

На правах рукописи



Тимонин Алексей Юрьевич

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ
ГЕНЕРАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ДЛЯ СОБСТВЕННЫХ НУЖД
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОДСТАНЦИЙ**

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы.

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Тула, 2021

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Тульский государственный университет» (ТулГУ).

Научный
руководитель: доктор технических наук, профессор,
Степанов Владимир Михайлович

Официальные
оппоненты: Калинин Вячеслав Федорович,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический
университет»,
профессор

Авдошин Вадим Сергеевич,
кандидат технических наук,
ООО «ГИПЕРГЛОБУС» г. Москва,
главный инженер

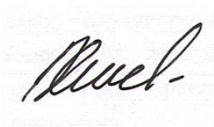
Ведущее предприятие: Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования «Липецкий
государственный технический университет»

Защита диссертации состоится «28» декабря 2021 г. в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.271.12, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тульский государственный университет» по адресу: 300012, г. Тула, пр. Ленина, 92, ауд. 9-101.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Тульского государственного университета и на сайте <https://tsu.tula.ru/>

Автореферат разослан «27» октября 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Хмилёв
Роман Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Силовые трансформаторы - электротехнические установки электропитающих систем, от надёжности и качества функционирования которых зависит надёжность и качество распределяемой электрической энергии. Выход из строя силовых трансформаторов приводит к значительным технологическим и финансовым издержкам в ходе эксплуатации электропитающих систем.

Одно из основных условий, оказывающих большое влияние на надёжность функционирования силовых трансформаторов, считается их эффективное охлаждение.

Российские ученые Ю.Б. Бородулин, А.Г. Бунин, Л.Н. Конторович, В.М. Бутовский, Г.В. Попов, Е.Ю. Комков внесли огромный вклад в обоснование рациональных параметров электромеханических систем охлаждения силовых трансформаторов для повышения их функциональной надёжности, обращали внимание на перспективность комбинированного принудительного охлаждения трансформаторов воздухом и маслом.

Однако в их работах не учитывались проблемы утилизации тепла, вырабатываемого силовым трансформатором, где важной научной задачей является формирование режимов их эффективного охлаждения и энергоэффективного процесса утилизации воздушного теплового потока, управление охлаждающей способностью воздушно-масляных охладителей системы «силовой трансформатор - охладитель - утилизация воздушного теплового потока - генерация электрической энергии - накопитель электрической энергии» по критерию надёжности её функционирования, а также генерации электрической энергии для собственных нужд.

Важным элементом таких систем является электродвигатель, который при реализации управления им обеспечивает регулирование характеристик электропривода, а, следовательно, их режимов работы электромеханических систем, однако регулирование характеристик электропривода снижает эффективность управления введя рассеивания потока.

Большой вклад в исследование и построение систем управления ЭП переменного тока внесли выдающиеся отечественные и зарубежные ученые - М.М. Ботвинник, И.Я. Браславский, А.А. Булгаков, А.М. Вейнгер, А.Б. Виноградов, Л.Х. Дацковский, Д.Б. Изосимов, Н.Ф. Ильинский, В.И. Ключев, С.А. Ковчин, А.Е. Козярук, В.А. Мищенко, Г.Б. Онищенко, В.В. Рудаков, Ю.А. Сабинин, О.В. Слежановский, В.М. Степанов, Ю.Г. Шакарян, Р.Т. Шрейнер, В.А. Шубенко, И.И. Эпштейн, F. Blaabjerg, F. Blaschke, B. K. Bose, W. Flöter, J. Holtz, W. Leonhard, R.D. Lorenz, M.P. Kazmierkowski, T.A. Lipo, K. Matsuse, D.W. Novotny и др.

В данном случае при адаптивном управления электроприводами должны быть реализованы автоматические процедуры активной предварительной идентификации начальных значений интервально неопределённых параметров электроприводов, которые затем уточняются путём их текущей идентификации.

Поэтому важной **научной задачей** является повышение эффективности функционирования электротехнических и электромеханических систем генерации электрической энергии для собственных нужд электрических подстанций, ее резервирование и утилизации тепла, выделяемого трансформатором, для повышения надёжности их работы и снижения потерь.

Цель работы заключается в повышении надёжности и снижения потерь функционирования электротехнических и электромеханических систем генерации электрической энергии для собственных нужд электрических подстанций, ее резервирование и утилизации тепла, выделяемого трансформатором, путём генерации

и резервирования накопителем электрической энергии.

Идея работы состоит в достижении требуемого уровня надёжности функционирования системы «силовой трансформатор - охладитель - утилизация воздушного теплового потока - генерация электрической энергии - накопитель электрической энергии» и обоснованности рациональных режимных параметров её электромеханических систем, основанных на функциональных связях «реактивно-вентильный электродвигатель – исполнительный орган – реактивно-вентильный генератор», обеспечивающих формирование энергоэффективного процесса охлаждения и утилизации тепла, выделяемого трансформатором, и, закона управления ими.

Для достижения поставленной цели сформированы и должны быть решены следующие **задачи исследования**:

1. Разработать математические модели динамики электромагнитных и тепловых процессов в системе «силовой трансформатор - охладитель - утилизация воздушного теплового потока - генерация электрической энергии - накопитель электрической энергии», учитывающие взаимное влияние скоростей подачи трансформаторного масла, вращения вентиляторов воздушного охлаждения и всасывающего вентилятора теплового воздушного потока устройства использования энергии избыточного воздушного теплового потока, выделяемого силовым трансформатором.

2. Определить зависимости для расчета рациональных режимных параметров электромеханических систем при охлаждении силовых трансформаторов, утилизации воздушного теплового потока, генерации и накоплении электрической энергии.

3. Разработать устройство использования энергии избыточного воздушного теплового потока, выделяемого силовым трансформатором, и, обеспечить энергоэффективный режим его охлаждения и формирование закона управления реактивно-вентильным электроприводом насоса подачи масла, охлаждающей способностью воздушно-масляных охладителей, генерацию и накопление электроэнергии системы «силовой трансформатор - охладитель - утилизация воздушного теплового потока - генерация электрической энергии - накопитель электрической энергии» по критерию надёжности её функционирования.

