

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Сибирский государственный индустриальный университет»
Администрация Правительства Кузбасса
Администрация г. Новокузнецка
Институт проблем управления им. Трапезникова РАН
Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН
АНО «Научно-образовательный центр «Кузбасс»**

**СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ
(в образовании, науке и производстве)
AS' 2023**

**ТРУДЫ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО–ПРАКТИЧЕСКОЙ
КОНФЕРЕНЦИИ
(с международным участием)**

12-14 декабря 2023 г.

**Новокузнецк
2023**

УДК 658.011.56
С 409

Редакционная коллегия:

д.т.н., проф. В.В. Зимин (ответственный редактор),
д.т.н., проф. С.М. Кулаков, к.т.н., доц. В.А. Кубарев,
д.т.н., проф. Л.Д. Павлова, д.т.н., доц. И.А. Рыбенко,
к.т.н., доц. В.И. Кожемяченко (технический редактор).

С 409 Системы автоматизации (в образовании, науке и производстве) AS'2023: труды Всероссийской научно–практической конференции (с международным участием), 12-14 декабря 2023 г. / Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Сибирский государственный индустриальный университет ; под общ. ред. В.В. Зимина. – Новокузнецк : Издательский центр СибГИУ, 2023. – 420 с.

ISBN 978-5-7806-0583-6

Труды конференции посвящены научным и практическим вопросам в области современных систем автоматизации и информатизации учебных, исследовательских и производственных процессов. Представлены результаты исследования, разработки и внедрения методического, математического, программного, технического и организационного обеспечения систем автоматизации и информационно-управляющих систем в различных сферах деятельности.

Сборник трудов ориентирован на широкий круг исследователей, научных работников, инженерно-технический персонал предприятий и научно-исследовательских лабораторий, преподавателей вузов, аспирантов и обучающихся по программам бакалавриата и магистратуры.

УДК 658.011.56

© Сибирский государственный
индустриальный университет, 2023

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИ ФАЗОСДВИГАЮЩЕГО ТРАНСФОРМАТОРА ZIGZAG PHASE-SHIFTING TRANSFORMER В СРЕДЕ MATLAB SIMULINK ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ 10(6)/0,4 СО СХЕМОЙ СОЕДИНЕНИЯ ОБМОТОК Y/ZH-11

Бедарев М.А., Коновалов О.В., Мамонтов Д.Н., Кипервассер М.В.

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет»
г. Новокузнецк, Россия,

mbedarev@yandex.ru, tehconsultant@mail.ru, imon90-@mail.ru, kipervasser2012@yandex.ru

Аннотация. Рассматриваются особенности адаптации модели фазосдвигающего трансформатора Zigzag Phase-Shifting Transformer в среде Matlab Simulink для последующего использования в качестве моделей силовых распределительных трансформаторов 10(6)/0,4 с группой соединения обмоток Y/Zh-11.

Ключевые слова: Matlab Simulink, Zigzag Phase-Shifting Transformer, фазосдвигающий трансформатор, группа соединения обмоток, угол сдвига фаз, модель, относительные единицы PU, именованные единицы SI.

Abstract. The features of adapting the Zigzag Phase-Shifting Transformer model in the Matlab Simulink environment for subsequent use as models of power distribution transformers 10(6)/0.4 with a winding connection group Y/Zh-11 are considered.

Keywords: Matlab Simulink, Zigzag Phase-Shifting Transformer, phase-shifting transformer, winding connection group, phase shift angle, model, PU relative units, SI named units.

В настоящее время в распределительных сетях 0,4 кВ все более широкое распространение получают силовые распределительные трансформаторы с группой соединения обмоток Y/Zh-11, обладающие симметрирующими свойствами при питании несимметричной нагрузки. Преимущественное применение трансформаторов с указанной группой соединения обмоток при проектировании систем электроснабжения 0,4 кВ предписано нормативным документом [1] и внутренним документом основного электросетевого оператора в России ПАО «Россети» [2]. Эти трансформаторы приходят на замену трансформаторам с группой соединения обмоток Y/Yн-0 в диапазоне мощностей от 16 до 400 кВА по причине высокого сопротивления нулевой последовательности у последних [3].

Особенностями трансформаторов со схемами соединения обмоток Y/Zh-11 являются малое сопротивление нулевой последовательности и способность симметрировать фазные токи обмотки высокого напряжения (ВН) при значительной (вплоть до 100 %) асимметрии токов в обмотке низкого напряжения (НН). Еще одной особенностью этих трансформаторов являются повышенные, по сравнению с трансформаторами с группами соединения обмоток $\Delta/Yн-11$ и Y/Yн-0, нагрузочные потери при симметричной нагрузке [4].

