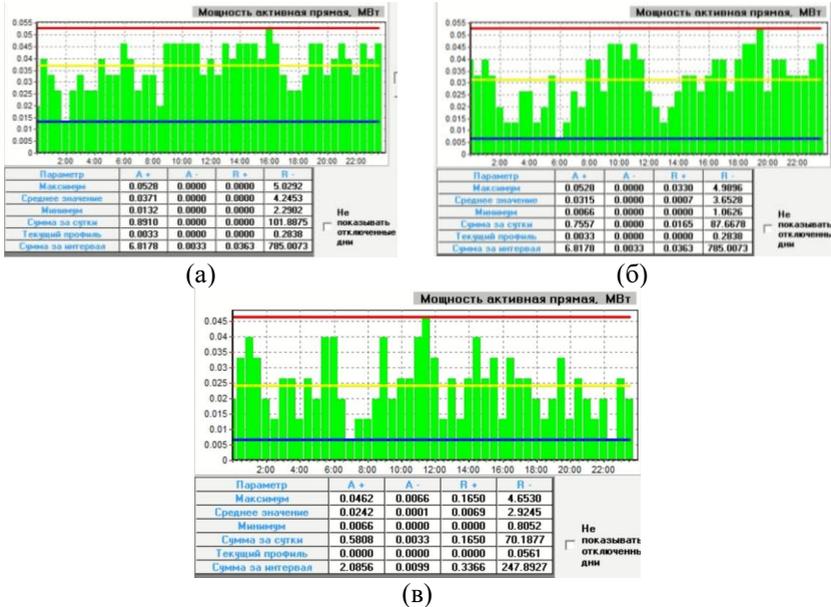


Рис. 6. Активные потери мощности в СГРМ за сутки при стабилизации: на 27,5 кВ (а); на 27 кВ (б); на 26,5 кВ (в)

Fig. 6. SVG active power losses per day with stabilization at: 27.5 kV (a); 27 kV (б); 26.5 kV (в)

Таким образом, суммарные потери составят  $\Delta P = 52,1$  кВт. Учитывая среднюю генерируемую мощность СГРМ 3,2 Мвар, реальные средние активные потери составят  $\Delta P \% = 52,1 \cdot 100 / 3200 = 1,63$  %. При изменении напряжения стабилизации на 27 кВ (рис. 6, б) потери в СГРМ составят 37,1 кВт, а при стабилизации на уровне 26,5 кВ (рис. 6, в) потери снижаются до 24,2 кВт. Это значит, что при изменении напряжения стабилизации на шинах ПС с 27,5 кВ до 26,5 кВ мощность активных потерь энергии снижа-

ется на  $37,1 - 24,2 = 12,9$  кВт. Кроме того, при снижении напряжения стабилизации на ПС до 26,5 кВ снижаются потребляемая реактивная мощность ЭПС и снижается зона перекомпенсации реактивной мощности, что также ведет к экономии электроэнергии.

#### У. Оценка снижения потерь активной мощности СГРМ при изменении уровня стабилизации напряжения на ПС

На ПС в общем случае действуют два тока: ток тяговой сети, «отнесенный к ПС», и ток СГРМ. Будем рассматривать активно-индуктивный ток тяговой сети. Напряжение на ПС:

$$U_{\text{ПС}} = U_{\text{ТП}} - \left[ (I''_{\text{ТС}} - I_{\text{СГРМ}}) \cdot X_{\text{вх}} + I'_{\text{ТС}} \cdot R_{\text{вх}} \right], \quad (2)$$

где  $X_{\text{вх}}$  и  $R_{\text{вх}}$  – входное индуктивное и активное сопротивления ПС, обычно при нормальной работе межподстанционной зоны с двухсторонним питанием  $X_{\text{вх}} = 6 \dots 8$  Ом;  $I''_{\text{ТС}}$ ,  $I'_{\text{ТС}}$  – индуктивный и активный токи тяговой сети, «отнесенные к ПС».

Ток СГРМ зависит от напряжения стабилизации  $U_{\text{ст}}$ . Специально проведенный эксперимент на ПС Черная речка показал следующее: при изменении  $U_{\text{ст}}$  с 27 до 26,5 кВ за период времени в 10 мин ток СГРМ изменился с 250...300 А до 120...170 А (рис. 7).

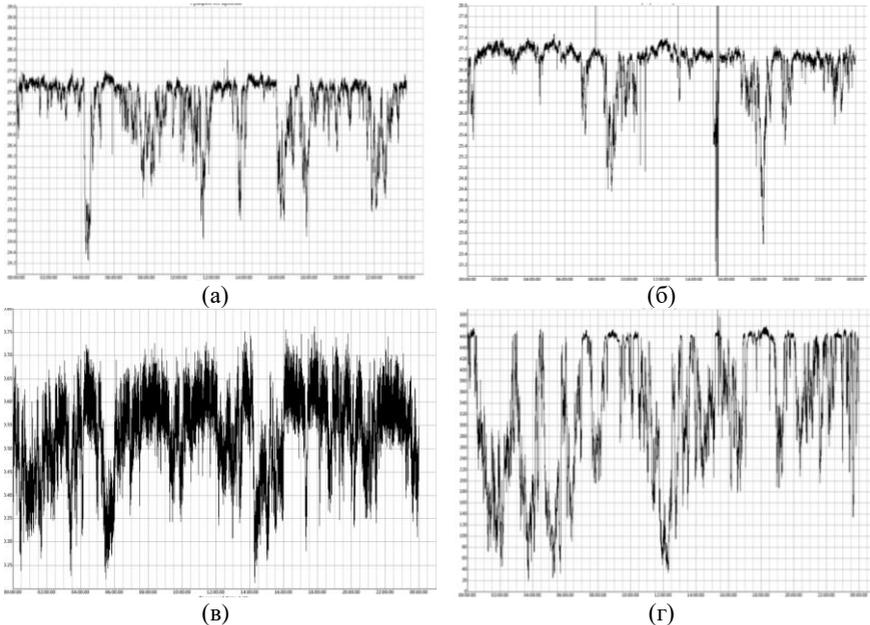


Рис. 7. Напряжение стабилизации СГРМ, кВ (а); ток СГРМ, А (б): ось абсцисс – время в час: мин: сек.

Fig. 7. SVG stabilization voltage, kV (a); SVG current, A (b): X axis – time per hour: min: sec.

Для оценки изменения тока СГРМ при изменении напряжения стабилизации проведен более широкий эксперимент, этапы которого описаны далее.

*Первый этап.* При существующем напряжении стабилизации 27,5 кВ в течение суток выполнены измерения напряжения на шинах ПС Черная речка и ток СГРМ (рис. 8, а).



**Рис. 8.** Стабилизация напряжения на ПС на уровне 27,5 кВ (а) и 27 кВ (б); ток СГРМ в кА за сутки при стабилизации напряжения на уровне 27,5 кВ (в) и в А при стабилизации напряжения на уровне 27 кВ (г)

**Fig. 8.** Voltage stabilization at the sectioning post at the level of 27.5 kV (а) and 27 kV (б); SVG current in kA per day with voltage stabilization at the level of 27.5 kV (в) and in A with voltage stabilization at the level of 27 kV (г)

В этом случае напряжение на шинах ПС изменялось в пределах 27,4...27,6 кВ. Ток СГРМ (рис. 8, в) изменяется в пределах 250-730 А при среднем значении около 550 А.

*Второй этап.* Напряжение стабилизации было снижено до 27 кВ (рис. 8, б), и проведены измерения в течение суток. Напряжение на шинах ПС изменялось в пределах 27,0...27,3 кВ. Ток СГРМ (рис. 8, г) изменяется в пределах 60...470 А при среднем значении около 420 А. Если считать, что на втором этапе по сравнению с первым ток уменьшился в 1,3 раза ( $550/420$ ), потери активной мощности снизились в  $(1,3)^2 = 1,69$  раза.

Ток СГРМ непосредственно влияет на потери активной мощности СГРМ. Следовательно, необходимо ответственно подходить к выбору уровня стабилизации напряжения СГРМ. Чем выше напряжение стабилизации (сейчас принято 27-28 кВ), тем легче осуществлять движение тяжеловесным и двоярным поездам. Однако авторы статьи уверены, что уровень стабилизации нужно корректировать в зависимости от конкретных местных условий межподстанционной зоны. Уже сейчас можно уменьшить уровни стабилизации на некоторых участках ГЖД, например, с 27...28 кВ до 26...27 кВ. Хотя вполне вероятно, что с увеличением размеров тяжеловесного движения в скором времени придется изменять (повышать) уровень стабилизации.

Проведенные исследования позволяют сделать вывод о целесообразности введения автоматики переключения уровня стабилизации напряжения в зависимости от тяговой нагрузки.

#### VI. Помехи преобразователя на железнодорожную связь

С момента включения первых установок СГРМ [8] на Западно-Сибирской железной дороге были отмечены помехи на поездную связь. Они проявлялись в том, что при приближении локомотива примерно за два километра до поста секционирования с СГРМ усиливались помехи на поездную связь машиниста локомотива. На рис. 9 представлен график радиоконтроля максимального уровня помехового воздействия на частоте 2,13 МГц вблизи ПС *Черная речка*.

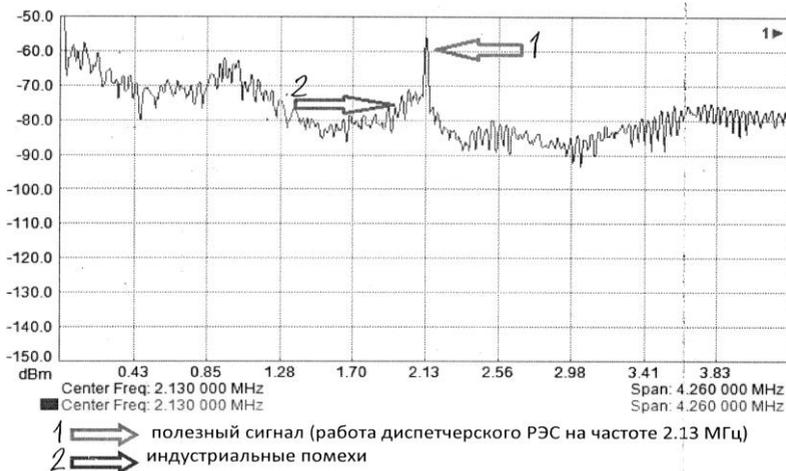


Рис. 9. Помехи СГРМ на поездную связь. Спектрограммы излучений

Fig. 9. SVG interference on train communication. Spectrum analyzer data

В период проведения совместных с представителем ОАО «РЖД» технических мероприятий по радиоконтролю максимальный уровень помехового воздействия на частоте 2,13 МГц наблюдался вблизи устройства стабилизации напряжения поста секционирования (СГРМ) контактной сети 27,5 кВ 1404 км структурного подразделения Красноуфимской дистанции энергоснабжения ЭЧ-10 Горьковской дирекции по энергообеспечению филиала ОАО «РЖД» («Трансэнерго»).

Установленный конденсаторный фильтр БР на СГРМ не улучшил ситуацию. В настоящее время ведется модернизация указанного фильтра. При увеличении мощности конденсаторов фильтра значительно снизилась мощность помех.

### **VIII. Предложения по повышению эффективности СГРМ**

Сегодня отсутствует утвержденная методика расчета мощности СГРМ для повышения пропускной способности железных дорог. Анализ работы существующих СГРМ на электрифицированных жд указывает на их завышенные мощности. Необходимо разработать методику расчета мощности СГРМ.

Недостатками СГРМ, как было отмечено, являются высокая стоимость оборудования и значительные потери электроэнергии в *IGBT*-транзисторах. Отвести такие потери из преобразователя при помощи воздушного охлаждения затруднительно, необходимо использовать системы с жидким теплоносителем, сложные в производстве и эксплуатации. Указанное заставляет искать пути их устранения. СГРМ способен генерировать реактивную мощность как емкостного, так и индуктивного характера (рис. 10).

Эта особенность использована в предлагаемом техническом решении комбинированной фильтрокомпенсирующей установки (КФКУ) [10]:

1) уменьшена существующая мощность СГРМ за счет использования типовой нерегулируемой фильтрокомпенсирующей установки (ФКУ);

2) за счет способности генерировать индуктивную составляющую стало возможным, включив параллельно СГРМ, регулировать мощность нерегулируемой ФКУ  $Q_{\text{пер}}$ , необходимая реактивная мощность сверх  $Q_{\text{пер}}$  устанавливается в СГРМ;

3) уменьшение существующей мощности СГРМ выполняется за счет введения нерегулируемой ФКУ, а также за счет передачи функции снижения гармоникотка от СГРМ к нерегулируемой ФКУ.

Известно, что режим активного фильтра СГРМ фильтрации гармоник требует увеличения мощности СГРМ на 30 %. Таким образом, мощность СГРМ уменьшается на мощность нерегулируемой ФКУ  $Q_{\text{пер}}$  и еще на 30 %. В итоге, для заданной мощности регулируемой компенсации  $Q_{\text{зад}}$ , мощность СГРМ в КФКУ:

$$Q_{\text{СГРМ}} = (Q_{\text{зад}} - 0,3Q_{\text{зад}}) / 2. \quad (3)$$

Здесь принято, что мощности ФКУ и СГРМ равны. Тогда на основании (3) мощность КФКУ равна  $Q_{\text{СГРМ}} = 0,35 Q_{\text{зад}}$ . Это означает, что мощность существующей СГРМ уменьшается в три раза, соответственно уменьшаются стоимость и потери мощности.

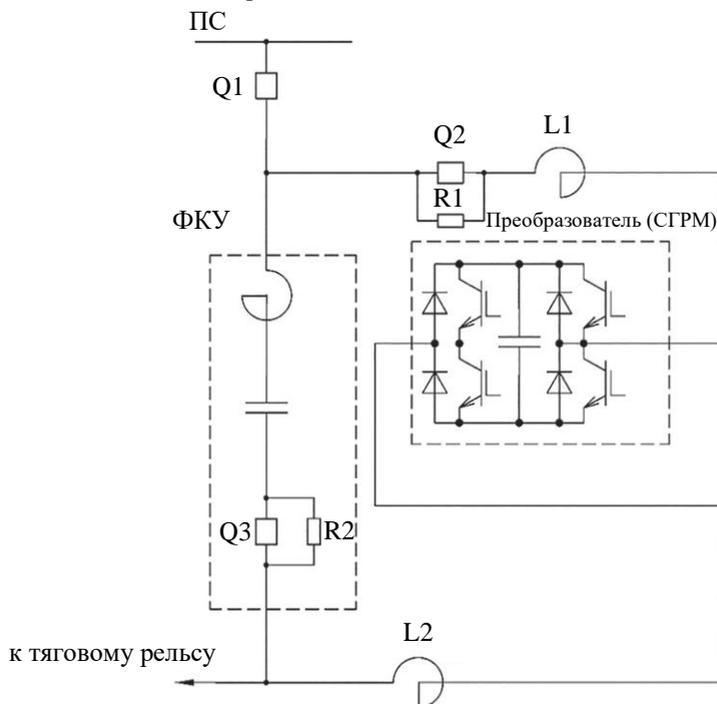


Рис. 10. Комбинированная фильтрокомпенсирующая установка

Fig. 10. Combined filter compensating unit

### VIII. Выводы

Анализ работы СГРМ в тяговой сети отечественных железных дорог доказал эффективность их работы в повышении пропускной способности. В настоящее время следует сосредоточить внимание на снижение активных потерь электроэнергии в СГРМ и снижение ее стоимости.