4. Построить прогностическую модель в реальном времени функционирования системы «силовой трансформатор - охладитель - утилизация воздушного теплового потока - генерация электрической энергии - накопитель электрической энергии», обеспечивающую прогнозирование реакции системы на управляющие воздействия и синтез топологии структуры системы управления переходными процессами на основе нейронных сетей, генерации управляющих воздействий и рациональный закон управления, охлаждающей способностью воздушно-масляных охладителей и энергоэффективность устройства использования энергии избыточного воздушного теплового потока.

5. Установить способы формирования закономерностей управляющих воздействий в электротехнических устройствах контроля и управления режимами работы силовых трансформаторов под нагрузкой, учитывающих комплексный диагностический параметр технического состояния – тангенс угла диэлектрических потерь.

6. Разработать системы управления и контроля за формированием генерации электрической энергии, обеспечивающих надёжность её резервирования.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

1. Установлены зависимости, учитывающие взаимное влияние скоростей подачи трансформаторного масла, вращения вентиляторов воздушного охлаждения и всасывающего вентилятора теплового воздушного потока устройства использования энергии избыточного воздушного теплового потока, выделяемого силовым трансформатором, обеспечивающие управление формированием электрической энергии с учетом резервирования.

2. Разработана математическая модель динамики электромагнитных и тепловых процессов в системе «силовой трансформатор - охладитель - утилизация воздушного теплового потока - генерация электрической энергии - накопитель электрической энергии», исследование которой позволило определить закономерности формирования рационального закона управления и режимных параметров её электромеханических систем, учитывающих взаимное влияние скоростей вращения вала электродвигателей масляного насоса, вентиляторов воздушного охлаждения, всасывающего вентилятора устройства использования энергии избыточного воздушного теплового потока, выделяемого трансформатором и генерации электрической энергии.

3. Определены зависимости, обеспечивающие прогнозирование реакции системы «силовой трансформатор - охладитель - утилизация воздушного теплового потока - генерация электрической энергии - накопитель электрической энергии» на управляющие воздействия, и, установлены закономерности формирования топологии структуры управления переходными процессами в её электротехнических и электромеханических системах на основе нейронных сетей, генерации управляющих воздействий, рационального закона управления, охлаждающей способностью воздушно - масляных охладителей, генерации электрической энергии энергоэффективностью устройства использования энергии избыточного воздушного теплового потока.

Методы исследований. В диссертационной работе использованы методы термодинамики, электротехники и электромеханики, теории управления и надежности, имитационного моделирования электромеханических систем с использованием пакета MATLAB, теории вероятностей и математической статистики, численные методы и экспериментальных исследований.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций диссертационной работы обоснована аргументированностью математических выкладок и корректностью постановки задач и методов исследований, адекватностью теоретических и экспериментальных исследований, расхождение между которыми составило 14,5 %, что подтверждает их удовлетворительную сходимость, практическим применением результатов работы в производстве.

Практическое значение. На основе проведенных исследований разработана методика определения рациональных параметров энергосберегающих систем охлаждения силовых трансформаторов с утилизацией воздушного теплового потока, генерацией электрической энергии и алгоритмы управления режимами работы их электротехнических и электромеханических систем. Разработано новое энергосберегающее техническое решение утилизации тепла, выделяемого силовым трансформатором, законы рационального управления реактивно-вентильными электродвигателями электромеханических систем от системы управления в системе «силовой трансформатор - охладитель - утилизация воздушного теплового потока - генерация электрической энергии - накопитель электрической энергии», в комплексе

обеспечивающих энергосберегающие режимы за счет снижения потерь электрической энергии и использования тепла, выделяемого трансформатором.

Реализация результатов работы. Основные научно-практические результаты диссертационной работы используются в ПАО «МРСК Центра и Приволжья» филиал «Тулэнерго». Результаты работы использованы в учебных курсах: «Электрические станции и подстанции» и «Электроэнергетические системы и сети».

Использование в учебном процессе. Теоретические результаты данной работы были использованы при разработке курсов лекций и комплексов лабораторных работ по дисциплинам: «Электрические станции и подстанции», «Надежность электрооборудования». Данные курсы читались в ТулГУ для студентов специальностей «Электроснабжение».

Апробация работы. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на Международных научно-технических конференциях – «Энергосбережение-2018 – 2021» в рамках Московского международного энергетического форума «ТЭК России в XXI веке» (г. Москва, 2018-2021 г.).

Публикации. Основные положения диссертационной работы изложены в 5 статьях, рекомендованных ВАК, а также получен патент РФ №2716817 на изобретение «Устройство для использования энергии избыточного воздушного теплового потока от силового трансформатора».

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 97 наименований. Основная часть работы изложена на 112 страницах и содержит 42 иллюстрации.

Личный вклад автора. Разработаны методика определения структуры функциональных связей, математические модели комплексной системы контроля и управления электромагнитными и тепловыми процессами силовых трансформаторов на основе электромеханических систем с реактивно-вентильными электродвигателями и реактивно-вентильными генераторами электрической энергии для собственных нужд электрических подстанций, установлены зависимости, определяющие их рациональные конструктивные и режимные параметры, учитывающие комплексный диагностический параметр технического состояния – тангенс угла диэлектрических потерь и характеристики переходных процессов, установлены закономерности формирования в них переходных процессов, управляющих воздействий и условий реализуемости их математических моделей, обеспечивающих требуемый уровень эффективности и надежности функционирования системы. Проведены численные экспериментальные исследования, подтвердившие их работоспособность.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформированы цель и задачи исследования, решению которых посвящена диссертация, излагаются подходы и методы исследования, отмечаются научная новизна, практическая значимость работы, а также апробация, приведена структура диссертации.

В первой главе проведен анализ конструктивных схем, методов моделирования, расчета параметров контроля и прогнозирования технического состояния силовых трансформаторов, электромагнитных и тепловых процессов, формируемых в них, электромеханических и электротехнических устройств автоматического управления. Частые включения и отключения электродвигателя электромеханических систем при охлаждении силовых трансформаторов снижают надежность их работы до 30%, а потери электрической энергии из-за пусковых токов достигают 30-41%. Применение преобразователя частоты ПЧ на границе коридора регулирования не полностью исключает колебательный режим системы охлаждения силового трансформатора, так как потери электрической энергии достигают 24-35%. Следовательно, обоснована необходимость разработки новых технических решений по обеспечению контроля и управления режимами охлаждения силовых трансформаторов в условия эксплуатации, включающая применение реактивно-вентильного электродвигателя и реактивно-вентильного генератора, обладающих демпфирующей способностью.