Расширяющееся использование трансформаторов со схемами соединения обмоток Y/Zh-11 обуславливает необходимость проведения расчётов и моделирования сетей с такими трансформаторами. В этой связи разработка модели и алгоритма проведения расчетов параметров трансформаторов со схемами соединения обмоток Y/Zh-11 в среде графического программирования, позволяющие практически исключить процесс вычислений вручную, является актуальной задачей. Одной из таких сред является Simulink на базе Matlab.

Однако в программном пакете Matlab Simulink в настоящее время отсутствуют модели силовых трансформаторов с группой соединения обмоток Y/Zh-11. Вместе с тем библиотека компонентов Simscape/Electrical/Specialised Power System/Fundamental Blocks/Elements содержит модель трехфазного фазосдвигающего трехобмоточного трансформатора Zigzag Phase-Shifting Transformer (ZPST). Эта модель трансформатора содержит две настраиваемые обмотки, соединяемые в зигзаг (Z) и подключаемые к пита-

ющей сети, и третью настраиваемую обмотку, соединяемую в треугольник (Δ) или звезду (Y), к которой подключается нагрузка. В справочной информации к этой модели отсутствует подробное описание ее свойств и особенностей настройки параметров, сама модель имеет закрытую структуру, защищенную от просмотра.

Поскольку трансформатору присуще свойство обратимости, применительно к модели входная и выходная обмотка могут быть поменяны местами без изменения основных свойств трансформатора. В пользу этого говорит способность как реального трансформатора, так и модели, осуществлять циркуляцию реактивной мощности (энергии). Для проверки свойств обратимости модели ZPST создадим схемы для проведения опытов холостого хода и короткого замыкания. Зададим одинаковые параметры входного и выходного напряжений (10 кВ) и мощность трансформатора (63 кВа) в окнах настроек параметров (рисунок 1). Остальные параметры оставим без изменений и запустим моделирование. По полученным результатам опытов короткого замыкания и холостого хода (рисунок 2) подтверждается свойство обратимости модели ZPST.

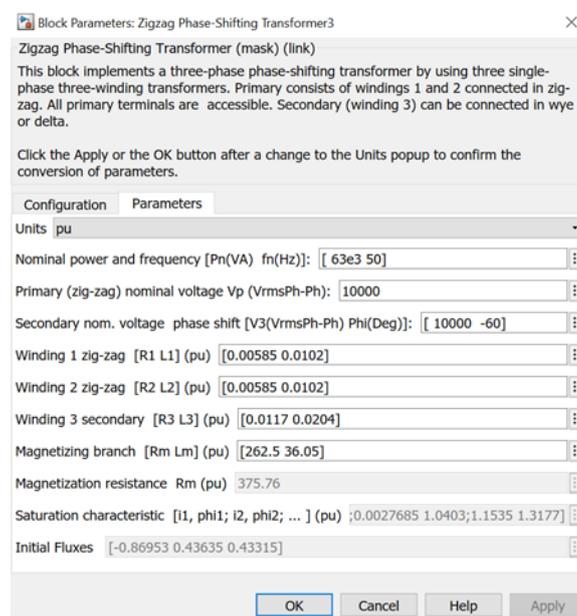
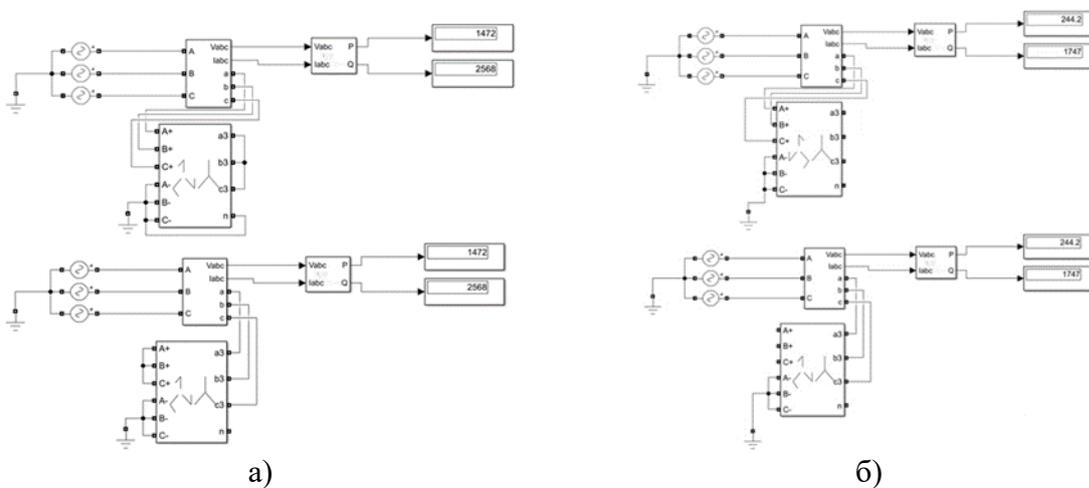