Исследования проектной мощности СГРМ на ПС Черная речка показали, что в течение суток генерируемая мощность изменяется в пределах 1,1...4,8 Мвар (при реактивной мощности участка – 7,5 Мвар), что значительно меньше проектного значения 15 Мвар. За прошедшие 3 года работы СГРМ на рассматриваемом участке не было ни одного случая пониженного

напряжения в межподстанционной зоне. Следует указать на необходимость разработки методики расчета мощности СГРМ для тяговых сетей железных дорог, учитывающей мощность тяговой нагрузки участка и требования повышения пропускной способности.

Экспериментальные исследования потерь мощности СГРМ на посту секционирования *Черная речка* ГЖД показали, что они составляют 1,63 % от средней генерируемой мощности СГРМ (3,2 Мвар), что соответствует потерям в 37,1 кВт, при этом следует прибавить потери собственных нужд СГРМ на вентиляцию транзисторов – 15 кВт и в сумме потери мощности в СГРМ получатся 52,1 кВт.

В настоящее время принято напряжение стабилизации на шинах ПС с СГРМ на уровне 27...28 кВ, однако доказательных пояснений по этому поводу не существует. Выбор повышенного напряжения стабилизации на уровне  $U_{ст} = 27...28$  кВ необходим для решения приоритетной задачи – увеличения скорости движения тяжеловесных поездов (когда вес поезда повышается от принятого 7100 т до 12000 т и выше). Однако при этом увеличивается потребление реактивной мощности ЭПС и увеличивается перекompенсация реактивной мощности в тяговой сети, что ведет к повышенным потерям электроэнергии. Авторы считают, что в конкретных условиях межподстанционных зон возможна корректировка указанного уровня стабилизации напряжения на шинах ПС с его снижением с 27...28 кВ до 26...27 кВ. Проведенные эксперименты подтвердили снижение активных потерь мощности СГРМ с 37,1 до 24,2 кВт, то есть на 35 % при снижении уровня стабилизации напряжения на ПС. При этом пропускная способность исследуемого участка не изменилась.

Целесообразна разработка автоматики СГРМ с переключением уровня стабилизации напряжения на ПС с повышенного значения при больших тяговых нагрузках на пониженный уровень стабилизации при пониженных значениях нагрузки. Кроме того, перспективен вариант предложенной в [10] КФКУ.

© Герман Л.А., 2023

© Галкин К.В., 2023

*Поступила в редакцию 02.06.2023*

*Принята к публикации 16.06.2023*

*Received 02.06.2023*

*Accepted 16.06.2023*

**Библиографический список**

- [1] Кочкин В.И. Статические компенсаторы реактивной мощности для электрических сетей. М.: Элекс-КМ, 2010. – 296 с.
- [2] Распоряжение ОАО «РЖД» № 2537р от 14.12.2016 г. Энергетическая стратегия холдинга «Российские железные дороги» на период до 2020 года и на перспективу до 2030 года.
- [3] Герман Л.А., Субханвердиев К.С., Герман В.Л. Автоматизация электроснабжения тяговой сети переменного тока. М.: ФГБУ ДПО «УМЦ ЖДТ», 2022. – 264 с.
- [4] Герман Л.А., Серебряков А.С. Регулируемые установки емкостной компенсации в системах тягового электроснабжения железных дорог. М.: ФГБУ ДПО «УМЦ ЖДТ», 2015. – 316 с.
- [5] Кондратьев Ю.В., Тарасенко А.В., Комяков А.А., Незевак В.Л., Терехин И.А. Методика выбора мест размещения и мощности устройств продольной и поперечной компенсации реактивной мощности в системе тягового электроснабжения железной дороги переменного тока. Промежуточный отчет о НИР. 2098. Омск: ОмГУПС, 2015. – 72 с.
- [6] Вагин Г.Я., Куликов А.Л., Лоскутов А.Б., Соснина Е.Н. Системы электроснабжения. Н. Новгород: НГТУ, 2019. – 462 с.
- [7] Никонов А.В. Улучшение эксплуатационных показателей системы тягового электроснабжения за счет совершенствования работы регулируемых устройств поперечной компенсации реактивной мощности: дис. канд. техн. наук, ОмГУПС, Омск, 2019. – 124 с.
- [8] Никонов А.В. Потери мощности в основном оборудовании и энергопотреблении собственных нужд СТАТКОМ // Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте, Февраль 8, 2018, Омск, Россия: ОмГУПС, 2018. С. 343-349.
- [9] Бородулин Б.М., Герман Л.А. Николаев Г.А. Конденсаторные установки электрифицированных железных дорог. М.: Транспорт, 1983. – 183 с.
- [10] Герман Л.А., Субханвердиев К.С., Серебряков А.С., Гончаренко В.П., Карабанов А.А. Способ регулирования реактивной мощности тяговой сети, Пат. 2762932 RU, заявл. 25.06.21; опубл. 24.12.21. – Бюл. № 36.

**References**

- [1] V.I. Kochkin, *Staticheskie kompensatory reaktivnoj moshchnosti dlya elektricheskikh setej* [Static reactive power compensators for electrical networks]. Moscow: Eleks-KM, 2010 (in Russian).
- [2] Order of JSCo “RZD” No. 2537r dated Dec. 14, 2016. *Energeticheskaya strategiya holdinga «Rossijskie zheleznye dorogi» na period do 2020 goda i na perspektivu do 2030 goda* [Energy strategy of the Russian Railways company for the period up to 2020 and for the future up to 2030] (in Russian).
- [3] L.A. German, K.S. Subhanverdiev and V.L. German, *Avtomatizaciya elektrosnabzheniya tyagovoj seti peremennogo toka* [Automation of power supply of AC traction network]. Moscow: FSBE APE «EICRT», 2022 (in Russian).
- [4] L.A. German and A.S. Serebryakov, *Reguliruemye ustanovki emkostnoj kompensacii v sistemah tyagovogo elektrosnabzheniya zheleznyh dorog* [Adjustable capacitive

- compensation units in railway traction power supply systems*]. Moscow: FSBE APE «EICRT», 2015 (in Russian).
- [5] Yu.V. Kondratiev, A.V. Tarasenko, A.A. Komyakov, V.L. Nezevak and I.A. Terekhin, “*Metodika vybora mest razmeshcheniya i moshchnosti ustrojstv prodol'noj i poperechnoj kompensacii reaktivnoj moshchnosti v sisteme tyagovogo elektrosnabzheniya zheleznoj dorogi peremennogo toka [Methodology for choosing the location and power of devices for longitudinal and transverse reactive power compensation in the traction power supply system of the AC railway]*”, OmGUPS, Omsk, Russia, Tech. Rep. 2098, 2015 (in Russian).
- [6] G.Ya. Vagin, A.L. Kulikov, A.B. Loskutov and E.N. Sosnina, *Sistemy elektrosnabzheniya [Power supply systems]*. N. Novgorod: NNSTU, 2019 (in Russian).
- [7] A.V. Nikonov, “*Uluchshenie ekspluatacionnyh pokazatelej sistemy tyagovogo elektrosnabzheniya za schet sovershenstvovaniya raboty reguliruemyyh ustrojstv poperechnoj kompensacii reaktivnoj moshchnosti [Improving the performance of the traction power supply system by improving the operation of adjustable devices for transverse reactive power compensation]*”, Cand. of Tech. S. thesis, OSTU, Omsk, Russia, 2019 (in Russian).
- [8] A.V. Nikonov, “Loss of power in basic equipment and power consumption of own needs STATCOM”, in *proc. Innovacionnye proekty i tekhnologii v obrazovanii, promyshlennosti i na transporte [Innovative Projects and Technologies in Education, Industry and Transport]*, Feb. 08, 2018, Omsk, Russia, pp. 343-349 (in Russian).
- [9] B.M. Borodulin, L.A. German and G.A. Nikolaev, *Kondensatornye ustanovki elektrificirovannyh zheleznyh dorog [Capacitor installations of electrified railways]*. Moscow: Transport, 1983 (in Russian).
- [10] L.A. German, K.S. Subkhanverdiev, A.S. Serebryakov, V.P. Goncharenko and A.A. Karabanov, “*Method for regulating the reactive power of the traction network*”, Patent RU 2762932, Dec. 24, 2021.

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Герман Леонид Абрамович**, доктор технических наук, профессор филиала Самарского государственного университета путей сообщения в Нижнем Новгороде, г. Нижний Новгород, Российская Федерация

**Галкин Константин Владимирович**, главный инженер Красноуфимской ДЭС Горьковской ДЭО Трансэнерго ОАО «РЖД», г. Красноуфимск, Российская Федерация

**Leonid A. German**, D. Sci. (Eng.), professor of the Branch of the Samara State Transport University in Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russian Federation

Konstantin V. Galkin, chief engineer of the Krasnoufimsk power supply distance of the Gorky Directorate for Energy Supply – a structural subdivision of Transenergo – a branch of the JSCo «RZD», Krasnoufimsk, Russian Federation

УДК 621.332

DOI 10.46960/2658-6754\_2023\_3\_101

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ТЯГОВЫХ СЕТЕЙ В АВАРИЙНЫХ РЕЖИМАХ

**К.В. Суслов**ORCID: 0000-0003-0484-2857 e-mail: [dr.souslov@yandex.ru](mailto:dr.souslov@yandex.ru)

Национальный исследовательский университет «МЭИ»

*Москва, Россия*

Иркутский национальный исследовательский технический университет

*Иркутск, Россия***А.В. Крюков**ORCID: 0000-0001-6543-1790 e-mail: [and\\_kryukov@mail.ru](mailto:and_kryukov@mail.ru)

Иркутский государственный университет путей сообщения

Иркутский национальный исследовательский технический университет

*Иркутск, Россия***Е.В. Воронина**ORCID: 0009-0008-4399-6086 e-mail: [eka7erina.voionina@yandex.ru](mailto:eka7erina.voionina@yandex.ru)

Иркутский государственный университет путей сообщения

*Иркутск, Россия*

Представлены результаты компьютерного моделирования с целью определения напряженностей ЭМП в описанной аварийной ситуации. Актуальность разработки связана с тем, что в процессе эксплуатации тяговых сетей 25 кВ могут возникать короткие замыкания (КЗ) контактного провода на рельсы. В режимах КЗ наблюдаются магнитные поля (ЭМП) высокой интенсивности, которые, несмотря на небольшую продолжительность воздействия, могут негативно влиять на электронные устройства. Трехмерное ЭМП вблизи металлической опоры при протекании через нее тока КЗ отличается сложной пространственной структурой, что существенно затрудняет расчеты напряженностей. Результаты моделирования показали значительное увеличение напряженностей ЭМП вблизи опоры; максимальное значение амплитуды напряженности магнитного поля достигает 2,3 кА/м, что может вызывать сбои в работе электронного оборудования. По мере удаления от нее наблюдается заметное снижение их уровней; на расстоянии 10 м от опоры напряженность магнитного поля уменьшается 80 раз, а электрического – в 4 раза.

**Ключевые слова:** аварийные режимы, моделирование, системы электро-снабжения железных дорог переменного тока, электромагнитная безопасность, электромагнитные поля вблизи опор.

**Для цитирования:** Суслов К.В., Крюков А.В., Воронина Е.В. Моделирование электромагнитных полей тяговых сетей в аварийных режимах // Интеллектуальная электротехника. 2023. № 3. С. 101-110. DOI: 10.46960/2658-6754\_2023\_3\_101

## MODELING OF ELECTROMAGNETIC FIELDS OF TRACTION NETWORKS IN EMERGENCY MODES

**K.V. Suslov**

ORCID: **0000-0003-0484-2857** e-mail: **dr.souslov@yandex.ru**  
National Research University «Moscow Power Engineering Institute»  
*Moscow, Russia*  
Irkutsk National Research Technical University  
*Irkutsk, Russia*

**A.V. Kryukov**

ORCID: **0000-0001-6543-1790** e-mail: **and\_kryukov@mail.ru**  
Irkutsk State Transport University  
Irkutsk National Research Technical University  
*Irkutsk, Russia*

**E.V. Voronina**

ORCID: **0009-0008-4399-6086** e-mail: **eka7erina.voeonina@yandex.ru**  
Irkutsk State Transport University  
*Irkutsk, Russia*

**Abstract.** During the operation of 25 kV traction networks, short circuits of the contact wire to the rails may occur. High-intensity magnetic fields (EMF) are observed in short-circuit modes, which, despite the short duration of exposure, can adversely affect electronic devices. A three-dimensional EMF near a metal support with a short-circuit current flowing through it is characterized by a complex spatial structure, which significantly complicates the calculations of strengths. The article describes the results of computer simulation aimed at determining the EMF strengths in the described emergency situation. The simulation results showed a significant increase in the EMF strengths near the support; the maximum value of the amplitude of the magnetic field strength reaches 2.3 kA/m, which can cause malfunctions in the operation of electronic equipment. As you move away from it, there is a noticeable decrease in their levels; at a distance of ten meters from the support, the intensity of the magnetic field decreases eighty times, and the electric one four times.

**Keywords:** emergency modes, modeling, AC railway power supply systems, electromagnetic safety, electromagnetic fields near towers.

**For citation:** K.V. Suslov, A.V. Kryukov and E.V. Voronina, “Modeling of electromagnetic fields traction networks in emergency modes”, *Smart Electrical Engineering*, no. 3, pp. 101-110, 2023. DOI: 10.46960/2658-6754\_2023\_3\_101

## 1. Введение

Современные системы электроснабжения железных дорог (СЭЖД) включают два взаимосвязанных сегмента: физический и информационный [1]. Для железных дорог переменного тока в состав первого сегмента входят тяговые сети (ТС) 25 и 2х25 кВ, а также подстанции, а второй – образуют измерительные комплексы и каналы для передачи данных и управляющих воздействий. В процессе реализуемого в настоящее время цифрового перехода значимость второго сегмента становится сопоставимой с физической частью СЭЖД. Для повышения эффективности функционирования систем электроснабжения можно использовать кибер-физический подход, для реализации которого необходима разработка методов и алгоритмов, обеспечивающих адекватное решение большого комплекса задач, возникающих при эксплуатации СЭЖД. Важный класс таких задач связан с обеспечением условий электромагнитной безопасности (ЭМБ).

Одним из основных факторов, определяющих условия ЭМБ, являются электромагнитные поля [2, 3]. Они могут генерировать помехи, вызывающие нарушения нормального функционирования электрических и электронных устройств [3], вызывать возгорание легковоспламеняющихся веществ, а также приводить к тяжелым несчастным случаям при работе на отключенных линиях электропередачи (ЛЭП) и связи из-за воздействия на персонал наведенных напряжений.

Вопросам моделирования электромагнитных полей ЛЭП и ТС посвящено большое число работ. В статье [4] рассмотрены вопросы использования программных модулей *Comsol Multiphysics* для расчета напряженностей ЭМП, генерируемых вблизи высоковольтных линий электропередачи. В [5] анализируются ЭМП вблизи высоковольтной линии электропередачи, а также приводятся результаты анализа влияния отдельных параметров на их напряженности. Результаты исследования электромагнитного поля в пространстве между линией электропередачи и железной дорогой представлены в [6]. В [7] рассматривались ЭМП вблизи ЛЭП 132 кВ, которые рассчитывались на основе закона Био-Савара и уравнений Максвелла. Для упрощения расчета магнитного поля был применен метод наложения. В [8] было показано, что величины напряженностей ЭМП зависят от расстояния между опорами. Кроме того, в ней представлены результаты теоретических исследований, связанных с поглощением электромагнитной энергии и оценкой эффективности мер защиты персонала от воздействия ЭМП. В [9] приведены данные, характеризующие уровни напряженностей ЭМП под проводами линий 500 кВ. Моделирование выполнялось для горизонтального и вертикального расположения проводников в сбалансированных и несбалансированных условиях. Результаты анализа распределения электромагнитного поля на высоковольтных подстанциях 400 кВ приведены в [10]. В [11]

представлена модель для вычисления напряженностей электромагнитного поля промышленной частоты, создаваемых воздушной линией электропередачи.