Во второй главе на основе анализа энергоэффективности разработанного нового технического решения, обеспечивающего использование избыточного тепла от силового трансформатора для отопления и генерации электрической энергии для собственных нужд электрических подстанций, на рис. 1. изображена схема устройства для использования энергии избыточного воздушного теплового потока от силового трансформатора.

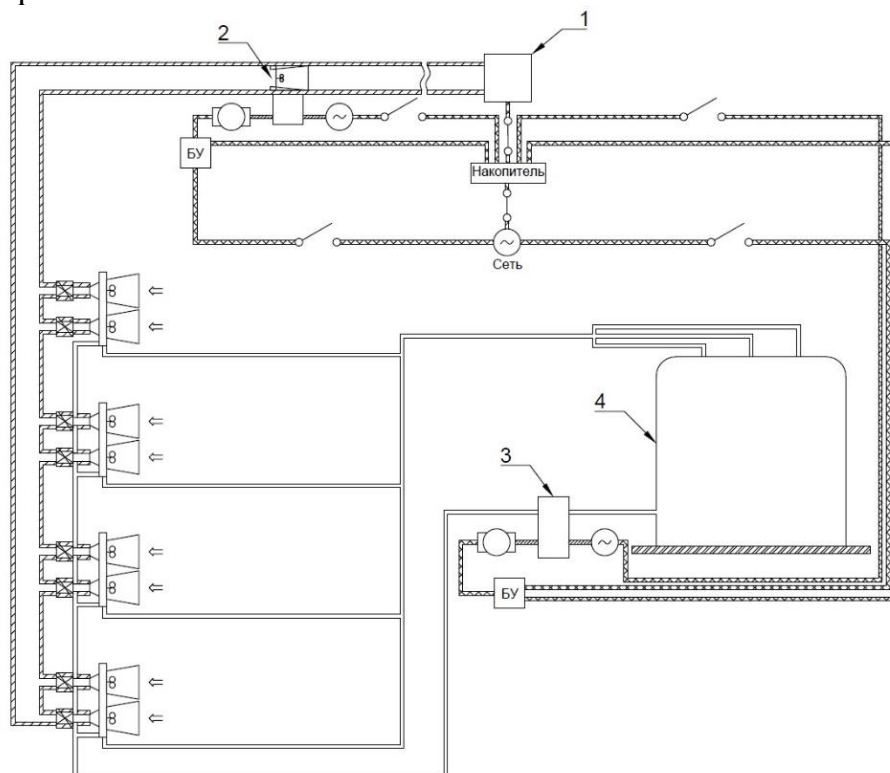


Рис. 1. Устройство для использования энергии избыточного воздушного теплового потока от силового трансформатора.

Устройство для использования энергии избыточного воздушного теплового потока от силового трансформатора, содержит объект собственных нужд 1, устройство

всасывающего вентилятора 2, насос масляного охлаждения 3, силовой трансформатор 4.

Формирование температуры рабочей среды силового трансформатора следует рассматривать, как объект с распределенными параметрами, переходные процессы в котором должны описываться в частных производных, во времени и пространстве, характеризующими нестационарной пространственно-временной функцией температуры $f(x, y, z, t)$, где x, y, z – пространственные координаты в декартовой системе, t – время.

Совокупность значений температуры по всему объему рассматриваемого пространства – температурное поле.

В общем случае, температурное поле

$$T = T(x, y, z, t),$$

должно соответствовать уравнению

$$T(x, y, z, t) = f(x, y, z, t), \quad (1)$$

которое является пространственно-распределенным, описывающее процесс теплопроводности, и характеризующиеся, как объекта с распределенными параметрами.

В результате возникают информационная, структурная и временная избыточности позволяющие повысить эффективность функционирования электрооборудования и электротехнических устройств.

Формирование управляющих воздействий распределением контролируемых параметров и эффективностью использования системы контроля и управления электрооборудованием, электромеханическими и электротехническими устройствами устанавливается на основе нейронной сети, которая выполняет функцию модели измеряемых и управляемых потоков и позволяет получить цифровую модель указанных потоков

$$V(x, y) = 0, \quad (2)$$

где V – вектор функция контролируемых и управляемых параметров в узлах взаимосвязанных элементов и контролирующих и управляющих систем; x и y – векторы-столбцы зависимых и независимых параметров режимов работы систем учитывающих состояния электрооборудования, электромеханических и электротехнических устройств и управления режимами их работы (рис. 2).

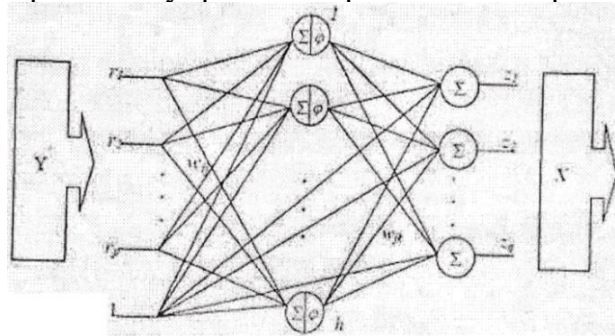


Рис. 2. Структура нейронной сети.

Задача формирования структуры функциональных связей конструктивных схем контроля и управления, и, расчёта установившихся режимов электрооборудования, электромеханических и электротехнических устройств сводится к минимизации суммы квадратов невязок узловых контролируемых и управляемых параметров.

$$Z = \sum_j [y_j(D - y_j)]^2 \rightarrow \min, \quad (3)$$

где Z -целевая функция, отражающая сумму невязок контролируемых и управляемых параметров на j -ой итерации для электротехнических и электромеханических

устройств, систем контроля и управления, состоящих из j элементов.

На основании анализа использования нейронной сети с применением общеизвестного математического аппарата осуществлено моделирование режимов работы конструктивных схем контроля и управления.