Рисунок 1 – Настройки параметров модели трансформатора ZPST



а) в опыте короткого замыкания; б) в опыте холостого хода.

Рисунок 2 – Проверка обратимости модели трансформатора ZPST

Вместе с тем модель трансформатора ZPST при равных параметрах обмоток, соединяемых в зигзаг, имеет в настройках по умолчанию угол сдвига фаз « 60° » или « -60° » градусов для третьей обмотки, что должно соответствовать группе соединения обмоток 2 или 10 [5, 6]. Для подтверждения этого выполним проверку сдвига фаз напряжений выходной обмотки относительно входной, дополнив схему опыта холостого хода измерителем угла (рисунок 3).

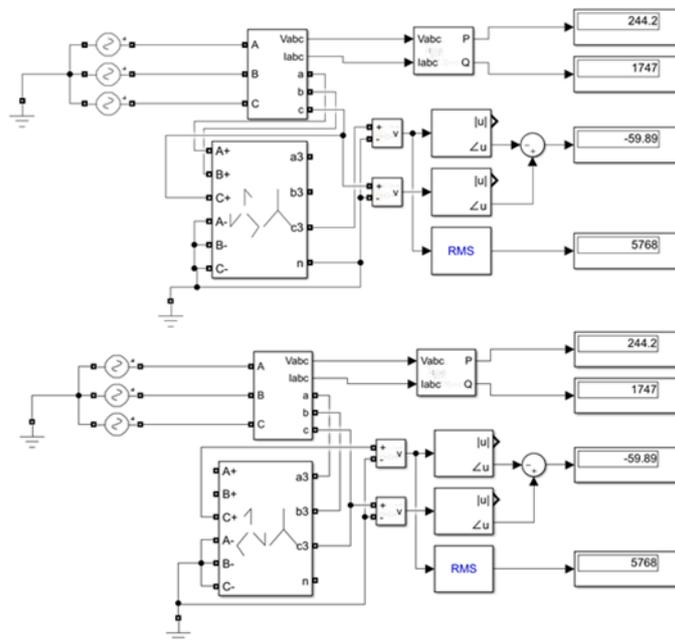


Рисунок 3 – Проверка угла сдвига фаз между напряжениями входной и выходной обмоток трансформатора ZPST на холостом ходу

При введении значения угла 30° или минус 30° градусов в настройках третьей обмотки (что соответствует 1 или 11 группе соединения обмоток), модель ZPST автоматически пересчитывает параметры первой и второй обмотки таким образом, что их сопротивление становится 1:4, а разность сопротивлений пропорциональна сопротивлению третьей обмотки.

Такое поведение модели характерно для трансформатора, у которого две обмотки соединяются в зигзаг последовательно-согласованно (конец одной обмотки с началом другой), в то время как силовых трансформаторов с группой соединения обмоток Y/Zn-11 применяется соединение обмоток в зигзаг последовательно-встречно (конец одной обмотки с концом другой) [7].

Таким образом, учитывая отсутствие возможности изменять фазировку включения обмоток, соединяемых в звезду, модель ZPST некорректно использовать в качестве модели трансформаторов с группой соединения обмоток Y/Zn-11.

Альтернативной моделью трансформатора с группой соединения обмоток Y/Zn-11 может быть схема, состоящая из трех однофазных трёхобмоточных трансформаторов (рисунок 4). Отсутствие магнитной связи между магнитопроводами трансформаторов соседних фаз при моделировании не вызовет значимых отклонений параметров, по сравнению с трехфазной трехстержневой магнитной системой. Соединение выходных обмоток в зигзаг предполагает жесткую магнитную связь одной выходной фазы с двумя входными фазами (питающими), а влияние магнитной связи с третьей фазой мало.