Анализ перечисленных выше исследований позволяет сделать вывод о том, что в них рассмотрены важные аспекты, связанные с определением ЭМП, генерируемых линиями электропередачи и тяговыми сетями, а также анализом условий электромагнитной безопасности. Однако метод решения задачи моделирования ЭМП вблизи металлических опор контактной сети или ЛЭП при аварийных режимах в этих работах не представлен. Такой метод может быть реализован на основе алгоритмов, приведенных в [12] и реализованных в программном комплексе *Fazonord* [13].

### II. Постановка задачи

При заземлении опор контактной сети на рельсовый путь [14] в СЭЖД могут возникать аварийные режимы, вызванные замыканиями контактной подвески (КП) на рельсы. Трехмерное электромагнитное поле вблизи металлической опоры при протекании через нее тока КЗ отличается сложной пространственной структурой, что существенно затрудняет расчеты напряженностей. Для решения задач определения ЭМП вблизи опор в аварийных режимах, может использоваться подход, предложенный в [12] и реализованный в программном комплексе *Fazonord* [13]; при этом токоведущие части представляются отрезками тонких проводов для расчета распределения электрического заряда с дальнейшим расчетом напряженностей электрического и магнитного полей.

### III. Результаты моделирования

Фрагмент схемы СЭЖД, которая использовалась при моделировании трехмерных ЭМП, возникающих при замыкании КП на рельс, показан на рис. 1. Схема включала следующие элементы: питающие ЛЭП 220 кВ; две тяговые подстанции с трансформаторами мощностью 40 МВА; тяговая сеть 25 кВ межподстанционной зоны протяженностью 50 км. Для реализации подхода, описанного в [12], кроме моделей перечисленных выше силовых элементов были сформированы модели опоры контактной сети, а также набора коротких проводов, отвечающих участку контактной подвески, на котором происходило короткое замыкание. Проводимость земли была принята равной 0,01 См/м. Опора была представлена четырьмя стержнями высотой 10 м (рис. 2).

В результате моделирования были построены зависимости амплитуд напряженностей электрического и магнитного полей на высоте 1,8 м от координат  $x$  и  $z$  в режиме замыкания КП на рельс (рис. 3, 4). Распределение напряженностей электрического и магнитного полей в пространстве, окружающем опору контактной сети показано на рис. 5. Ось  $Z$  была направлена вдоль трассы железной дороги, а ось  $X$  – перпендикулярно ей.

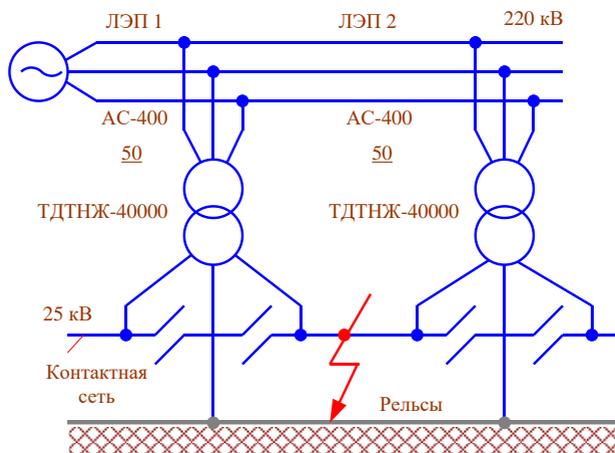
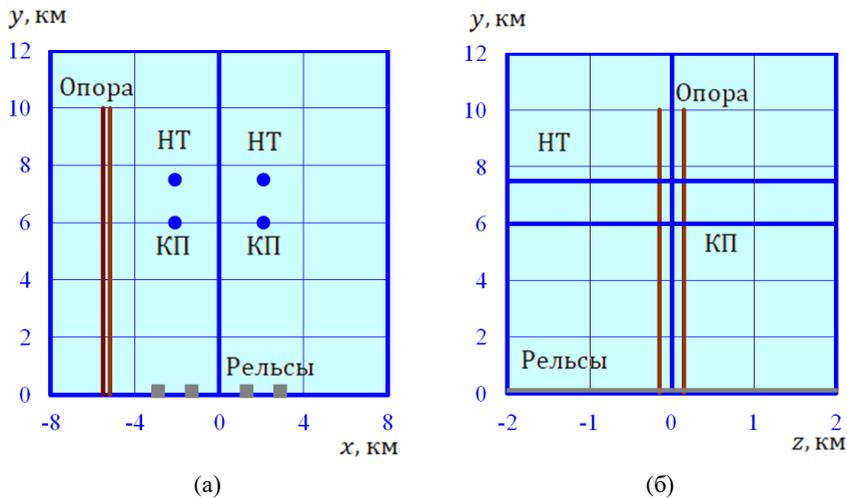


Рис. 1. Схема замыкания контактного провода на рельс

Fig. 1. Scheme of a short circuit of the contact wire on the rail



(а)

(б)

Рис. 2. Координаты токоведущих частей:  
плоскость  $x - y$  (а); плоскость  $z - y$  (б)

Fig. 2. Coordinates of live parts: plane  $x - y$  (а); plane  $z - y$  (б)

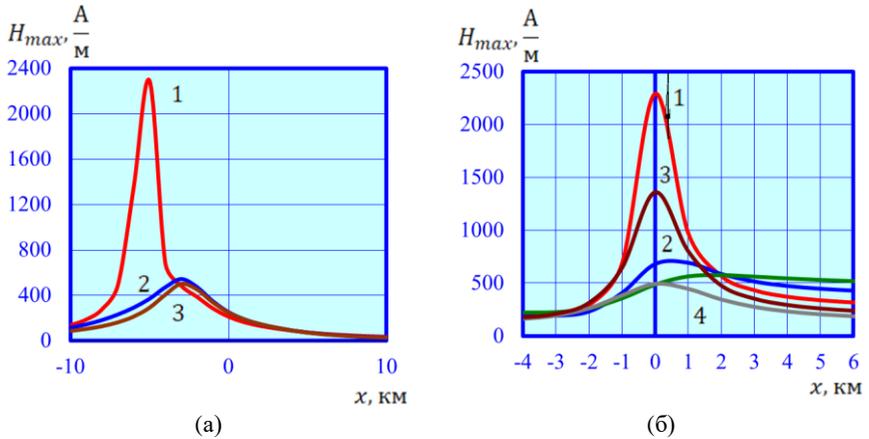


Рис. 3. Амплитуды напряженностей магнитного поля на высоте 1,8 м:

$$H_{max} = H_{max}(x); 1 - z = 0 \text{ м}, 2 - z = 4 \text{ м}, 3 - z = 8 \text{ м} \text{ (а)}; H_{max} = H_{max}(z); \\ 1 - x = -5 \text{ м}, 2 - x = -4 \text{ м}, 3 - x = -3 \text{ м}, 4 - x = -7 \text{ м}, 5 - x = -6 \text{ м} \text{ (б)}$$

Fig. 3. Amplitudes of the magnetic field strength at a height of 1.8 m:

$$H_{max} = H_{max}(x); 1 - z = 0 \text{ m}, 2 - z = 4 \text{ m}, 3 - z = 8 \text{ m} \text{ (a)}; H_{max} = H_{max}(z); \\ 1 - x = -5 \text{ m}, 2 - x = -4 \text{ m}, 3 - x = -3 \text{ m}, 4 - x = -7 \text{ m}, 5 - x = -6 \text{ m} \text{ (b)}$$

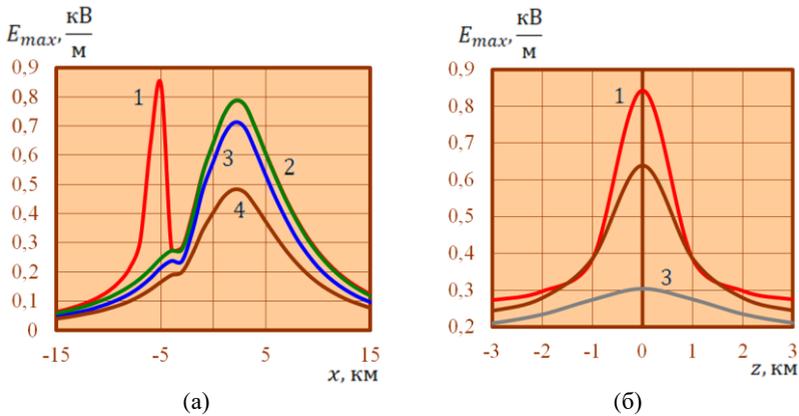


Рис. 4. Амплитуды напряженностей электрического поля на высоте 1,8 м:

$$E_{max} = E_{max}(x); 1 - z = 0 \text{ м}, 2 - z = 8 \text{ м}, 3 - z = 16 \text{ м}, 4 - z = 20 \text{ м} \text{ (а)}; \\ E_{max} = E_{max}(z); x = -5 \text{ м}, 2 - x = -7 \text{ м}, 3 - x = -6 \text{ м} \text{ (б)}$$

Fig. 4. The amplitudes of the electric field strength at a height of 1.8 m:

$$E_{max} = E_{max}(x); 1 - z = 0 \text{ m}, 2 - z = 8 \text{ m}, 3 - z = 16 \text{ m}, 4 - z = 20 \text{ m} \text{ (a)}; \\ E_{max} = E_{max}(z); x = -5 \text{ m}, 2 - x = -7 \text{ m}, 3 - x = -6 \text{ m} \text{ (b)}$$

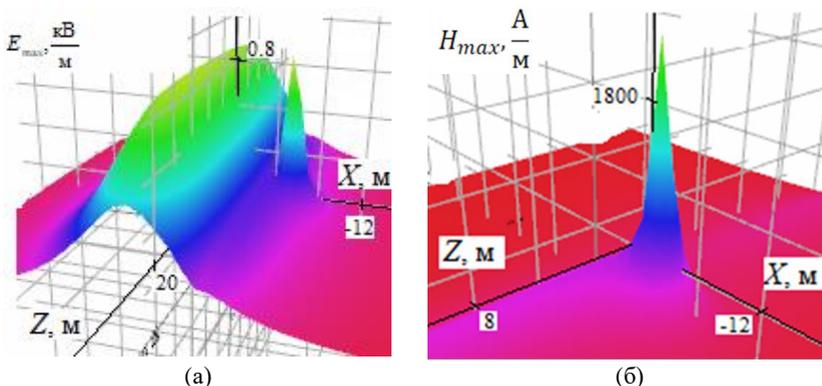


Рис. 5. Распределение напряженностей электрического (а) и магнитного (б) полей в пространстве, окружающем опору контактной сети

Fig. 5. Distribution of strengths of electric (a) and magnetic (b) fields in the space surrounding the support of the contact network

#### IV. Заключение

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

- максимальное значение амплитуды напряженности магнитного поля при режиме замыкания КП на рельс достигает вблизи опоры 2,3 кА/м (рис. 3), что может вызывать сбои в работе электронного оборудования;
- максимум электрического поля, превышающий 0,8 кВ/м (рис. 4), также наблюдается вблизи опоры;
- трехмерное электромагнитное поле при замыкании контактной подвески через опору на рельс имеет сложную пространственную структуру (рис. 5);
- по мере удаления от опоры наблюдается заметное снижение уровней напряженностей; так, например, на расстоянии 10 м от опоры напряженность магнитного поля уменьшается в 80 раз, а электрического – в 4 раза.

Представленная методика позволяет осуществлять корректный учет влияния опор при моделировании электромагнитных полей тяговых сетей магистральных железных дорог. Ее основная особенность состоит в том, что стержни опоры и система коротких проводов, отвечающих контактной подвеске и рельсам, составляют единую группу элементов, создающих поле; определение ЭМП производится на основе расчета режима в фазных координатах.

© Сулов К.В., 2023  
© Крюков А.В., 2023  
© Воронина Е.В., 2023

Поступила в редакцию 08.06.2023  
Принята к публикации 15.08.2023  
Received 08.06.2023  
Accepted 15.08.2023

### Библиографический список

- [1] Bulatov Yu., Kryukov A., Suslov K., Lombardi P., Komarnicki P. A cyber-physical approach to control and management of railway power supply systems // International Scientific and Practical Conference ‘‘Young Engineers of the Fuel and Energy Complex: Developing the Energy Agenda of the Future’’ (EAF 2021), Dec. 10-11, 2022, St. Petersburg, Russia. Atlantis Press, 2022. P. 116-125.
- [2] Levit B.B. Electromagnetic Fields: A Consumer's Guide to the Issues and How to Protect Ourselves. iUniverse, 2007. – 462 p.
- [3] Buyakova N.V., Zakaryukin V.P., Kryukov A., Seredkin D.A. Simulation of electromagnetic fields generated by overhead power lines and railroad traction networks // Energy Systems Research. 2021. Vol. 4. No. 2. P. 70-88.
- [4] Ali Rachedi B., Babouri A., Berrouk F. A study of electromagnetic field generated by high voltage lines using Comsol Multiphysics // 2014 International Conference on Electrical Sciences and Technologies in Maghreb (CISTEM), Nov. 03-06, 2014, Tunis, Tunisia: IEEE, 2014. DOI: 10.1109/CISTEM.2014.7076989
- [5] Liu J., Ruan W., Fortin S., Dawalibi F.P. Electromagnetic fields near high voltage electrical power lines: a parametric analysis // proc. International Conference on Power System Technology, Oct. 13-17, 2002, Kunming, China: IEEE, 2002. P. 401-408. DOI: 10.1109/ICPST.2002.1053575
- [6] Al Dhalaan S.M., Elhribawy M.A. A quantitative study of the electromagnetic field coupling between electric power transmission line and railway // CCECE 2003 - Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. Toward a Caring and Humane Technology, May 04-07, 2003, Montreal, QC, Canada: IEEE, 2003. Vol. 1. P. 431-434. DOI: 10.1109/CCECE.2003.1226432
- [7] Sougui A. O., Mohd Jenu M.Z. Measurement and analysis of magnetic field radiation near 132KV power lines // proc. 2014 IEEE Asia-Pacific Conference on Applied Electromagnetics (APACE), Dec. 08-10, 2014, Johor Bahru, Malaysia: IEEE, 2014. P. 207-210. DOI: 10.1109/APACE.2014.7043781
- [8] Mahapatra S., Dey T.K., Ghosh J. Estimation of the fields radiated from H.T. power lines // proc. 2008 10th International Conference on Electromagnetic Interference & Compatibility, Nov. 26-27, 2008, Bangalore, India: IEEE, 2008. P. 395-397.
- [9] Xiao L. and Holbert K.E. Development of software for calculating electromagnetic fields near power lines // proc. 2014 North American Power Symposium (NAPS), Sep. 07-09, 2014, Pullman, WA, USA. IEEE, 2014. P. 1-6. DOI: 10.1109/NAPS.2014.6965378
- [10] Purcar M., Munteanu C., Avram A., Miron F. CAD/CAE modeling of electromagnetic field distribution in hv sub-stations and investigation of the human exposure //

- proc. 2016 International Conference on Applied and Theoretical Electricity (ICATE), Oct. 06-08, 2016, Craiova, Romania. IEEE, 2016. P. 1-5.
- [11] Xu L., Li Y., Yu J., Hou X., An C. Research on electric field of high-voltage transmission line power frequency // proc. 2006 International Conference on Power System Technology, Oct. 22-26., 2006, Chongqing, China: IEEE, 2006. P. 1-4. DOI: 10.1109/ICPST.2006.321493
- [12] Закарюкин В.П., Крюков А.В. Моделирование электромагнитных полей, создаваемых системой коротких токоведущих частей // System Analysis and Mathematical Modeling. 2021. № 3 (2). С. 145-163.
- [13] Закарюкин В.П., Крюков А.В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем. Иркутск: ИрГУПС, 2005. – 273 с.
- [14] Косарев А.Б., Косарев Б.И. Основы электромагнитной безопасности систем электроснабжения железнодорожного транспорта. М.: Интекст, 2008. – 480 с.