Определение надежности качества контроля и эффективности управления электрооборудованием, электротехническими и электромеханическими устройствами системы генерации электрической энергии должен рассчитываться на основе требуемого уровня надежности, который устанавливает требуемый уровень вероятности отказа, соответствующий требуемому техническому уровню

$$q_H = \frac{q_C}{k_y}, \quad (4)$$

где k_y – коэффициент технического уровня

$$k_y = \frac{1}{6} \left(\frac{V_{чс}}{V_{чн}} + \frac{V_{ппн}}{V_{ппс}} + \frac{V_{увн}}{V_{увс}} + \frac{P_{рн}}{P_{рс}} + \frac{P_{дс}}{P_{дн}} + \frac{tg\delta_c}{tg\delta_n} \right), \quad (5)$$

где $V_{чс}$ и $V_{чн}$ – скорости образования неисправностей электрооборудования, электромеханических и электротехнических устройств в существующих системах и нового технического уровня; $V_{ппн}$ и $V_{ппс}$ – скорости формирования переходных процессов в электромеханических и электротехнических устройствах систем контроля и селективности; $V_{увн}$ и $V_{увс}$ – скорости формирования управляющих воздействий электротехнических систем контроля и управления; $P_{рн}$ и $P_{рс}$ – мощность резервируемой электроэнергии; $P_{дс}$ и $P_{дн}$ – мощности дозированного питания электроэнергией элементов электротехнических систем; $tg\delta_c$ и $tg\delta_n$ – тангенс угла диэлектрических потерь.

Требуемый уровень надежности определяет вероятность отказа, соответствующего требуемому техническому уровню (4), где q_H и q_C – вероятность отказа системы контроля и управления электромеханическими и электротехническими устройствами.

Коэффициент запаса по конструкционному материалу при этом можно выразить как:

$$K_H = \frac{k_{\Pi}^3}{k_m^2 k_0^2}. \quad (6)$$

Учитывая, что

$$k_{NH} = \frac{1}{\lambda_{HM}}. \quad (7)$$

Условие реализуемости надёжности элементов устройств контроля и управления, определяемое соответствием их параметров условиям эксплуатации, выражается как

$$\frac{t_{дп} T_{OC}}{T_{OH}^2} \leq q_{HM}. \quad (8)$$

Функциональные параметры устройств коммутации и контроля качества электрической энергии определяется на основе их соответствия условиям эксплуатации и обеспечения требуемой величины T_{OH} .

$$T_{OH} \leq T_{OM}, \quad (9)$$

где T_{OM} – максимальное время до проведения ремонтных работ. Результаты расчета приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Показатель надежности	q_{HM}	P_{HM}	λ_{HM} , 1/ч	t_{HM} , ч	T_{OHM} , ч	$t_{дп}$, ч
Коммутационные элементы	0,0063	0,9957	0,0032	17,45	503,21	1,54
Электротехнические и электромеханические элементы	0,0077	0,9973	0,0027	18,29	628	1,77

Показатель надежности	$k_{\text{ТИНМ}}$	$P_y(t)$	$k_{\text{П}}$	K_H	k_m	K_0	$t_{\text{МП}}$	$k_{\text{ММ}}$
Коммутационные элементы	0,969	0,03	1,51	1,6	0,995	0,65	282,1	13
Электротехнические и электромеханические элементы	0,981	0,009	1,83	1,99	0,995	0,66	257,4	15

В третьей главе смоделированы переходные процессы в системе использования энергии избыточного воздушного теплового потока от силового трансформатора для обогрева и генерации электрической энергии для собственных нужд электрических подстанций.

Регулирование скорости обдува охладителей оказывается в 1,33 раз эффективнее повышения перепада статического давления в охладителе за счет использования вентилятора (рис. 1) устройства для использования энергии избыточного воздушного теплового потока, до повышения перепада статического давления в охладителе за счет использования вентилятора устройства для использования энергии избыточного воздушного теплового потока в 1,14 раза эффективно при регулировании скорости движения масла в охладителе в зависимости от скорости подачи охлаждающего воздушного потока.

Относительная скорость вентилятора охладителей $\omega_{\text{в.ох}}(t)$ определяется как суммарная относительная скорость всех работающих и регулируемого вентиляторов. Если работают 1 нерегулируемый охладитель, а скорость вращения вала регулируемого составляет 70% от номинального режима, то $\omega_{\text{в.ох}}(t) = 1 + 0,7 = 1,7$.

Регулирование перепада статического давления в охладителе за счет использования всасывающего вентилятора в трубопроводе устройства для использования энергии избыточного воздушного теплового потока в 1,14 раз эффективнее регулирования скорости движения масла в охладителе.

При выборе способа, законов и функциональной схемы управления реактивно-вентильными электродвигателями насоса подачи масла в трансформатор и одного из вентиляторов воздушных охладителей. Так как система охлаждения мощных силовых трансформаторов является достаточно инерционной, видно, что наиболее рациональным способом является система управления реактивно-вентильными электродвигателями с косвенной ориентацией по полю и регуляторами токов.

На рис. 3. изображена структура измерительно-информационного- управляющего модуля - ИИУМ, который разделён на две секции взаимосвязанные через общий исполнительный элемент - накопитель, имеющий обратную связь с обеими секциями. Секция относящаяся к контролю режимов работы электрооборудования и электротехнических устройств включает датчики: $D_{\text{в}}$ - датчик контроля режима работы выключателей; $D_{\text{р}}$ - датчик контроля режима работы разъединителей; $D_{\text{ст}}$ - датчик контроля режима работы силовых трансформаторов; $D_{\text{шр}}$ - датчик контроля режима работы шунтирующих реакторов; $D_{\text{ит}}$ - датчик контроля режима работы измерительных трансформаторов тока и напряжения; $D_{\text{нэ}}$ - датчик контроля режима работы накопителя электрической энергии; $D_{\text{п}}$ - датчик контроля режима работы преобразователя электрической энергии с устройством дозированного электропитания при её распределении по электроприёмникам. Секция, относящаяся к контролю режима охлаждения электрооборудования и электротехнических устройств, включает датчики: $D_{\text{т}}$ - датчики контроля температуры; $D_{\text{эд}}$ - датчик контроля режима работы реактивно-вентильного электродвигателя; $D_{\text{нэ}}$ - датчик контроля режима работы накопителя электрической энергии; $D_{\text{ву}}$ - датчик контроля режима работы вентиляторной установки.