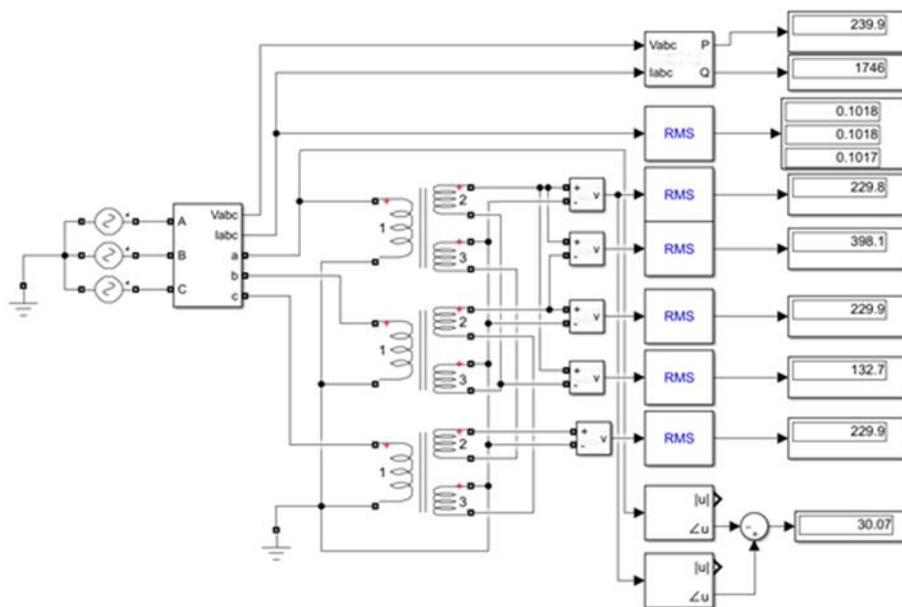


Рисунок 4 – Альтернативная модель трансформатора с группой соединения обмоток Y/Zn-11 из трех однофазных трёхобмоточных трансформаторов

Предварительно рассчитаны параметры по заводским данным трехфазного трёх-стержневого трансформатора с группой соединения обмоток Y/Zn-11 и номинальной мощностью 63 кВА. Эти параметры задавались в настройках однофазных трансформаторов модели. В результате моделирования опытов холостого хода и короткого замыкания получены данные, соответствующие заводским данным реального трансформатора. Угол сдвига фаз между напряжениями одноименных входящей и выходящей фаз составил 30° , напряжение одной половины выходной обмотки составило $\frac{U_\phi}{\sqrt{3}}$, что соответствует данным, приведенным в [7]. Обратимость модели, так же, как и в случае с моделью трансформатора ZPST, подтверждается опытами холостого хода и короткого замыкания с переменной местами входящей и выходящей обмоток относительно источника питания.

Вывод: модель ZPST некорректно использовать в качестве модели трансформаторов с группой соединения обмоток Y/Zn-11. Для моделирования работы трехфазных силовых распределительных трансформаторов с группой соединения обмоток Y/Zn-11 можно использовать схему, состоящую из трех однофазных трёхобмоточных трансформаторов.

Библиографический список

1. СП 256.1325800.2016 Электроустановки жилых и общественных зданий. Правила проектирования и монтажа (с Изменениями N 1, 2, 3). Свод правил от 29.08.2016 N 256.1325800.2016.
2. СТО 34.01-3.1-001-2016 Комплектные трансформаторные подстанции 6-20/0,4 кВ. Общие технические требования. Стандарт организации ПАО «Россети». Дата введения: 07.04.2016
3. Бедарев, М.А. Проблемы применения силовых трансформаторов с группой соединения обмоток Y/Yn-0 в распределительных сетях 0,4 кв / М.А. Бедарев, О.В. Коновалов, М. В. Кипервассер // Системы автоматизации (в образовании, науке и производстве) AS'2022 : труды Всероссийской научно-практической конференции (с международным участием), Новокузнецк, 15–16 декабря 2022 года. – Новокузнецк: Сибирский государственный индустриальный университет, 2022. – С. 571-575. – EDN NFHSUD.

4. П. М. Тихомиров Расчет трансформаторов: Учеб. пособие для вузов.– 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатом- издат, 1986. – 528 с: ил.
5. ГОСТ 11677-85. Трансформаторы силовые. Общие технические условия.
6. ГОСТ Р 52719-2007. Трансформаторы силовые. Общие технические условия.
7. Каминский Е.А. Звезда, треугольник, зигзаг. – 5-е изд., переработ. –М.: Энергоатом-издат, 1984, - 104 с. ил. – (Б-ка электромонтера; Вып. 556).