### References

- [1] Yu. Bulatov, A. Kryukov, K. Suslov, P. Lombardi and P. Komarnicki, “A cyber-physical approach to control and management of railway power supply systems”, in proc. *International Scientific and Practical Conference "Young Engineers of the Fuel and Energy Complex: Developing the Energy Agenda of the Future" (EAF 2021)*, Dec. 10-11, 2022, St. Petersburg, Russia, pp. 116-125.
- [2] B.B. Levit. *Electromagnetic Fields: A Consumer's Guide to the Issues and How to Protect Ourselves*. iUniverse, 2007.
- [3] N.V. Buyakova, V.P. Zakaryukin, A. Kryukov and D.A. Sereдкин, “Simulation of electromagnetic fields generated by overhead power lines and railroad traction networks”, *Energy Systems Research*, vol. 4, no. 2, pp. 70-88, July 2021.
- [4] B. Ali Rachedi, A. Babouri and F. Berrouk, “A study of electromagnetic field generated by high voltage lines using Comsol Multiphysics”, in proc. *2014 International Conference on Electrical Sciences and Technologies in Maghreb (CISTEM)*, Nov. 03-06, 2014, Tunis, Tunisia. DOI: 10.1109/CISTEM.2014.7076989
- [5] J. Liu, W. Ruan, S. Fortin and F.P. Dawalibi, “Electromagnetic fields near high voltage electrical power lines: a parametric analysis”, in proc. *Proceedings. International Conference on Power System Technology*, Oct. 13-17, 2002, Kunming, China, pp. 401-408. DOI: 10.1109/ICPST.2002.1053575
- [6] S.M. Al Dhalaan and M.A. Elhribawy, “A quantitative study of the electromagnetic field coupling between electric power transmission line and railway”, in proc. *CCECE 2003 – Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. Toward a Caring and Humane Technology*, May 04-07, 2003, Montreal, QC, Canada, vol. 1, pp. 431-434. DOI: 10.1109/CCECE.2003.1226432
- [7] A.O. Sougui and M.Z. Mohd Jenu, “Measurement and analysis of magnetic field radiation near 132KV power lines”, in proc. *2014 IEEE Asia-Pacific Conference on Applied Electromagnetics (APACE)*, Dec. 08-10, 2014, Johor Bahru, Malaysia, pp. 207-210. DOI: 10.1109/APACE.2014.7043781
- [8] S. Mahapatra, T.K. Dey and J. Ghosh, “Estimation of the fields radiated from H.T. power lines”, in proc. *2008 10th International Conference on Electromagnetic Interference & Compatibility*, Nov. 26-27, 2008, Bangalore, India, pp. 395-397.

- [9] L. Xiao and K.E. Holbert, "Development of software for calculating electromagnetic fields near power lines", in proc. *2014 North American Power Symposium (NAPS)*, Sep. 07-09, 2014, Pullman, WA, USA pp. 1-6. DOI: 10.1109/NAPS.2014.6965378
- [10] M. Purcar, C. Munteanu, A. Avram and F. Miron, "CAD/CAE modeling of electromagnetic field distribution in hv sub-stations and investigation of the human exposure", in proc. *2016 International Conference on Applied and Theoretical Electricity (ICATE)*, Oct. 06-08, 2016, Craiova, Romania pp. 1-5.
- [11] L. Xu, Y. Li, J. Yu, X. Hou and C. An, "Research on Electric Field of High-Voltage Transmission Line Power Frequency", in proc. *2006 International Conference on Power System Technology*, Oct. 22-26., 2006, Chongqing, China, pp. 1-4.
- [12] V.P. Zakaryukin and A.V. Kryukov, "Modeling of electromagnetic fields, created by the short wires", *System Analysis and Mathematical Modeling*, vol. 3, no. 2, pp. 145-163, 2021.
- [13] V.P. Zakaryukin and A.V. Kryukov, *Multi asymmetrical modes of electric systems*. Irkutsk: IrGUPS, 2005.
- [14] A.B. Kosarev and B.I. Kosarev, *Osnovy elektromagnitnoj bezopasnosti sistem elektrosnabzheniya zheleznodorozhnogo transporta [Fundamentals of electromagnetic safety of electric power supply systems of railway transport]*. Moscow: Intext, 2008 (in Russian).

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Суслов Константин Витальевич**, доктор технических наук, профессор Национального исследовательского университета «МЭИ», г. Москва, Российская Федерация; профессор Иркутского национального исследовательского технического университета, г. Иркутск, Российская Федерация

**Konstantin V. Suslov**, D. Sci. (Eng.), professor of the National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow, Irkutsk, Russian Federation; professor of the Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation

**Крюков Андрей Васильевич**, доктор технических наук, профессор Иркутского государственного университета путей сообщения; профессор Иркутского национального исследовательского технического университета, г. Иркутск, Российская Федерация

**Andrey V. Kryukov**, D. Sci. (Eng.), professor of the Irkutsk State Transport University; professor of the Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation

**Воронина Екатерина Викторовна**, аспирант Иркутского государственного университета путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

**Ekaterina V. Voronina**, postgraduate student of the Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russian Federation

УДК 621.31:51-74

DOI 10.46960/2658-6754\_2023\_3\_111

## **ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЧАСОВ ПИКОВОЙ НАГРУЗКИ РЕГИОНАЛЬНЫХ ЭНЕРГОСИСТЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НАИВНЫХ МОДЕЛЕЙ**

**В.А. Воронин**

ORCID: 0000-0002-7242-9100 e-mail: voroninva@kuzstu.ru

*Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева  
Кемерово, Россия***Ф.С. Непша**

ORCID: 0000-0002-7468-2548 e-mail: nepshafs@kuzstu.ru

*Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева  
Кемерово, Россия  
ООО «РТСофт-Смарт Грид»  
Москва, Россия*

Представлены результаты сравнительного анализа 10 различных вариантов моделей прогнозирования часов пиковой нагрузки на примере 67 субъектов Российской Федерации. Проведена оценка годового экономического эффекта для различных стратегий управления электропотреблением. Определены ориентировочные значения сроков окупаемости систем накопления электроэнергии, используемых для разряда в часы пиковых нагрузок. Это позволило дать оценку экономического потенциала управления электропотреблением для потребителей электроэнергии за счет снижения электрической нагрузки в часы пиковых нагрузок региональной энергосистемы. Приведенные результаты актуализируются в связи с тем, что час пиковой нагрузки заранее неизвестен, и потребитель должен прогнозировать его наступление для организации программы управления электропотреблением. Построение прогнозной модели может быть выполнено с использованием наивных методов прогнозирования, основанных на простых правилах.

**Ключевые слова:** прогнозирование, рынок электроэнергии, системы накопления электроэнергии, управление спросом, управление электропотреблением, часы пиковой нагрузки.

**Для цитирования:** Воронин В.А., Непша Ф.С. Прогнозирование часов пиковой нагрузки региональных энергосистем с использованием наивных моделей // Интеллектуальная Электротехника. 2023. № 3. С. 111-124.  
DOI: 10.46960/2658-6754\_2023\_3\_111

## FORECASTING PEAK LOAD HOURS OF REGIONAL POWER SYSTEMS USING NAIVE MODELS

**V.A. Voronin**

ORCID: 0000-0002-7242-9100 e-mail: voroninva@kuzstu.ru

T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University

*Kemerovo, Russia*

**F.S. Nepsha**

ORCID: 0000-0002-7468-2548 e-mail: nepshafs@kuzstu.ru

T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University

*Kemerovo, Russia*

«RTSoft-Smart Grid» LLC

*Moscow, Russia*

**Abstract.** The paper assesses the economic potential of power consumption management for electricity consumers by reducing the electrical load during peak hours of the regional energy system. Due to the fact that the hour of peak load is not known in advance, the consumer must predict its occurrence in order to organize an energy management program. The development of a predictive model can be done using naive forecasting methods based on simple rules. The article presents a comparative analysis of 10 different models for forecasting peak hours using the example of 67 subjects of the Russian Federation. An assessment of the annual economic effect for various strategies for managing electricity consumption was carried out. Approximate values of the payback periods of energy storage systems used for discharge during peak hours are determined.

**Keywords:** demand management, electricity market, electricity storage systems, forecasting, peak hours, power consumption management.

**For citation:** V.A. Voronin and F.S. Nepsha, "Forecasting peak load hours of regional power systems using naive models", *Smart Electrical Engineering*, no. 3, pp. 111-124, 2023. DOI: 10.46960/2658-6754\_2023\_3\_111

### I. Введение

Ценообразование в российской электроэнергетике стимулирует потребителей выравнивать свои графики электропотребления и снижать пиковые нагрузки. Крупные потребители (более 670 кВт) оплачивают электроэнергию по 3-6 ценовым категориям (ЦК), предусматривающим почасовые тарифы на электроэнергию и тариф на мощность за фактический час пиковой нагрузки и за плановые часы пиковой нагрузки региональной энергосистемы.

Проведенный авторами анализ показал, что в 2022 г. для 3 ЦК (класс напряжения СН-1, максимальная мощность энергопринимающих установок потребление 670 кВт - 10 МВт) средний (по 67-ми субъектам России) тариф на электроэнергию составил 3740,30 руб/МВт·ч, а средний суточный размах

его изменения – 706,32 руб/МВт·ч. Это позволяет потребителям экономить за счет переноса наиболее энергоемких технологических процессов на часы с наиболее дешевой электроэнергией (ночные). Однако в час пиковой нагрузки (ЧПН) стоимость электропотребления возрастает в среднем до 39761,09 руб/МВт (получено путем усреднения отношения тарифа на мощность к количеству рабочих дней в месяце), что в 10,63 раз выше по сравнению со средней стоимостью электроэнергии в остальные (непиковые) часы суток. Таким образом, снижение электропотребления в течение всего одного часа в сутки позволяет значительно сократить расходы на покупку электроэнергии без существенных изменений режима работы потребителя.

ЧПН публикуются на сайте Администратора торговой системы (АО «АТС») 10-го числа месяца, следующего за расчетным, т.е. становятся известны потребителям только постфактум (в соответствии с п. 192 Постановления Правительства РФ от 27.12.2010 № 1172). Таким образом, для максимально эффективного управления собственным электропотреблением необходимо прогнозировать ЧПН. В связи с тем, что потребители не имеют доступа к оперативным данным об изменениях электрической нагрузки региональной энергосистемы, при прогнозировании ЧПН они вынуждены опираться на данные АО «АТС».

В [1] на примере машиностроительного предприятия показано, что смещение электропотребления с периодов пиковой нагрузки энергосистемы позволяет сократить плату на электроэнергию на величину до 42-63 %. Согласно оценкам, проведенным в [2], средняя экономия затрат на электропотребление за счет управления спросом для промышленных предприятий может составить порядка 20 %. В [3] показано, что сокращение электропотребления в ЧПН может обеспечить снижение затрат на покупку электроэнергии промышленными предприятиями на величину от 3,3 до 20 %. В [4] получено снижение затрат на электроснабжение на 34,62 % за счет оптимизации режима работы компрессорной станции с учетом суточных изменений тарифа на электроэнергию. В [5] аналогичное исследование проведено для тепловых насосов и показало эффект сокращения затрат на 13,6 %.

Управляемое изменение электропотребления может быть также реализовано за счет систем накопления электроэнергии (СНЭЭ). В [6] показано, что экономический доход при использовании СНЭЭ для извлечения прибыли из суточного колебания цен на электроэнергию (арбитраж) может достигать 270 \$/МВт·ч в сутки. По данным [8], использование накопителей электроэнергии может обеспечить экономический доход за счет ценового арбитража и оказания системных услуг при сроках окупаемости от 3,35 до 10,95 лет. В [8] показано, что система из солнечных панелей и СНЭЭ может приносить экономический доход, за счет арбитража цен и ограничения пиковых нагрузок.

## II. Постановка проблемы

ЧПН подвержены сезонным колебаниям, связанным с изменением продолжительности светового дня, температуры воздуха, структуры электропотребления, а также годовым колебаниям, связанным с развитием промышленности и жилищно-коммунального хозяйства, а также с изменениями в экономике региона.

При выборе метода для прогнозирования ЧПН целесообразно начать анализ с наиболее простых (наивных) методов, основанных на простых правилах (так называемые «*Persistence Model*»). Как показал авторский опыт использования методов машинного обучения для прогнозирования ЧПН, усложнение алгоритмов не всегда позволяет получить значительный прирост точности прогнозирования, однако, может существенно усложнить подготовку, развертывание и эксплуатацию таких прогнозных моделей [9]. Аналогичные результаты были получены и другими авторами, например, в [10] точность прогнозирования составляет порядка 50 % при использовании искусственной нейронной сети для прогнозирования ЧПН на примере Ярославской области.

На рис. 1 в качестве примера показано изменение ЧПН в 2020-2022 гг. для Кемеровской области.

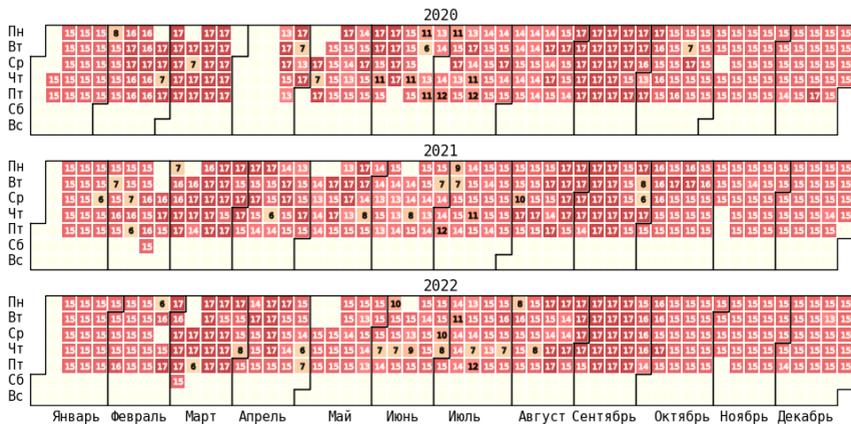


Рис. 1. Распределение ЧПН по годам в Кемеровской области

Fig. 1. Distribution of peak load hours by years in the Kemerovo region

На рис. 1 наблюдается выраженная сезонность изменения ЧПН, однако, общий характер распределения ЧПН от года к году отличается несущественно. Это дает возможность использовать наивные прогнозные мо-

дели, обеспечивающие удовлетворительный прогноз ЧПН на основе данных предшествующего года. Такие модели отличаются простотой, быстродействием и большим горизонтом прогнозирования.

Рост популярности машинного обучения и нейронных сетей часто приводит к недостаточному вниманию или даже полному исключению из анализа этапа разработки простых наивных моделей, в то время как такие алгоритмы могут в ряде случаев успешно заменять сложные модели машинного обучения. В настоящей работе выполнен анализ точности основных вариантов наивных моделей прогнозирования ЧПН, а также определен экономический эффект, который может быть получен при использовании данных моделей для управления электропотреблением.