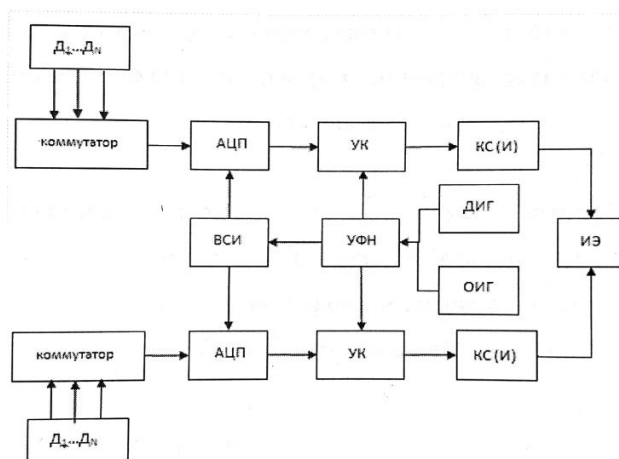


Рис. 3. Структура измерительно-управляющего модуля.

При расчёте ёмкости накопителя учитываем, что в процессе зарядки величина максимально допустимого напряжения накопителя $U_{e_{max}}$ должна быть не ниже максимального напряжения, обеспечивающая мощность всех подключенных к нему потребителей.

Тогда искомая емкость накопителя, выраженная в ампер-часах (А*ч),

$$Q_{max} = \frac{A_{рек}}{(1-k_{разр}k_{min})U_{ном}}, \quad (10)$$

где $k_{\text{разр}} = Q_{\min}/Q_{\max} = 0,2 \dots 0,25$,

$$k_{min} = U_{min}/U_{HOM}^{max} = 0,2 \dots 0,25.$$

На основании анализа использования нейронной сети и применением разработанного математического аппарата проведено моделирование режимов работы комплексной системы генерации реактивно-вентильным генератором с использованием приложения MatLab SimPowerSystems, в результате которого получена обобщённая структурная схема (рис. 4).

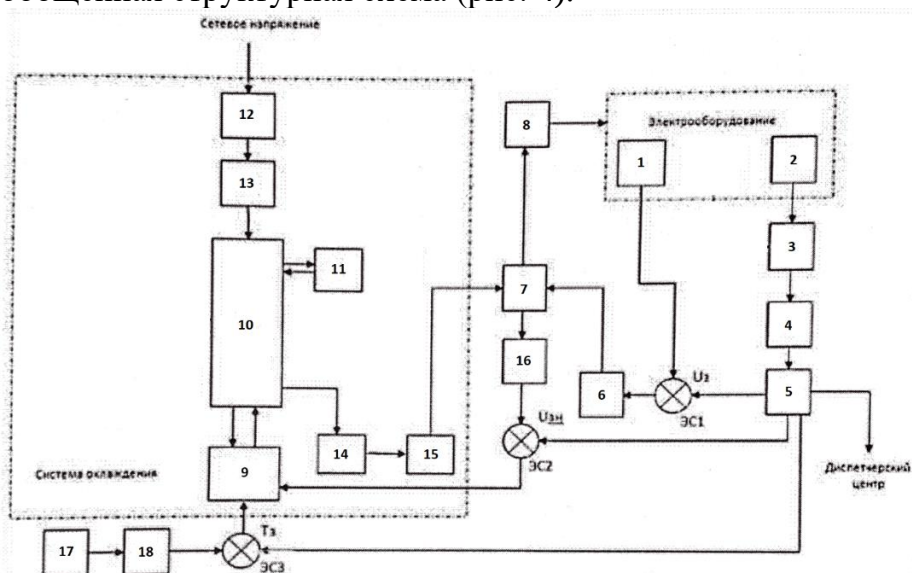


Рис. 4. Схема устройства генерации с реактивно-вентильным генератором.

В состав обобщенной структурой схемы входит: 1 – датчик напряжения, 2 – анализатор диэлектрических потерь и емкости, 3 – аналого-цифровой преобразователь с микропроцессором, 4 – интерфейс, 5 – компьютер, 6 – блок управления накопителя, 7 – накопитель, 8 – перестраиваемый ТПЧ, 9 – микропроцессорная система управления, 10 – вентильный коммутатор, 11 – реактивно-вентильный генератор, 12 – выпрямитель,

13 – фильтр, 14 – фильтр, 15 – блок контроля качества генерируемой электроэнергии, 16 – датчик напряжения накопителя, 17 – датчики температуры, 18 – аналого-цифровой преобразователь с микропроцессором, ЭС1 – элемент сравнения напряжения сети; ЭС2 – элемент сравнения напряжения накопителя; ЭС3 – элемент сравнения температуры.

Потокоцепления реактивно-вентильного электродвигателя может выражаться в виде функции тока статора и ротора

$$\begin{cases} \Psi(i, \theta) = L_q i + [L_{dsat} i + A(1 - e^{-Bi}) - L_q i] \cdot f(\theta) \\ A = \Psi_m - L_{dat} I_m \\ B = \frac{L_d - L_{dsat}}{\Psi_m - L_{dat} I_m} \end{cases}, \quad (11)$$

где L_q – минимальная индуктивность; L_{dsat} – насыщенная индуктивность; L_d – ненасыщенная индуктивность; N_r – число полюсов ротора.

Зависимость момента двигателя от угла поворота, тока и индуктивности вычисляется выражением (20) и определяется выражением

$$M_e(i, \theta) = \left[\frac{(L_{dsat} - L_q) \cdot i^2}{2} + Ai - \frac{A(1 - e^{-Bi})}{B} \right] \cdot f'(\theta), \quad (12)$$

$$f'(\theta) = 6 \frac{N_r^3}{\pi^3} \theta^2 - 6 \frac{N_r^2}{\pi^2} \theta.$$

Механические динамика двигателя и нагрузки регулируются уравнения движения (12) и структура показана на рис. 5.