УДК 621.3

СИСТЕМА МОНИТОРИНГА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Васенин А.Б., Крюков О.В.

ООО «ТСН-электро»
г. Нижний Новгород, Россия, o.v.kryukov@mail.ru

***Аннотация.** Рассмотрена методология и аппаратные средства диагностики сложных электротехнических систем, включая мощные электроприводы турбокомпрессоров и газоперекачивающих агрегатов на действующих компрессорных станциях. Представленная методика основана на актуализированных нормативных документах государственного и отраслевого уровня. Предложен анализ статистики отказов электрооборудования, технические средства мониторинга и процедура получения алгоритма диагностики.*

***Ключевые слова:** электрооборудование, электропривод, мониторинг, турбокомпрессор, методология диагностики, технические и алгоритмические средства.*

***Abstract.** The methodology and hardware for diagnostics of complex electrical systems, including powerful electric drives of turbochargers and gas pumping units at operating compressor stations, are considered. The presented methodology is based on updated regulatory documents of the state and industry level. An analysis of the statistics of electrical equipment failures, technical monitoring tools and a procedure for obtaining a diagnostic algorithm is proposed.*

***Keywords:** electrical equipment, electric drive, monitoring, turbocharger, diagnostic methodology, technical and algorithmic tools.*

Разработка и внедрение систем оперативного диагностирования технологического электрооборудования, включая системы автоматизированного электропривода, важны как для новых энергоустановок, так и агрегатов, выработавших свой назначенный ресурс [1]. Подобные встроенные системы мониторинга позволяют максимально продлить ресурс и снизить аварийность [2, 3], а также выполнять ремонты по фактическому состоянию. Своевременность и актуальность систем диагностики и мониторинга технологического оборудования опасных производственных объектов (ОПО) и компрессорных станций (КС) с газоперекачивающими агрегатами (ГПА) (рисунок 1) подтверждена государственными и корпоративными нормативными документами.

В соответствии с распоряжением Правительства РФ, разработка универсальных систем мониторинга надежности нефтегазовых объектов, действующих в режиме реального времени и позволяющих осуществлять контроль и управление при различных уровнях и в масштабах систем, является задачей первого приоритета по повышению надежности и безопасности систем энергетики. Кроме того, регламентированы системы контроля работоспособности, надежности и безопасности оборудования КС с помощью технических и программных средств мониторинга и диагностики. Они должны достоверно производить оценку технического состояния АЭП и прогнозировать его изменение не менее чем за период до следующего проведения измерений. Установка систем мониторинга и диагностики должна обеспечиваться при новом строительстве и реновации КС, а также в процессе модернизации эксплуатируемых КС. Вводимые в эксплуатацию полнофункциональные системы должны обеспечивать эксплуатацию КС с учетом фактического состояния каждого типа диагностируемого оборудования.

лекарственных препаратов на примере Кемеровской области - Кузбасса за 2021 - 2022 годы.....	279
<i>Поповян Н.О., Усов А.Б.</i>	
Информационно-аналитическая система управления деятельностью предприятия по производству асфальта и асфальтобетонной смеси	284
<i>Грачев А.В.</i>	
Подходы к оцениванию работы узлов в распределенной сетевой структуре для задач управления техническими элементами.....	291
<i>Рыленков Д.А., Калашников С.Н.</i>	
Управление конфигурациями телекоммуникационного оборудования при решении задач обеспечения информационной безопасности.....	294
<i>Лубина О.С., Калашников С.Н.</i>	
Разработка теоретических основ для управления образовательным процессом при изучении учебных дисциплин математического цикла с использованием технологий виртуальной и дополненной реальностей	297
<i>Шабалин В.С., Киселева Т.В.</i>	
Обзор существующих методов и инструментов управления организацией	300
СЕКЦИЯ 4. СОВРЕМЕННЫЙ АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД И ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА	
<i>Поползин И.Ю.</i>	
К вопросу о применении электропривода, построенного по схеме машины двойного питания, для механизмов с большими диапазонами регулирования скорости (на примере подъемной установки).....	306
<i>Дурнев А.А., Симаков В.П., Кипервассер М.В.</i>	
Применение сглаживающих фильтров для преобразователей приводов рольгангов металлургических производств с целью снижения генерации высших гармоник в питающую сеть.....	311
<i>Бедарев М.А., Коновалов О.В., Мамонтов Д.Н., Кипервассер М.В.</i>	
Особенности модели фазосдвигающего трансформатора Zigzag Phase-Shifting Transformer в среде Matlab Simulink при моделировании силовых трансформаторов 10(6)/0,4 со схемой соединения обмоток Y/Zn-11	314
<i>Васенин А.Б., Крюков О.В.</i>	
Система мониторинга автоматизированного электропривода	318
<i>Степанов С.Е., Крюков О.В.</i>	
Переходные процессы короткого замыкания в электроприводе	324
<i>Стищенко К.П., Герасимук А.В., Кипервассер М.В.</i>	
Влияния высших гармонических составляющих в питающем напряжении тяговой подстанции на качество выпрямленного напряжения и напряжения на шинах 10/6 кВ	330
<i>Поползин И.Ю., Кубарев В.А.</i>	
Электропривод с асинхронным электродвигателем двойного питания.....	335
<i>Кубарев В.А., Зайцев Н.С., Кузнецова Е.С.</i>	
Математическое моделирование синхронного двигателя с демпферной обмоткой в системе относительных единиц «Парка-Горева».....	339