### III. Методология

Настоящее исследование выполнено на языке программирования *Python* с использованием библиотеки *pandas*. ЧПН и тарифная информация загружены с сайта АО «АТС» за период 2019-2022 гг. Данные по тарифам на услуги по передаче электрической энергии и сбытовым надбавкам в регионах РФ загружены с портала «*Time2Save*».

В качестве наивных моделей прогнозирования ЧПН рассмотрены алгоритмы, основанные на:

- предположении о неизменности ЧПН в текущем и прошлом месяце;
- предположении о неизменности ЧПН в текущем и прошлом году.

Модель может принимать в качестве прогноза пиковый час соответствующего дня предыдущего месяца/года или выполнять агрегирование ЧПН в пределах некоторого окна данных предыдущих периодов времени. Во втором случае в качестве агрегирующей функции может быть использована функция *value\_counts* библиотеки *pandas*, выполняющая подсчет количества уникальных значений внутри окна данных и возвращающая список пиковых часов, ранжированный по частоте их появления. Агрегирование данных также позволяет прогнозировать интервалы времени в несколько часов, в пределах которых наиболее вероятно появление ЧПН.

Точность прогнозирования оценивается долей попадания фактических ЧПН в предсказанный интервал времени. Общая результативность модели прогнозирования оценивается на основании расчета величины годовой экономии финансовых средств при регулярном ограничении электропотребления в предсказанные часы суммарно на 1 кВт·ч в сутки, за счет увеличения электрической нагрузки на аналогичную величину в час с минимальной стоимостью электроэнергии. Расходы на покупку электроэнергии определялись для 3-й и 4-й ценовой категории. Для 4-й ЦК расчетное выражение приведено ниже (для 3-й ЦК используется аналогичная формула, но без платы за «сетевую» мощность):

$$C = \sum_{d=1}^{365} \sum_{h=1}^{24} (c_{w,h,d} W_{h,d}) + \sum_m^{12} \left( c_{p1,m} \frac{\sum_{w=1}^{wd} P_{rh,w}}{wd} \right) + \sum_m^{12} \left( c_{p2,m} \frac{\sum_{w=1}^{wd} P_{ph,w}}{wd} \right), \quad (1)$$

где  $c_{w,h,d}$  – ставка за электрическую энергию для  $h$ -го часа  $d$ -го дня, руб/МВт·ч;  $c_{p1,m}$  – ставка за «генераторную» мощность в  $m$ -м месяце, руб/МВт в месяц;  $c_{p2,m}$  – ставка за «сетевую» мощность  $m$ -м месяце, руб/МВт в месяц;  $W_{h,d}$  – потребление электрической энергии в  $h$ -й час  $d$ -го дня, МВт·ч;  $P_{rh,w}$  – потребление электроэнергии в час пиковой нагрузки  $w$ -го рабочего дня, МВт;  $P_{ph,w}$  – максимальное часовое потребление электроэнергии в плановые часы пиковой нагрузки  $w$ -го рабочего дня, МВт;  $wd$  – количество рабочих дней в  $m$ -м месяце. Экономический эффект достигается в основном за счет снижения величины  $P_{rh}$  при регулярном сокращении электрической нагрузки в ЧПН, а также частично за счет сокращения величины  $W_{h,d}$ .

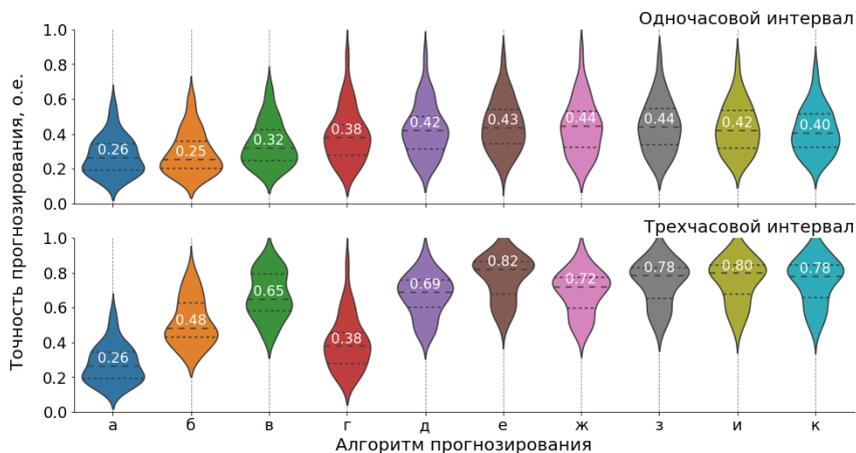
Прогнозирование выполнено отдельно для каждого региона РФ для 2020, 2021 и 2022 гг. по данным предшествующего года с усреднением полученных результатов. В работе рассмотрено 67 субъектов РФ.

#### IV. Результаты

На рис. 2 приведены результаты прогнозирования ЧПН, полученные с помощью наивных моделей, принимающих в качестве прогноза ЧПН:

- а) пиковый час соответствующего дня прошлого месяца;
- б) наиболее частый пиковый час соответствующей недели прошлого месяца;
- в) наиболее частый пиковый час прошлого месяца;
- г) пиковый час соответствующего дня прошлого года;
- д) наиболее частый пиковый час соответствующей недели прошлого года;
- е) наиболее частый пиковый час соответствующего месяца прошлого года;
- ж) наиболее частый пиковый час скользящего окна в 1 неделю со смещением на год;
- з) наиболее частый пиковый час скользящего окна в 2 недели со смещением на год;
- и) наиболее частый пиковый час скользящего окна в 3 недели со смещением на год;
- к) наиболее частый пиковый час скользящего окна в 4 недели со смещением на год.

Как следует из рис. 2, лучшие результаты при прогнозировании в одночасовом интервале показали методы е, ж, з, и с медианой точности в 0,43...0,44, в трехчасовом интервале – е, и с медианой точности в 0,80...0,82.

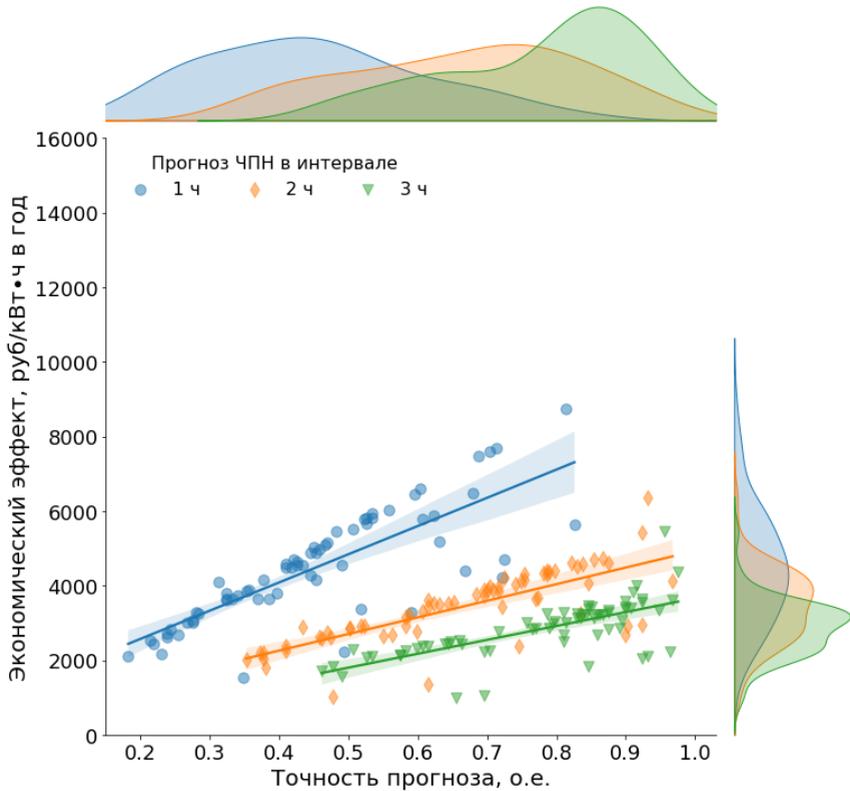


**Рис. 2.** Скрипичные диаграммы точности прогнозирования ЧПН в одно- и трехчасовом интервале (на диаграмме указаны медианные значения)

**Fig. 2.** Violin plots of peak load hours forecasting accuracy in one- and three-hour intervals (median values are indicated on the chart)

Прогнозирование интервалов наиболее вероятных часов ЧПН позволяет существенно повысить точность прогнозной модели. Однако при ограниченных возможностях снижения электропотребления, например, при использовании СНЭЭ ограниченной энергоемкости, объемы снижения электрической нагрузки должны делиться между прогнозными часами предполагаемых пиковых нагрузок, что может снизить экономический эффект управления электропотреблением. На рис. 3 показаны результаты расчета годового экономического эффекта (по тарифам 2022 г. – 3 ЦК, класс напряжения СН-2, максимальная мощность энергопринимающих установок потребителя менее 670 кВт) при использовании разных интервалов прогнозирования, полученные для 67 субъектов РФ.

Как следует из рис. 3, точность прогнозирования ЧПН в значительной степени определяет величину экономического эффекта от управления электропотреблением (коэффициент корреляции составляет 0,8). Наибольшая величина экономического эффекта соответствует использованию одночасовых прогнозов ЧПН, а расширение прогнозного интервала снижает экономический эффект в среднем на 23,1 и 36,5 % соответственно при использовании двух- и трехчасовых интервалов прогнозирования.



**Рис. 3. Зависимость годового экономического эффекта управления электропотреблением от точности прогноза ЧПН (каждая точка показывает экономический эффект за 2022 г. для отдельного субъекта РФ)**

**Fig. 3. Dependence of the annual economic effect of power consumption management on the accuracy of the peak load hours forecast (each point shows the economic effect for 2022 for a subject of the Russian Federation)**

Ценовая категория (3-я или 4-я), класс напряжения и максимальная мощность энергопринимающих установок потребителя практически не оказывают влияние на величину экономического эффекта в связи с тем, что основной доход от управления электропотреблением достигается за счет сокращения затрат на покупку «генераторной» мощности (тарифная ставка одинакова при любом классе напряжения и мощности), а разность стоимости электроэнергии в ЧПН и наиболее «дешевый» час оказывается несущественной.

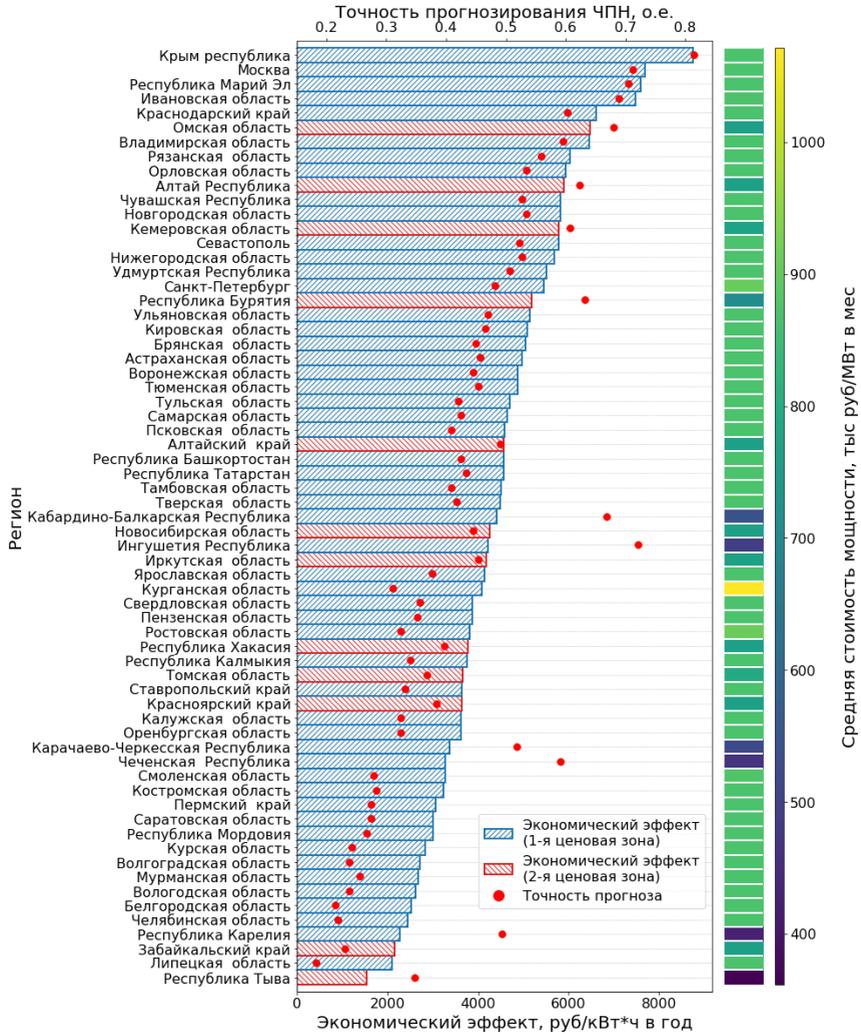
Повышение точности прогнозирования ЧПН до 100 % увеличивает экономический эффект в среднем в 2 раза. Путем варьирования точности прогнозирования ЧПН от 0 до 100 % для каждого рассматриваемого региона, получен усредненный прирост экономического эффекта при увеличении точности прогнозирования ЧПН в  $97,92 \pm 15,84$  руб/кВт·ч в год на 1 %.

#### **V. Обсуждение**

Полученные в предыдущем разделе результаты могут быть использованы для предварительной технико-экономической оценки мероприятий по снижению электропотребления в ЧПН. В частности, эффективным средством управления электропотреблением может являться СНЭЭ, разряд которого целесообразно производить в прогнозируемые часы наступления ЧПН. По данным *NREL* [11], среднемировой уровень цен на СНЭЭ составляет порядка 283 \$/кВт·ч. Однако в условиях РФ, в связи с рядом логистических трудностей и недостаточным опытом внедрения подобных устройств, такие проекты могут оказаться существенно дороже, в частности стоимость СНЭЭ может достигать до 2000 \$/кВт·ч.

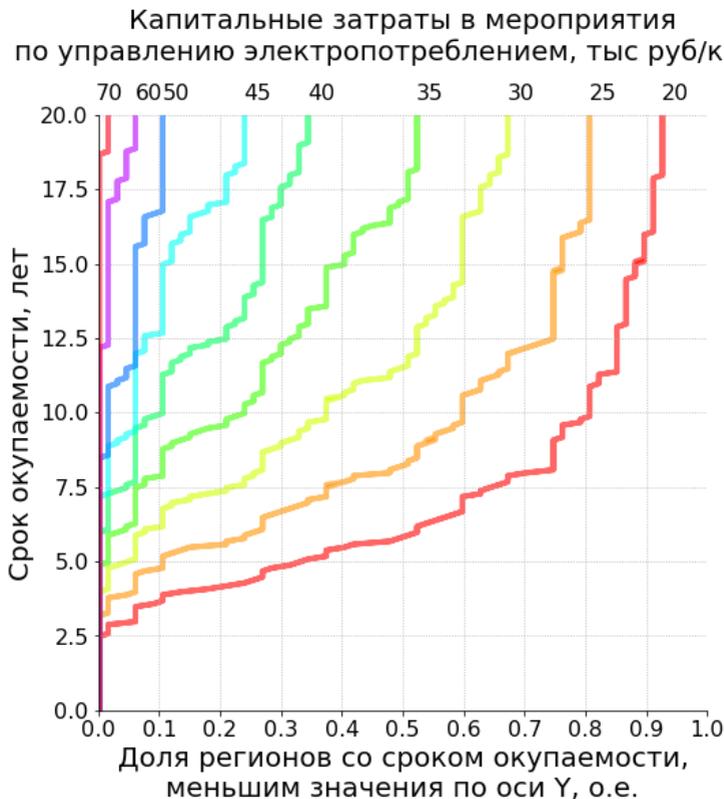
На рис. 4 представлена диаграмма годового удельного экономического эффекта снижения электропотребления в ЧПН по субъектам РФ за 2022 г. при использовании 3 ЦК и одночасовых интервалов прогнозирования. Наибольший экономический эффект за 2022 г. был получен для Республики Крым, Москвы и Марий Эл, а наименьший – для Липецкой области, Забайкальского края и Республики Тыва. Величина экономического эффекта в значительной степени коррелирует с точностью прогнозирования ЧПН, однако, для ряда регионов были получены достаточно малые величины эффекта при высокой точности прогнозирования, что объясняется малой стоимостью «генераторной» мощности в данных регионах.