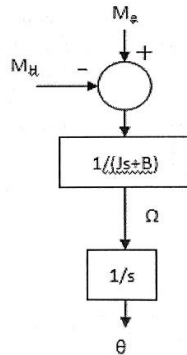


Рис. 5. Моделирование механических характеристик двигателя и нагрузки (масляный насос, реактивно-вентильный генератор, вентиляционная установка и реактивно-вентильный генератор).

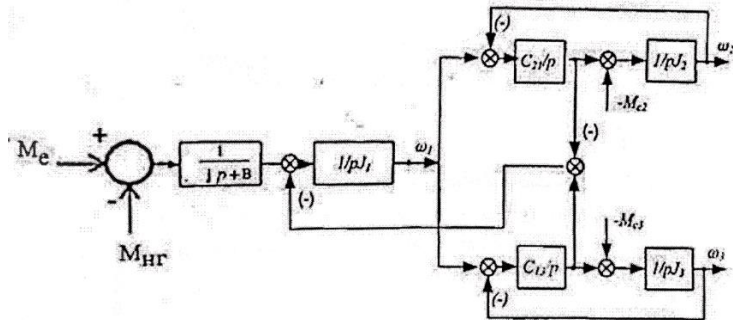


Рис. 6. Структурная схема ЭМС с реактивно-вентильными электродвигателями и генераторами.

Исследование разработанной математической модели проводилось на ЭВМ с помощью пакета программ, разработанных для сложных дифференциальных уравнений.

Результаты исследования обобщенной математической модели: на основании вышеизложенного было проведено исследование разработанной математической

модели на ПЭВМ с помощью пакета программ MatLab - simulink.

На рис. 7 представлены результаты моделирования переходных процессов реактивно-вентильного электродвигателя и реактивно-вентильного генератора.

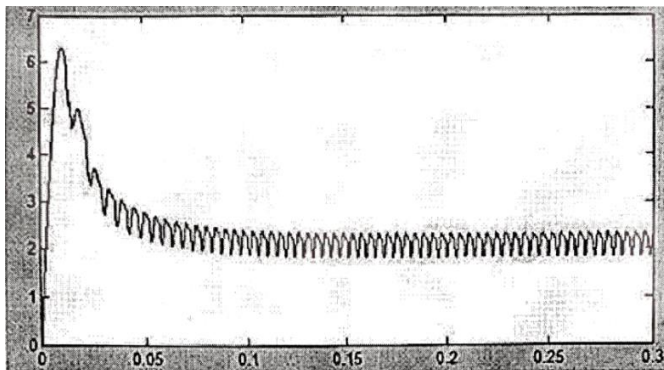


Рис. 7а. В реактивно-вентильном электродвигателе

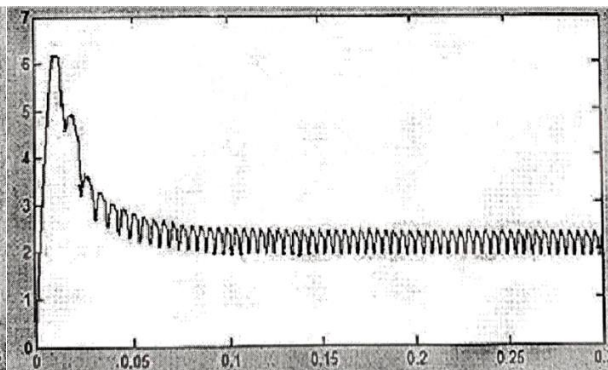


Рис. 7б. В реактивно-вентильном генераторе

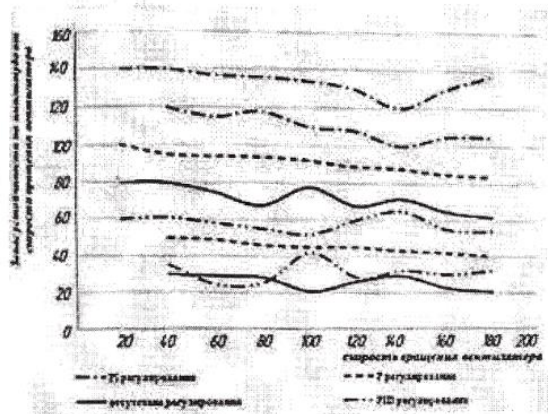
Рис. 7. Результаты моделирования переходных процессов реактивно-вентильных а) электродвигателе и б) генераторе

На основе переходных процессов в элементах структурной схемы функциональных связей определены их передаточные функции. На основе передаточных функций элементов структурной схемы функциональных связей, определяются их конструктивные и режимные параметры.

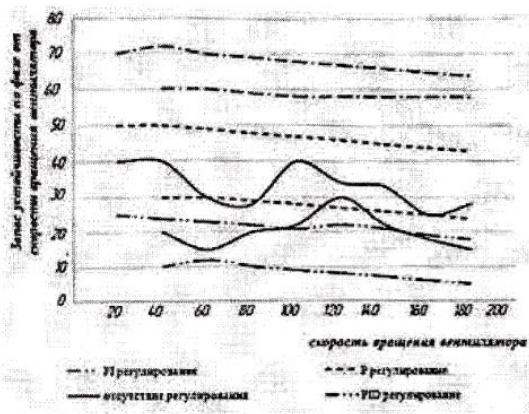
Структурное моделирование переходных процессов проводилось на основе уравнений движения и переходных функций элементов структуры (рис. 4) в MatLab.

Контур формирования управляющих воздействий установлен на подчинённое регулирование и настраивается на наибольшее быстродействие, чаще всего, на оптимум по модулю.

Применение регуляторов P, PI, PID для установленной структурной схемы определяет запас устойчивости по амплитуде, по фазе и времени регулирования, перерегулирования от скорости формирования управляющих воздействий и оценивает качество регулирования. На рис. 8 представлены результаты моделирования на программе MatLab - Simulink.



а. запас устойчивости по амплитуде



б. запас устойчивости по формированию управляющих воздействий

Рис. 8. Результаты применения регуляторов P, PI, PID

Анализ полученных результатов приводит к следующему выводу. Оценка запаса

устойчивости и качество регулирования через время регулирования, установившееся значение и перерегулирование при использовании регуляторов P, PI, PID по закону регулирования наиболее оптимален P регулятор.