<i>Александров Н.А., Модзелевский Д.Е., Кипервассер М.В.</i>	
Модернизация многодвигательного электропривода установки сухого тушения кокса с учетом неидентичности характеристик электродвигателей.....	346
<i>Поползин И.Ю., Живаго Р.Э.</i>	
Особенности работы синхронного двигателя при колебаниях сетевого напряжения в нерегулируемых электроприводах с длительным режимом работы	351
<i>Костылев С.Ю., Модзелевский Д.Е.</i>	
Построение модели и синтез управления автоматизированной поточно-транспортной системы	356
<i>Калачева О.К., Модзелевский Д.Е.</i>	
Исследование режимов работы многоагрегатного электропривода насосной станции.....	362
<i>Алтухов Д.И., Модзелевский Д.Е.</i>	
Разработка многоуровневого инвертора напряжения для электропривода ШПУ	367
<i>Вершинин М.С., Модзелевский Д.Е.</i>	
Применение имитационного моделирования при создании тренажера для подготовки к сдаче демонстрационного экзамена по «Мехатронике».....	374
<i>Мальшев Г.Д., Борщинский М.Ю.</i>	
Разработка электронного значка со световой эмблемой СибГИУ.....	381
<i>Ушаков В.В., Кармачев С.К., Борщинский М.Ю.</i>	
Осциллограф на базе персонального компьютера	383
<i>Рогожников И.П., Борщинский М.Ю.</i>	
Реализация системы единого времени с использованием микроконтроллера	386
<i>Яценко Н.Р., Борщинский М.Ю.</i>	
Измерение АФЧХ с помощью универсального измерительного прибора OSA103F	390
<i>Дорошенко А.В.</i>	
Современные методы и средства исследования автоматизированных электрических и электромеханических систем. состояние, проблемы, перспективы.....	394
<i>Сарсембин А.О., Кубарев В.А.</i>	
Системы автоматического регулирования возбуждения синхронных двигателей шахтного подъёма.....	398
<i>Кубарев В.А., Кучик М.М., Маршев Д.А.</i>	
Визуализация электрических схем	402
<i>Бунакова М.Т., Водоватова А.Е., Корнеев П.А., Мищенко С.А., Низовская А.Д.,</i>	
Разработка учебного квадрокоптера.....	406
СПИСОК АВТОРОВ	412
СОДЕРЖАНИЕ	414

Научное издание

**СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ
(в образовании, науке и производстве)
AS' 2023**

**ТРУДЫ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО–ПРАКТИЧЕСКОЙ
КОНФЕРЕНЦИИ
(с международным участием)**

12-14 декабря 2023 г.

Под общей редакцией д.т.н., доц. В.В. Зимина

Техническое редактирование и компьютерная верстка В.И. Кожемяченко

Подписано в печать 01.12.2023 г.

Формат бумаги 60×84 1/16. Бумага писчая. Печать цифровая.

Усл. печ. л. 25.04. Уч.-изд. л. 26.64. Тираж 20 экз. Заказ 260.

Сибирский государственный индустриальный университет
654007, Кемеровская область – Кузбасс, г. Новокузнецк, ул. Кирова, зд. 42.

Издательский центр СибГИУ