На рис. 5 приведено семейство графиков выборочной функции распределения сроков окупаемости СНЭЭ по регионам РФ при изменении капитальных затрат от 266 до 933 \$/кВт·ч (от 20 до 70 тыс. руб/кВт·ч). Расчет выполнен при ставке дисконтирования в 12,5 % и с допущением, что величина экономического дохода неизменна и равна расчетным значениям для 2022 г. при точности прогнозирования, характерной для использования в качестве прогноза наиболее частого пикового часа соответствующего месяца прошлого года. При этом принято допущение, что точность прогнозирования и тарифы на электрическую энергию и мощность остаются неизменными.



**Рис. 4. Диаграмма экономического эффекта при снижении электропотребления в ЧПН и точности прогнозирования по регионам РФ**

**Fig. 4. Economic effect diagram for power consumption management in peak load hours and forecasting accuracy by regions of the Russian Federation**



**Рис. 5. Графики дисконтированных сроков окупаемости**

**Fig. 5. Discounted payback charts**

Как следует из рис. 5, сроки окупаемости достаточно существенно варьируются по субъектам РФ (в среднем размах составляет более 20 лет). Срок окупаемости в 5 лет достигается в 50 % регионов при величине капитальных затрат в 18 тыс. руб/кВт•ч, а срок окупаемости в 7,5 года – при 23,5 тыс. руб/кВт•ч.

## VI. Заключение

Рассмотрено применение наивных методов прогнозирования ЧПН на примере 67 субъектов Российской Федерации. Установлено, что точность прогнозирования ЧПН достигает в среднем 0,45. Лучшие результаты показал метод прогнозирования на основе определения наиболее частого ЧПН соответствующего месяца прошлого года.

Показано, что наиболее выгодной стратегией управления СНЭЭ является разряд в один наиболее вероятный ЧПН, что на 23,1 и 36,5 % более выгодно по сравнению с вариантами распределения разряда на два или на три наиболее вероятных ЧПН соответственно. Экономический эффект при снижении электропотребления в ЧПН с применением наивных методов прогнозирования составляет от 1546 до 8737 руб/кВт в год в зависимости от региона, а повышение точности прогнозирования на 1 % позволяет повысить эффект в среднем на 97,92 руб/кВт в год.

Несмотря на имеющийся экономический потенциал управления электропотреблением, в настоящее время в России недостаточно проработаны вопросы классификации активных потребителей, а также методы их анализа и управления.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (№ 075-03-2021 138/3).*

© Воронин В.А., 2023

© Непша Ф.С., 2023

*Поступила в редакцию 24.03.2023*

*Принята к публикации 08.06.2023*

*Received 24.03.2023*

*Accepted 08.06.2023*

### Библиографический список

- [1] Дзюба А.П., Соловьева И.А. Ценозависимое электропотребление как инструмент управления рисками неплатежей за электроэнергию промышленных предприятий // Стратегические Решения и Риск-Менеджмент. 2019. Т. 10. № 1. С. 8-19. DOI: 10.17747/2618-947X-2019-1-8-19
- [2] Соловьева И.А. Экономическая эффективность ценозависимого управления затратами на электропотребление на промышленных предприятиях // Вестник науки Сибири. 2017. № 3 (26). С. 160-173.
- [3] Дзюба А.П. Управление спросом на энергоресурсы промышленных предприятий: теория и методология: автореф. дис. док. экон. наук, ЮУрГУ, Челябинск, 2021. – 40 с.
- [4] Liang Y.-L., Guo C.-X., Li K.-J., Li M.-Y. Economic scheduling of compressed natural gas main station considering critical peak pricing // Applied Energy. 2021. Vol. 292. 116937. DOI: 10.1016/j.apenergy.2021.116937
- [5] Jin X., Zheng S., Huang G., Lai A.C.K. Energy and economic performance of the heat pump integrated with latent heat thermal energy storage for peak demand shifting // Applied Thermal Engineering. 2023. Vol. 218. 119337. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2022.119337

- [6] Zhang X., Qin C., Loth E., Xu Y., Zhou X., Chen H. Arbitrage analysis for different energy storage technologies and strategies // *Energy Reports*. 2021. Vol. 7. P. 8198-8206. DOI: 10.1016/j.egy.2021.09.009
- [7] Mustafa M.B., Keatley P., Huang Y., Agbonaye O., Ademulegun O.O., Hewitt N. Evaluation of a battery energy storage system in hospitals for arbitrage and ancillary services // *Journal of Energy Storage*. 2021. Vol. 43. 103183. DOI: 10.1016/j.est.2021.103183
- [8] Campana P.E., Cioccolanti L., François B., Jurasz J., Zhang Y., Varini M., Stridh B., Yan J. Li-ion batteries for peak shaving, price arbitrage, and photovoltaic self-consumption in commercial buildings: A Monte Carlo analysis // *Energy Conversion and Management*. 2021. Vol. 234. 113889. DOI: 10.1016/j.enconman.2021.113889
- [9] Voronin V., Nepsha F., Krasilnikov M. Short term forecasting peak load hours of regional power systems using machine learning methods // *CIGRE Science and Engineering*. 2023. No. 29. P. 1-18.
- [10] Maryasin O.Yu., Lukashov A.I. Analyzing and forecasting peak load hours // *proc. 2021 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*, May 17-21, 2021, Sochi, Russia: IEEE, 2021. P. 25-30. DOI: 10.1109/ICIEAM51226.2021.9446369
- [11] Cole W., Frazier A., Augustine C. Cost projections for utility-scale battery storage: 2021 update. Technical Report NREL/TP-6A20-79236. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory, 2021. – 21 p. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.nrel.gov/docs/fy21osti/79236.pdf> (дата обращения 12.02.2023).

### References

- [1] A.P. Dzyuba and I.A. Solovieva, “Cost-dependent electric consumption as a tool of risk management of non-payment for electric energy of industrial enterprises”, *Strategic Decisions and Risk Management*, vol. 10, no. 1, pp. 8-19, 2019. DOI: 10.17747/2618-947X-2019-1-8-19
- [2] I.A. Solovyeva, “Economic efficiency of price demand management of energy consumption at industrial enterprises”, *Siberian Journal of Science*, vol. 3, no. 26, pp. 160-173, 2017.
- [3] A.P. Dzyuba, “*Upravlenie sprosom na energoresursy promyshlennykh predpriyatiy: teoriya i metodologiya [Energy demand management of industrial enterprises: theory and methodology]*”, Doct. of Tech. S. thesis, South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia, 2021 (in Russian).
- [4] Y.-L. Liang, C.-X. Guo, K.-J. Li, M.-Y. Li, “Economic scheduling of compressed natural gas main station considering critical peak pricing”, *Applied Energy*, vol. 292, 116937, June 2021. DOI: 10.1016/j.apenergy.2021.116937
- [5] X. Jin, S. Zheng, G. Huang, A. CK Lai, “Energy and economic performance of the heat pump integrated with latent heat thermal energy storage for peak demand shifting”, *Applied Thermal Engineering*, vol. 218, 119337, Jan. 2023. DOI: 10.1016/j.apthermaleng.2022.119337
- [6] X. Zhang, C. Qin, E. Loth, Y. Xu, X. Zhou and H. Chen, “Arbitrage analysis for different energy storage technologies and strategies”, *Energy Reports*, vol. 7, pp. 8198-8206, Nov. 2021. DOI: 10.1016/j.egy.2021.09.009

- [7] M.B. Mustafa, P. Keatley, Y. Huang, O. Agbonaye, O.O. Ademulegun and N. Hewitt, "Evaluation of a battery energy storage system in hospitals for arbitrage and ancillary services", *Journal of Energy Storage*, vol. 43, 103183, Nov. 2021. DOI: 10.1016/j.est.2021.103183
- [8] P.E. Campana, L. Cioccolanti, B. François, J. Jurasz, Y. Zhang, M. Varini, B. Stridh and J. Yan, "Li-ion batteries for peak shaving, price arbitrage, and photovoltaic self-consumption in commercial buildings: A Monte Carlo analysis", *Energy Conversion and Management*, vol. 234, 113889, Apr. 2021. DOI: 10.1016/j.enconman.2021.113889
- [9] V. Voronin, F. Nepsha and M. Krasilnikov, "Short term forecasting peak load hours of regional power systems using machine learning methods", *CIGRE Science and Engineering*, no. 29, pp. 1-18, Jun. 2023.
- [10] O.Yu. Maryasin and A.I. Lukashov, "Analyzing and Forecasting Peak Load Hours", in proc. *2021 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*, May 17-21, 2021, Sochi, Russia, pp. 25-30. DOI: 10.1109/ICIEAM51226.2021.9446369
- [11] W. Cole, A. Frazier and C. Augustine, "Cost projections for utility-scale battery storage: 2021 update", National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, USA, Tech. Rep. NREL/TP-6A20-79236, 2021. [Online]. Available at: <https://www.nrel.gov/docs/fy21osti/79236.pdf> [Accessed: Feb. 12, 2023]

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Воронин Вячеслав Андреевич**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник Кузбасского государственного технического университета им. Т.Ф. Горбачева, г. Кемерово, Российская Федерация

**Vyacheslav A. Voronin**, Cand. Sci. (Eng.), senior researcher of the T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russian Federation

**Непша Федор Сергеевич**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник Кузбасского государственного технического университета им. Т.Ф. Горбачева, г. Кемерово, Российская Федерация; ведущий специалист ООО «РТСофт-Смарт Грид», г. Москва, Российская Федерация

**Fedor S. Nepsha**, Cand. Sci. (Eng.), senior researcher of the T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russian Federation; leading specialist LLC «RTSoft-Smart Grid», Moscow, Russian Federation

УДК 621.332:621.316.5

DOI 10.46960/2658-6754\_2023\_3\_125

## АПВ В СИСТЕМЕ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ВАРИАНТАХ ИСПОЛНЕНИЯ ПОСТА СЕКЦИОНИРОВАНИЯ

**И.П. Карпов**

ORCID: 0000-0001-9520-7546 e-mail: ech2\_karpovip@grw.ru

Филиал ОАО «РЖД» Трансэнерго Горьковская дирекция по энергообеспечению  
Дорожная электротехническая лаборатория  
*Нижний Новгород, Россия*

Автоматическое повторное включение (АПВ) выключателей питающих линий контактной сети является основным элементом автоматизации электроснабжения электроподвижного состава железной дороги и обеспечивает восстановление питания потребителей без участия человека. В большинстве случаев время АПВ находится в интервале 4-7 с и выполняется независимо от состояния тяговой сети в послеаварийном режиме, т.е. без контроля короткого замыкания (КЗ). При таком виде АПВ возможны включения на большой ток КЗ, что может приводить к дальнейшему развитию повреждения. На основе большого практического опыта разработки, исследований, внедрения и эксплуатационной проверки устройств контроля КЗ на Горьковской железной дороге предложены новые варианты АПВ. Рассматриваются варианты адаптивного АПВ (с контролем КЗ) на участках с постами секционирования на выключателях и разъединителях. Предложен алгоритм АПВ, учитывающий функцию контроля КЗ и формулы для расчета времени АПВ с учетом различных влияющих факторов.

**Ключевые слова:** автоматическое повторное включение, контроль короткого замыкания, переменный ток, пост секционирования, система тягового электроснабжения.

**Для цитирования:** Карпов И.П. АПВ в системе тягового электроснабжения переменного тока при различных вариантах исполнения поста секционирования // Интеллектуальная Электротехника. 2023. № 3. С. 125-132.  
DOI: 10.46960/2658-6754\_2023\_3\_125

## AUTOMATIC RECLOSING IN AC TRACTION POWER SUPPLY SYSTEM WITH VARIOS VERSIONS OF SECTIONING POST

**I.P. Karpov**

ORCID: 0000-0001-9520-7546 e-mail: ech2\_karpovip@grw.ru

Branch of JSC «Russian Railways» Transenergo Gorky directorate for energy supply  
Railway electrotechnical laboratory  
*Nizhny Novgorod, Russia*

**Abstract.** Automatic reclosure (AR) of contact network supply line switches is the main element of automation of power supply of railway electric rolling stock and ensures restoration of power to consumers without human. In most cases, the AR time is in the range of 4-7 s and is performed regardless of the state of the traction network in post-emergency mode, i.e. without short circuit monitoring. This type of AR makes it possible to switch on a high short circuit current, which can lead to further damage propagation. The article proposes new options for AR, which were obtained using extensive practical experience in the development, research, implementation and operational testing of short-circuit monitoring devices on the Gorky Railway. Options for adaptive AR (with short-circuit monitoring) were considered in areas with sectioning posts on switches and disconnectors. A new AR algorithm is proposed that takes into account the short circuit control function and equations for AR time calculating taking into account various influencing factors.

**Keywords:** alternating current, automatic reclosing, sectioning post, short circuit monitoring, traction power supply system.

**For citation:** I.P. Karpov, “Automatic reclosing in AC traction power supply system with various versions of sectioning post”, *Smart Electrical Engineering*, no. 3, pp. 125-132, 2023. DOI: 10.46960/2658-6754\_2023\_3\_125

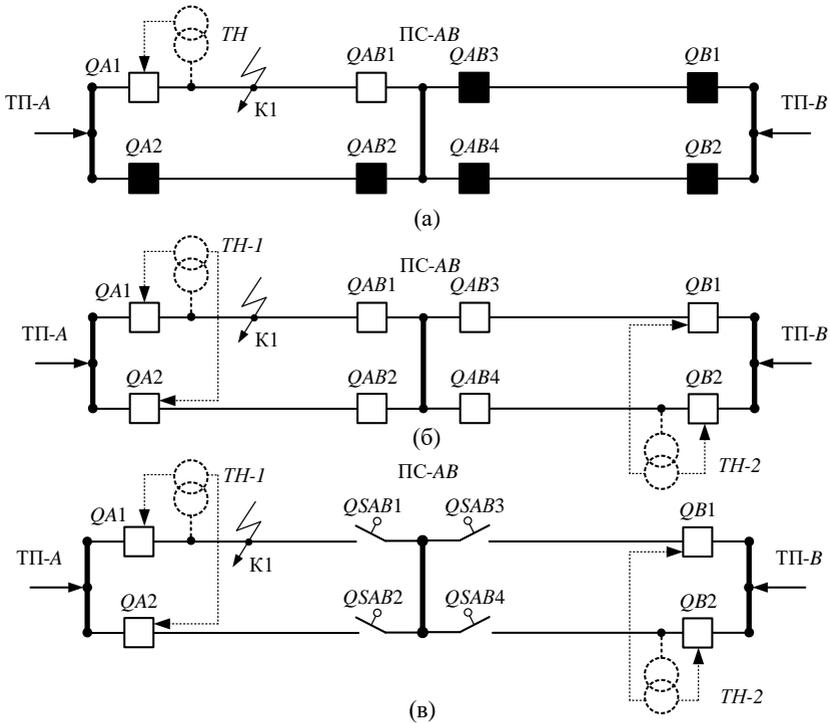
## I. Введение

На отечественных электрифицированных железных дорогах применяются три варианта исполнения постов секционирования (ПС) двухпутного участка контактной сети переменного тока.