На основании исследования математической модели динамики электромагнитных и тепловых процессов функциональных связей в комплексе и установленных зависимостей, учитывающих взаимное влияние скоростей подачи трансформаторного масла, вращения вентиляторов воздушного охлаждения и всасывающего вентилятора теплового воздушного потока обеспечивается устройством для использования энергии, выделяемого силовым трансформатором.

В четвертой главе, на основании разработанных технических решений механическая динамика реактивно-вентильного двигателя и нагрузки регулируются уравнением движения (13) и (14):

$$X(A, \omega) + Y(A, \omega)j = 0, \quad (13)$$

$$\begin{cases} X(A, \omega) = 0 \\ Y(A, \omega) = 0 \end{cases} \quad (14)$$

Разработан стенд и проведены исследования, основанные на минимуме расходуемых ресурсов числа испытаний, обеспечивающих получение требуемых показаний надёжности путём исследования функциональной избыточности. В качестве показателя функциональной избыточности в параметрической модели устройства генерации электроэнергии при торможении реактивно-вентильного электродвигателя и системы регулирования охлаждения силовой подстанции, принят коэффициент запаса (надёжности). Планирование эксперимента и предлагаемая методика соответствуют проведению в лабораторных условиях.

Производилась запись тока статора, изменение величины которого пропорционально изменению величины момента (рис. 9.) и угловой частоты вращения ЭП (рис. 10.). Сравнение результатов замеров и расчетов моделей показывает, что относительная погрешность не превышает 15%.

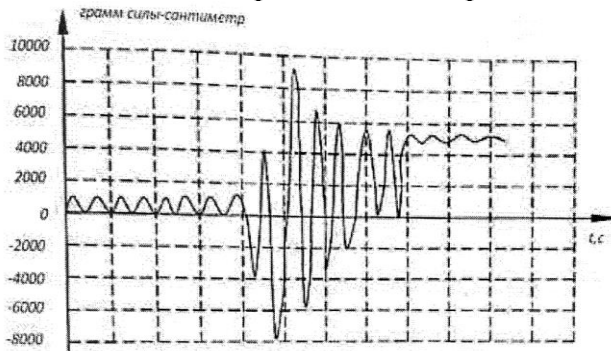


Рис. 9. Зависимость момента реактивно-вентильного электродвигателя от времени

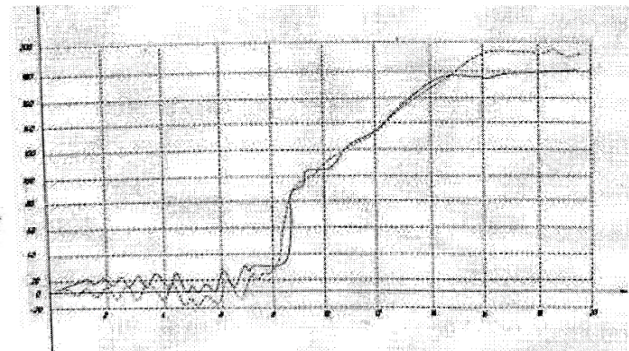


Рис. 10. Зависимость скорости реактивно-вентильного электродвигателя от времени
—— расчетные, ---- экспериментальные

Из рис. 9. видно, что момент реактивно-вентильного электродвигателя стабилизировался после не длинного пуска с номинальной угловой скорости 157 рад/с. Из этого мы можем сделать вывод о снижении до 25% мощности электродвигателя.

Результаты экспериментальных исследований, обработанных ЭВМ показаны на рис. 11, 12.

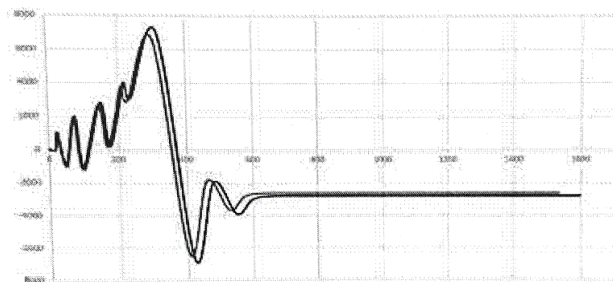


Рис. 11. Потребляемая мощность двигателя, работающего в генераторном режиме

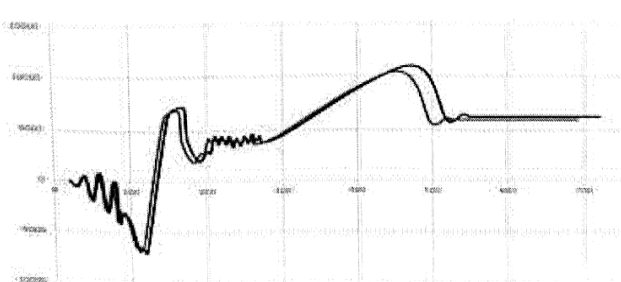


Рис. 12. Выбатываемая мощность двигателя, работающего в генераторном режиме

Расхождение между теоретическими и экспериментальными исследованиями не превышает 14,5%, что допустимо в инженерных расчетах.

Для оценки энергосберегающих характеристик и функциональной надежности системы охлаждения силового трансформатора и утилизации воздушного теплового потока использовалась тепловизионная съемка тепловизором NEC TH 9100WL с расширенным диапазоном до 2000 °С.

Проведено планирование эксперимента и разработана методика экспериментальных исследований по определению эффективности функционирования системы охлаждения силового трансформатора и утилизации воздушного теплового потока. Результаты экспериментов на силовом трансформаторе ТДЦ-250000/220 У1, установленном на подстанции «Металлургическая № 333» (г. Тула) Приокского предприятия магистральных электрических сетей «ФСК ЕЭС», приведены на рис. 13.

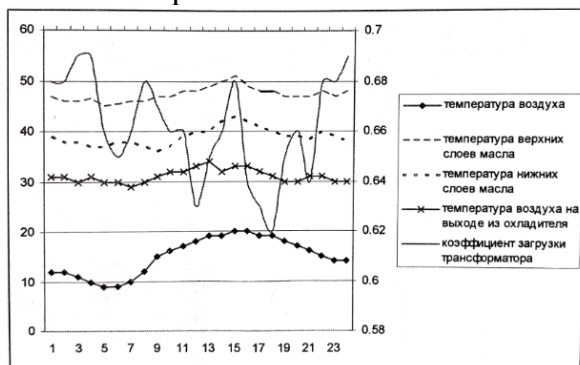


Рис. 13. Результаты экспериментальных исследований силового трансформатора ТДЦ-250000/220 У1 при функционировании системы «силовой трансформатор - охладитель - утилизация воздушного теплового потока - генерация электрической энергии - накопитель электрической энергии» при задании диапазона поддержания температуры верхних слоев масла 45 - 50 °С.