1. ПС на выключателях с индивидуальными защитами (рис. 1, а) является типовым [1]. При КЗ отключается четверть зоны (QA1 и QAB1), далее, при успешном автоматическом повторном включении (АПВ) выключателя питающей линии на тяговой подстанции (QA1) электроснабжение полностью восстанавливается. Выключатель на ПС (QAB1) включает энергодиспетчер, при неуспешном АПВ энергодиспетчер действует по регламенту.

2. ПС на выключателях с групповой потенциальной защитой (рис. 1, б): на данный вариант работы переводят ПС, оснащенные масляными выключателями при внедрении безлюдной технологии обслуживания, поскольку объем профилактических работ в этом случае гораздо меньше (выключатель ПС не отключает токи КЗ). При КЗ отключается вся зона (QA1, QA2 и QB1, QB2), в бестоковую паузу выключатели ПС отключаются от действия защиты минимального напряжения. После АПВ выключателей питающих линий энергодиспетчер включает выключатели ПС и восстанавливает нормальное электроснабжение, при неуспешном АПВ он действует согласно регламенту (выделяет зону с повреждением).

3. ПС на разъединителях (рис. 1, в) применяется на Горьковской и некоторых других железных дорогах [2]. В последние годы такие проекты ПС развиваются и модернизируются [3], по принципу действия является аналогом варианта ПС на выключателях с групповой потенциальной защитой.



**Рис. 1. Варианты исполнения ПС:**  
 на выключателях с индивидуальными защитами (а); на выключателях  
 с групповой потенциальной защитой (б); на разъединителях (в)

**Fig. 1. Sectioning posts options:**  
 on switches with individual protections (a); on switches  
 with group potential protection (b); on disconnectors (v)

Каждый вариант имеет свои достоинства и недостатки, рассмотрение которых не входит в задачи настоящей работы, цель которой – анализ времени АПВ и автоматики в целом.

Согласно действующим нормативным документам [4], время АПВ составляет порядка 4-7 с и выбирается независимо от состояния тяговой сети в послеаварийном режиме, т.е. применяется т.н. «слепое» АПВ. В данном случае возможны (и регулярно случаются) повторные включения с током КЗ [5], которые могут приводить к дальнейшему развитию повреждения, например к пережогу контактного провода или несущего троса, что недопустимо.

В то же время в течение последних 10-15 лет на полигоне Горьковской железной дороги успешно внедрены методы [6, 7] определения устойчивых коротких замыканий, основанные на анализе остаточного и наведенного напряжения в отключенной контактной сети. Очевидно, что необходимо рассмотреть возможность внедрения адаптивного АПВ, время которого будет зависеть от многих факторов. Расчет уставок времени подобного АПВ будет представлен ниже.

## II. Время АПВ

Выдержка времени АПВ по нормативным документам:

$$t_{\text{АПВ}} = t_{\text{КЗ}} + t_{\text{ЗАП}}, \quad (1)$$

где  $t_{\text{КЗ}}$  – наибольшая длительность устойчивого короткого замыкания, возникающего при заезде электроподвижного состава (ЭПС) с поднятым токоприемником на заземленную секцию контактной сети (например, при проходе изолирующего сопряжения), диапазон значений от 3,0 до 5,0 с;  $t_{\text{ЗАП}}$  – время запаса, значение принимается 2,0 с.

Гарантировать отсутствие устойчивого КЗ можно только путем контроля остаточного или наведенного напряжения в обесточенной контактной сети после аварийного отключения выключателя, что и применяется на Горьковской железной дороге. Источником остаточного и наведенного напряжения является электроподвижной состав. После аварийного отключения электровозы прежних серий (например, ВЛ-80С) генерируют напряжение от асинхронной машины – фазорасщепителя, современные электровозы (например, 2ЭС5К, 3ЭС5К) от асинхронных вспомогательных машин собственных нужд [8, 9]. Для этих целей устанавливается дополнительный трансформатор напряжения, подключенный непосредственно к контактной сети, управляющий АПВ своего и смежного выключателя питающей линии контактной сети (пунктир на рис. 1 а, б, в). В этом случае применяется АПВ с контролем КЗ, и время повторного включения можно рассчитать иначе. Для варианта 1 (рис. 1, а), время АПВ будет зависеть от оснащенности выключателя отдельным ТН.

При наличии ТН и отсутствии устойчивого КЗ время АПВ необходимо обеспечить сохранение схемы диодного ЭПС старого образца (ВЛ80С) [10] в исходном состоянии:

$$t_{\text{АПВ}} = t_{\text{ЭПС}} - t_{\text{ОТС}}, \quad (2)$$

где  $t_{\text{ЭПС}}$  – время, в течении которого не разбирается силовая схема диодных ЭПС (согласно [11] 0,5-0,7 с);  $t_{\text{ОТС}}$  – время отстройки, принять 0,1-0,2 с.

Отметим, что при обращении ЭПС нового образца с выпрямительно-инверторным преобразователем (ВИП) даже при кратковременном исчезно-

вении напряжения в контактной сети (0,2-0,3 с) система управления тиристорами теряет синхронизацию с сетью [8], в итоге – такое время АПВ не имеет смысла. Для сохранения тягового режима ЭПС при кратковременных исчезновениях напряжения в контактной сети необходима модернизация схем электровоза. Поэтому при преимущественном обращении ЭПС с ВИП время АПВ может быть выбрано согласно действующим нормативным документам, используя (1).

При наличии устойчивого КЗ АПВ должно быть запрещено. В случае отсутствия контроля устойчивого КЗ, время АПВ выбирается согласно действующим нормативным документам. Для варианта 2 и 3 (рис. 1, б, в) нужно вводить две уставки АПВ, в зависимости от наличия или отсутствия устойчивого КЗ. При отсутствии устойчивого КЗ, для удобства эксплуатации и уменьшения времени на восстановление нормальной схемы электроснабжения, ПС не должен отключаться в бестоковую паузу, тогда:

$$t_{\text{АПВ1}} = t_{\text{ЗМН}} - \Delta t, \quad (3)$$

где  $t_{\text{ЗМН}}$  – выдержка времени групповой потенциальной защиты;  $\Delta t$  – ступень отстройки:

$$\Delta t = t_U + t_{\text{СОБСТ}} + t_{\text{ЗАП}}, \quad (4)$$

где  $t_U$  – время на анализ напряжения в отключенной контактной сети. Согласно [11] контроль устойчивого КЗ длится до 1 с, принимается  $t_U = 1$  с;  $t_{\text{СОБСТ}}$  – собственное время на включение выключателя и время работы устройств автоматики, принимается  $t_{\text{СОБСТ}} = 0,1$  с;  $t_{\text{ЗАП}} = 0,5$  с.

При наличии устойчивого КЗ время АПВ нужно обеспечить отключение ПС, чтобы АПВ трех выключателей (QA2, QB1, QB2 на рис. 1, б, в) из четырех было успешным. Для варианта 2 (ПС на выключателях, рис. 1, б):

$$t_{\text{АПВ2}} = t_{\text{ЗМН}} + \Delta t_2, \quad (5)$$

где  $\Delta t_2$  – ступень отстройки для ПС на выключателях (с групповой защитой), принимается  $\Delta t_2 = 1$  с.

Для варианта 3 (ПС на разъединителях, рис. 1, в):

$$t_{\text{АПВ2}} = t_{\text{ЗМН}} + \Delta t_3, \quad (6)$$

где  $\Delta t_3$  – ступень отстройки для ПС на разъединителях, принять  $\Delta t_3 = 2$  с, поскольку собственное время отключения разъединителя с моторным приводом может достигать 1,5-2 с.

При отсутствии контроля остаточного и наведенного напряжения, ПС должен отключаться в бестоковую паузу, тогда:

$$t_{\text{АПВ}} = t_{\text{ЗМН}} + \Delta t_{2/3}, \quad (7)$$

где  $\Delta t_{2/3}$  – для варианта 2 выбирается  $\Delta t_2 = 1$  с, для варианта 3 выбирается  $\Delta t_3 = 2$  с.

Для варианта 1 АПВ с контролем КЗ возможно при установке отдельного ТН на каждом выключателе обеих смежных тяговых подстанций (QA1, QA2 и QB1, QB2 на рис. 1, а).

Для вариантов 2 и 3 АПВ с контролем КЗ возможно при установке отдельного ТН на обеих смежных тяговых подстанциях хотя бы на одном выключателе (ТН-1 и ТН-2 на рис. 1, б, в), с воздействием на автоматику смежного присоединения (QA2 и QB1).

Все возможные варианты уставки времени АПВ сведены в табл. 1.

**Таблица 1.**  
Время АПВ при различных вариантах исполнения ПС

**Table 1.**  
AR time for different options of substations

Вариант исполнения ПС	Контроль устойчивого КЗ		
	Есть		Нет
	Наличие устойчивого КЗ		
	Да	Нет	$t_{АПВ}$
$t_{АПВ}$	$t_{АПВ}$		
1. ПС на выключателях с индивидуальными защитами	запрет	$t_{АПВ} = t_{ЭПС} - t_{отс}$ или $t_{АПВ} = t_{кз} + t_{зап}$	$t_{АПВ} = t_{кз} + t_{зап}$
2. ПС на выключателях с групповой защитой	$t_{АПВ2} = t_{ЗМН} + \Delta t_2$ или запрет	$t_{АПВ1} = t_{ЗМН} - \Delta t$	$t_{АПВ} = t_{ЗМН} + \Delta t_2$
3. ПС на разъединителях (с групповой защитой)	$t_{АПВ2} = t_{ЗМН} + \Delta t_3$ или запрет	$t_{АПВ1} = t_{ЗМН} - \Delta t$	$t_{АПВ} = t_{ЗМН} + \Delta t_3$

### III. Выводы

Рассмотрена автоматика работы системы тягового электроснабжения переменного тока в послеаварийный период при различных вариантах исполнения постов секционирования. Продемонстрирована необходимость перехода от «слепого» АПВ к АПВ с контролем КЗ, при котором возможны как запрет, так и разрешение повторного включения.

Показана необходимость изменения подхода к выбору времени АПВ при наличии функции контроля короткого замыкания. Предложен новый гибкий алгоритм АПВ, основанный на диагностике состояния отключенной тяговой сети, при котором время АПВ зависит от типа поста секционирования на межподстанционной зоне, от типа обращаемого ЭПС. Предложены формулы для расчета времени АПВ.

Поступила в редакцию 06.04.2023

Принята к публикации 19.04.2023

Received 06.04.2023

Accepted 19.04.2023

### Библиографический список

- [1] СП 224.132600.2014. Тяговое электроснабжение железной дороги. Введ. 2014-12-01. – 86 с.
- [2] Марквардт К.Г. Справочник по электроснабжению железных дорог. Т. II. М.: «Транспорт», 1980. – 392 с.
- [3] Куркин С.В., Плаксин В.А. Организация защиты участков с постом секционирования на разъединителях и выключателем в шине // *Наукосфера*. 2022. №8(1). С. 226-229.
- [4] СТО РЖД 07.021.2-2015. Защита систем электроснабжения железной дороги от коротких замыканий и перегрузки. Часть 2. Методика выбора алгоритмов действия, уставок блокировок и выдержек времени автоматики в системе тягового электроснабжения. М.: ООО «Техинформ», 2019. – 304 с.
- [5] Фигурнов Е.П. Релейная защита. Ч. 2. М.: ФГБУ ДПО «УМЦ ЖДТ», 2009. – 591с.
- [6] Герман Л.А., Попов А.Ю., Саморуков А.В., Ишкин Д.В., Якунин Д.В., Субханвердиев К.С. Новый алгоритм автоматизации электроснабжения тяговой сети переменного тока с постом секционирования на выключателях // *Вестник ВНИИЖТ*. 2017. Т. 76. № 5. С. 266-272.  
DOI: 10.21780/2223-9731-2017-76-5-266-272
- [7] Герман Л.А., Субханвердиев К.С., Карпов И.П. Способ управления автоматическим повторным включением выключателя подстанции контактной сети переменного тока двухпутного участка, Пат. 2744492 RU, заявл. 28.07.20; опубл. 10.03.21. – Бюл. № 7.
- [8] Малютин А.Ю. Применение маловентильных преобразователей в системе питания вспомогательных цепей электровозов переменного тока: автореф. дис. канд. техн. наук, МГУПС (МИИТ), Москва, 2017. – 24 с
- [9] Малютин А.Ю. Состояние вопроса о вспомогательных машинах отечественных электровозов переменного тока // *Электроника и Электрооборудование Транспорта*. 2016. № 6. С. 24-28.
- [10] Руководство по эксплуатации. Электровоз ВЛ80С. М.: Транспорт, 1982. – 622 с.
- [11] Герман Л.А., Субханвердиев К.С., Герман В.Л. Автоматизация электроснабжения тяговой сети переменного тока. М.: ФГБУ ДПО «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2022. – 264 с.

### References

- [1] Traction power supply of the railway, SP 224.132600.2014, Jan. 2014.
- [2] K.G. Markvardt, *Spravochnik po Elektrosnabzheniyu Zheleznykh Dorog [Handbook of Railway Power Supply]*. Vol. 2. Moscow: Transport, 1980 (in Russian).
- [3] S.V. Kurkin and V.A. Plaksin, “Organization of protection of sections with a sectioning post on disconnectors and a switch in the bus”, *Naukosfera*, no. 8(1), pp. 226-229, 2022.

- [4] Protection of railway power supply systems from short circuits and overload. Part 2. Methodology for selecting action algorithms, blocking settings and automation time delays in a traction power supply system, STO RZD 07.021.2-2015, 2019.
- [5] E.P. Figurnov, *Releynaya zashchita [Relay protection]*. Part 2. Moscow: FSBE APE «EICRT», 2009 (in Russian).
- [6] L.A. German, A.Yu. Popov, A.V. Samorukov, D.V. Ishkin, D.V. Yakunin and K.S. Subkhanverdiev, “A new algorithm for automating power supply of an ac traction network with a sectioning points on switches”, *Russian Railway Science Journal*, vol. 76, no. 5, pp. 266-272, 2017. DOI: 10.21780/2223-9731-2017-76-5-266-272
- [7] L.A. German, K.S. Subkhanverdiev and I.P. Karpov, “*Sposob upravleniya avtomaticheskim povtornym vklyucheniem vyklyuchatelya podstancii kontaktnoj seti peremennogo toka dvuhputnogo uchastka [The method of controlling the automatic reclosing of the switch of the substation of the AC contact network of the double-track section]*”, Patent RU 2744492, Mar. 10, 2021 (in Russian).
- [8] A.Yu. Malyutin, “*Primenenie malovoltnykh preobrazovateley v sisteme pitaniya vspotogatel'nykh tsepey elektrovozov peremennogo toka [The use of low-voltage converters in the power supply system of auxiliary circuits of AC electric locomotives]*”, Cand. of Tech. S. thesis, МИИТ, Moscow, Russia, 2017 (in Russian).
- [9] A.Yu. Malyutin, “*Situation with auxiliary motors on russian alternating current electric locomotives*”, *Electronics and Electrical Equipment of Transport*, no. 6, pp. 24-28, 2016.
- [10] *Rukovodstvo po ekspluatatsii. Elektrovoz VL80S. [Operation manual. Electric locomotive VL80S]*. Moscow: Transport, 1982 (in Russian).
- [11] L.A. German, K.S. Subkhanverdiev and V.L. German, *Avtomatizatsiya elektrosnabzheniya tyagovoy seti peremennogo toka [Automation of power supply of AC traction network]*. Moscow: FGBU DPO “Educational Center for Education in Railway Transport”, 2022 (in Russian).

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

**Карпов Иван Петрович**, старший электромеханик Дорожной электротехнической лаборатории Горьковской ДЭО Трансэнерго ОАО «РЖД», г. Нижний Новгород, Российская Федерация

**Ivan P. Karpov**, senior electrical engineer of the Railway electrotechnical laboratory of the Gorky Directorate for Energy Supply – a structural subdivision of Transenergo – a branch of the JSCo «RZD», Nizhny Novgorod, Russian Federation

---

**ХРОНИКА**

---

**ТИТОВУ ВЛАДИМИРУ ГЕОРГИЕВИЧУ – 80 лет**

12 сентября 2023 г. отметил юбилей Владимир Георгиевич Титов, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, действительный член Академии инженерных наук им. А.М. Прохорова, Почетный работник высшей школы, член редакционной коллегии журнала «Интеллектуальная электротехника».

В 1965 г. Владимир Георгиевич, выпускник Горьковского Политехнического института им. А.А. Жданова (ныне Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева – НГТУ) начал свою трудовую деятельность на Горьковском заводе фрезерных станков, где работал инженером-конструктором по проектированию продольно-фрезерных станков. В феврале 1967 г. переведен на работу в Горьковский Политехнический институт им. А.А. Жданова на должность инженера НИЧ. В 1967-1970 гг. Титов В.Г. – аспирант очного обучения кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок». В декабре 1970 г. он

защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. С 1971 г. В.Г. Титов работает ассистентом, старшим преподавателем, доцентом и по настоящее время – профессором кафедры «Электрооборудование, электропривод и автоматика». В 1991 г. он защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук, а в 1993 г. ему присвоено ученое звание профессора. С 1992 по 2013 г. – Титов В.Г. заведующий кафедрой «Электрооборудование судов».

В.Г. Титов ведет активную научно-исследовательскую работу по направлению «Машинно-вентильные системы переменного тока». В течение многих лет он был ответственным исполнителем хоздоговоров с головным предприятием по судовой полупроводниковой технике НИИ завода «Электровыпрямитель». В это же время В.Г. Титов являлся членом рабочей группы Госкомитета по науке и технике при Совете министров СССР, а также членом, заместителем председателя и председателем межведомственных комиссий по приемке серий нагружающих устройств.

В.Г. Титов на протяжении многих лет активно занимается подготовкой научно-педагогических кадров для НГТУ и предприятий Нижегородской области. Более 30 лет он являлся членом, а с 2013 г. – председателем диссертационного совета Д212.165.02 при НГТУ им. Р.Е.Алексеева. В.Г.Титов – автор более 200 научных работ, в том числе – 19 патентов и 8 монографий.

*Коллектив Образовательно-научного института электроэнергетики  
НГТУ и редакция журнала «Интеллектуальная электротехника»  
поздравляют Владимира Георгиевича,  
желают ему крепкого здоровья и творческих успехов!*

**ХВАТОВУ ОЛЕГУ СТАНИСЛАВОВИЧУ – 60 лет**

2 сентября 2023 г. отметил юбилей Олег Станиславович Хватов, доктор технических наук, профессор, член редакционной коллегии журнала «Интеллектуальная электротехника».

В 1985 г. Олег Станиславович, выпускник Горьковского Политехнического института им. А.А. Жданова (ныне Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева – НГТУ) начал трудовую деятельность в Горьковском институте инженеров водного транспорта на кафедре «Электротехника и электрооборудование объектов водного транспорта», где прошел путь от инженера до заведующего кафедрой.

В 1990 г. защитил кандидатскую диссертацию на тему «Электрические нагружающие устройства на основе машины двойного питания», а в 2001 г. – докторскую диссертацию на тему «Электротехнические комплексы генерирования электрической энергии на основе машины двойного питания». В 2004 г. ему присвоено звание профессора.

С 2004 г. О.С. Хватов по совместительству работает на кафедре «Электрооборудование, электропривод и автоматика» Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева в должности профессора.

О.С. Хватов – известный в России ученый, внесший значительный вклад в развитие научного направления «Генераторные комплексы переменной частоты вращения», автор более 250 научных публикаций, в том числе – 4 монографий, 28 документов авторского права (патентов на изобретения и на полезные модели).

Олег Станиславович много сил отдает подготовке научно-педагогических кадров высшей квалификации. Он является членом диссертационного совета Д212.165.02 по защите докторских и кандидатских диссертаций по специальности 2.4.2 «Электротехнические комплексы и системы» при Нижегородском государственном техническом университете им. Р.Е. Алексеева, под его научным руководством защищены 7 кандидатских диссертаций и 1 докторская диссертация.

О.С. Хватов – член редколлегии журналов «Интеллектуальная электротехника», «Научные проблемы водного транспорта» (г. Нижний Новгород) и «Речной транспорт (XXI век)» (г. Москва).

За заслуги в области образовательной и научно-исследовательской деятельности О.С. Хватов награжден нагрудным знаком «200 лет транспортному образованию в России», медалью «100 лет подводным силам России», почетным дипломом губернатора Нижегородской области, почетной грамотой администрации Нижнего Новгорода, а в 2022 г. он избран действительным членом Академии инженерных наук им. А.М. Прохорова.

*Коллектив образовательно-научного института электроэнергетики  
НГТУ и редакция журнала «Интеллектуальная электротехника»  
поздравляют Олега Станиславовича,  
желают ему крепкого здоровья и творческих успехов!*

## 60 ЛЕТ ТРУДОВОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ВАЛЕРИЯ ГЕННАДЬЕВИЧА ГОЛЬДШТЕЙНА



В 2023 г. отмечает юбилей трудовой деятельности Валерий Геннадьевич Гольдштейн, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Автоматизированные электроэнергетические системы» Самарского государственного технического университета (СамГТУ).

Валерий Геннадьевич поступил в СамГТУ в 1958 г. После окончания вуза, с сентября 1963 г. начал работать ассистентом кафедры «Теоретические основы электротехники» (в н.в. – кафедра «Теоретическая и общая электротехника»). С 1970 г., после окончания целевой аспирантуры в Ленинградском политехническом институте, работал ассистентом, старшим преподавателем, доцентом, профессором кафедры «Электрические системы и сети» (в н.в. – кафедра «Автоматизированные электроэнергетические системы»). Трудовой стаж Валерия Геннадьевича в СамГТУ с учетом целевой аспирантуры – 60 лет!

Работа В.Г. Гольдштейна в СамГТУ получила всероссийское и международное признание. С 2012 г. он – действительный член Академии электротехнических наук РФ, а также действительный член Международной академии наук экологии и безопасности жизнедеятельности.

В России и за ее пределами В.Г. Гольдштейн был руководителем и участником исследований по научному направлению «Электромагнитная совместимость в электрических сетях и системах электроснабжения при

мощных эксплуатационных физических воздействиях в виде перенапряжений» в части защиты от них, а также диагностики технического состояния линейного и трансформаторно-реакторного электрооборудования.

Валерием Геннадьевичем проведены исследования по важнейшим для электроэнергетики направлениям спецтематики. Его разработки и решения, защищенные авторскими свидетельствами и патентами, внедренные в промышленную электроэнергетику, в системы электроснабжения предприятий нефтегазовой и других отраслей промышленности:

- поиск и научное обоснование критериев обеспечения электромагнитной совместимости специфических элементов электрических сетей, систем электроснабжения, перспективных ЛЭП, таких, как разомкнутые и комбинированные многоцепные конструкции ВЛ, кабели с высокоэффективной, полимерной изоляцией, использованием эффекта высокотемпературной сверхпроводимости и др.;
- создание, испытание и внедрение современных технических средств для повышения надежности и энергоэффективности электротехнических комплексов и систем путем совершенствования современных систем защиты электрических сетей и электрооборудования нефтегазодобычи от перенапряжений.;
- разработка эффективных систем и средств обеспечения надежной работы систем электроснабжения современных мегаполисов: Москвы, Санкт-Петербурга, Екатеринбурга, Самары и др.;
- разработка конструкций и методов анализа статических режимов комбинированных многоцепных и разомкнутых самокомпенсирующихся воздушных линий электропередачи.

В.Г. Гольдштейн – заслуженный работник высшего профессионального образования РФ, почетный профессор СамГТУ, член ученого совета электротехнического факультета и диссертационного совета Д 212.217.04. Он автор 13 монографий, изданных в центральных и университетских издательствах (Энергоатомиздат, Электроэнергия – передача и распределение, СамГТУ), 11 авторских свидетельств и патентов, более 450 отечественных и зарубежных публикаций. Подготовил трех докторов и 25 кандидатов технических наук. В.Г. Гольдштейн член редколлегий ряда российских научно-технических журналов, в том числе, журнала «Интеллектуальная электротехника».

*Редакционная коллегия и редакция журнала  
«Интеллектуальная электротехника» поздравляют  
Валерия Геннадьевича, желают ему здоровья  
и успехов в его плодотворной деятельности!*

**MINISTRY OF SCIENCE AND HIGHER EDUCATION  
OF THE RUSSIAN FEDERATION  
NIZHNY NOVGOROD STATE TECHNICAL UNIVERSITY  
n.a. R.E. ALEKSEEV**

# **SMART ELECTRICAL ENGINEERING**

**№ 3**

**Nizhny Novgorod 2023**

*The journal is issued 4 times in year*

**Editor-in-Chief A.B. Loskutov**

**EDITORIAL STAFF**

A.B. Dar'enkov (associate Editor-in-Chief),  
E.N. Sosnina (associate Editor-in-Chief), A.V. Shalukho (executive secretary),  
V.I. Kazakova (executive editor), I.A. Lipuzhin (executive editor)

**MEMBERS OF EDITORIAL BOARD:**

Dauren Sadykovich Akhmetbaev	Doctor of technical sciences, associate professor of the S. Seifullin Kazakh Agro-Technical University (Astana, Republic of Kazakhstan)
Gennadiy Yakovlevich Vagin	Doctor of technical sciences, professor, professor NNSTU (Nizhny Novgorod, Russia)
Leonid Abramovich German	Doctor of technical sciences, professor, professor SSTU Branch in Nizhny Novgorod (Nizhny Novgorod, Russia)
Valery Gennadievich Goldstein	Doctor of technical sciences, professor, professor SSTU (Samara, Russia)
Igor Vasilevich Gulyaev	Doctor of technical sciences, professor, professor MRSU (Saransk, Russia)
Anatoly Viktorovich Kuznetsov	Doctor of technical sciences, professor, head of the chair USTU (Ulyanovsk, Russia)
Pavel Vladimirovich Ilyushin	Doctor of technical sciences, Energy Research Institute of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russia)
Alexander Leonidovich Kulikov	Doctor of technical sciences, associate professor, professor NNSTU (Nizhny Novgorod, Russia)
Viktor Nikolaevich Mescheryakov	Doctor of technical sciences, professor, head of the chair LSTU (Lipetsk, Russia)
Georgy Borisovich Onishchenko	Doctor of technical sciences, professor, scientific director LLC «STC Drive Technique» (Moscow, Russia)
Aleksandr Sergeevich Plekhov	Candidate of technical sciences, associate professor, associate professor NNSTU (Nizhny Novgorod, Russia)
Aleksandr Yur'evich Smirnov	Doctor of technical sciences, associate professor, leading design engineer JSC «Afrikantov OKBM» (Nizhny Novgorod, Russia)
Vitezslav Styskala	Dr. Ing., Ph. D., associate professor VSB – Technical University of Ostrava (Ostrava-Poruba, Czech Republic)
Vladimir Georgievich Titov	Doctor of technical sciences, professor, professor NNSTU (Nizhny Novgorod, Russia)
Oleg Stanislavovich Khvatov	Doctor of technical sciences, professor, head of the chair FFEI HE «VSUWT» (Nizhny Novgorod, Russia)
Yuriy Ivanovich Khokhlov	Doctor of technical sciences, professor, professor FSAEIHE SUSU (NRU) (Chelyabinsk, Russia)
Alexandr Ivanovich Chivenkov	Doctor of technical sciences, associate professor, professor NNSTU (Nizhny Novgorod, Russia)
Roustiam Chakirov	Dr.-Ing., Prof. Dr., professor H-BRS (Germany)

*Electronic version:*  
<http://www.ie.nntu.ru>

**ISSN 2658-6754**

*Periodic printed edition registered by Roskomadzor*  
*III № ФС77-81688 on 06 Aug., 2021*

© Nizhny Novgorod State Technical University  
n.a. R.E. Alekseev, 2023

# CONTENT

<b>ELECTROTECHNICAL COMPLEXES AND SYSTEMS</b> .....	4
<b>V.N. Meshcheryakov, A.S. Belousov, V.E. Gladyshev.</b> Comparative analysis of frequency control methods for two-phase asynchronous motor...	4
<b>D.A. Ulyanov, N.N. Vikhorev.</b> Stabilized uninterruptible power supply with hybrid delta transformer.....	23
<b>D.M. Kochegarov, A.V. Serebryakov, A.S. Steklov.</b> Technical condition quantitative assessment of solar power plant equipment.....	38
<b>V.G. Sugakov, Yu.S. Malyshev.</b> Evaluation of possibility of applying of sequence and chronocontrol principles for smart automation relays synthesis.....	51
<b>D.E. Shevtsov, D.A. Pavlyuchenko, L.I. Shevtsova, N.V. Alexandrov, E.G. Yadagaev.</b> The study of transients under controlled switching of electric motors by vacuum circuit breaker.....	66
<b>POWER INDUSTRY</b> .....	85
<b>L.A. German, K.V. Galkin.</b> Technical and economic indicators of static var generator at railway traction networks sectioning post .....	85
<b>K.V. Suslov, A.V. Kryukov, E.V. Voronina.</b> Modeling of electromagnetic fields traction networks in emergency modes.....	101
<b>V.A. Voronin, F.S. Nepsha.</b> Forecasting peak load hours of regional power systems using naive models.....	111
<b>I.P. Karpov.</b> Automatic reclosing in AC traction power supply system with various versions of sectioning post .....	125
<b>CHRONICLE</b> .....	133
Vladimir Georgievich Titov (to the 80th anniversary of birth).....	133
Oleg Stanislavovich Khvatov (to the 60th anniversary of birth).....	135
Valery Gennadievich Goldstein (to the 60th work anniversary).....	137

# ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

№ 3

Редакторы: **В.И. Казакова, И.А. Липужин**  
Технический редактор: **И.Н. Терентьева**

*Редакция:*

603155, Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24  
smart\_electric@nntu.ru

Свободная цена

Подписано в печать 19.09.2023. Дата выхода в свет: 27.09.2023

Формат 60x84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная.

Печать трафаретная. Усл. печ. л. 7,3. Тираж 100 экз. Заказ .

---

Нижегородский государственный технический университет  
им. Р.Е. Алексева. Типография НГТУ.

Адрес университета и типографии:  
603155, Нижний Новгород, ул. Минина, 24