Экспериментальными исследованиями установлено правомерность зависимости (13) и величина $\eta=0,91$. Определение адекватности теоретических следований проводилось путем сравнения результатов численных и экспериментальных исследований (гл.3) и экспериментальных исследований показало, что расхождение между ними составило 10-14%.

Проведено физическое моделирование структуры системы контроля и управления ими, проведены экспериментальные исследования на основе критериев подобия и оценки правильности и эффективности результатов теоретических исследований и разработанных новых технических решений, где их эффективность достигла 20-25%, и, экспериментальные исследования подтвердили, что расхождения между расчётными и экспериментальными результатами исследований составили 14,5%, что допустимо в инженерных расчётах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой поставлена и решена задача обоснования рациональных параметров конструктивных схем и энергосберегающих режимов функционирования системы охлаждения силового трансформатора и утилизация воздушного теплового потока на основе установленных закономерностей эффективного управления реактивно-вентильными двигателями, учитывающих взаимное влияние скоростей вращения исполнительных органов их электромеханических систем, обеспечивающих также генерацию электрической энергии реактивно-вентильными генераторами, а также учитывающих функциональные связи ее элементов и функциональных моделей и топологии управления ими снижающих энергоемкость и повышающих надежность и эффективность их функционирования.

Основные научные и практические результаты работы заключаются в следующем:

1. Проведен анализ конструктивных схем и условий эксплуатации электромеханических систем охлаждения силового трансформатора и утилизации выделяемого ими теплового потока для создания комплексной энергосберегающей системы «силовой трансформатор - охладитель - утилизация воздушного теплового потока - генерация электрической энергии - накопитель электрической энергии».

2. Определены зависимости для расчета надежности и эффективности функционирования электромеханических систем исполнительных органов и системы управления ими, учитывающие их тангенс угла диэлектрических потерь в установленных в них характеристиках переходных процессов и режимах работы для повышения надежности и эффективности функционирования системы «силовой трансформатор - охладитель - утилизация воздушного теплового потока - генерация электрической энергии - накопитель электрической энергии».

3. Определены закономерности формирования топологии и управляющих воздействий на основе комплексного контроля режимных параметров электромеханических систем исполнительных органов вентиляторных и масляных насосных установок в системе «силовой трансформатор - охладитель - утилизация воздушного теплового потока - генерация электрической энергии - накопитель электрической энергии», связанных с реактивно-вентильными генераторами электрической энергии, и определены условия реализуемости для расчета их параметров, обеспечивающих требуемый уровень формирования переходных процессов.

4. Разработаны математические модели динамики электромагнитных и тепловых процессов в системе «силовой трансформатор - охладитель - утилизация воздушного теплового потока - генерация электрической энергии - накопитель электрической энергии», исследования которых позволяет определить исходные данные для формирования режимов работы электромеханических систем их исполнительных органов и рациональные законы управления в них переходными процессами.

5. Установлены зависимости для определения рациональных режимных параметров электромеханических систем исполнительных органов вентиляторных и масляных насосных установок и закономерности управления ими, учитывающие взаимное влияние скоростей подачи трансформаторного масла, вращения вентиляторов воздушного охлаждения и утилизации воздушного теплового потока, выделяемого силовым трансформатором.

6. Разработаны новое энергосберегающее техническое решение использования

энергии избыточного воздушного теплового потока, выделяемого силовым трансформатором и законы рационального управления реактивно-вентильным электроприводом электромеханических систем в системе «силовой трансформатор - охладитель - утилизация воздушного теплового потока - генерация электрической энергии - накопитель электрической энергии», в комплексе обеспечивающих энергосберегающие режимы за счет снижения потерь электрической энергии и использования тепла, выделяемого трансформатором.

7. Разработаны стенды на основе критериев подобия для оценки правильности разработанных новых технических решений и определенных их рациональных параметров, таких как физические модели электромеханических систем и оборудования для исследования переходных процессов в реактивно-вентильных двигателях и реактивно-вентильных генераторах.

8. Экспериментально подтверждена работоспособность и эффективность системы «силовой трансформатор - охладитель - утилизация воздушного теплового потока - генерация электрической энергии - накопитель электрической энергии», позволившая добиться уменьшения потерь электрической энергии при охлаждении трансформатора на 32% и использования тепла, выделяемого трансформатором, путем его утилизации на 45 - 65 % при условии поддержания нормированного уровня надежности функционирования системы «силовой трансформатор - охладитель - утилизация воздушного теплового потока - генерация электрической энергии - накопитель электрической энергии». Разработанная методика определения рациональных режимных параметров энергосберегающих электромеханических систем охлаждения силовых трансформаторов с утилизацией воздушного теплового потока, алгоритмы управления режимами работы их электромеханических систем и для использования энергии избыточного воздушного теплового потока выделяемого трансформатором внедрены в Приокском предприятии магистральных электрических сетей «ФСК ЕЭС» с годовым экономическим эффектом 3 млн. руб. на одно устройство.

Публикации по теме диссертации:

1. В.М. Степанов, А.Ю. Тимонин. Обобщенная структура электромеханической системы генерации электрической энергии с реактивно-вентильными двигателем и генератором для собственных нужд электрических подстанций / Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2019. №11. С. 32-35

2. В.М. Степанов, А.Ю. Тимонин. Формирование генерации электрической энергии при использовании воздушного теплового потока от силового трансформатора для собственных нужд электрических подстанций / Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2019. №11. С. 7-14

3. В.М. Степанов, А.Ю. Тимонин. Обобщенная структура системы генерации электрической энергии и ее резервирование с накопителем электрической энергии для собственных нужд электрических подстанций / Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2019. №11. С. 42-46

4. Тимонин А.Ю., Степанов В.М. Устройство для использования энергии избыточного воздушного теплового потока от силового трансформатора: пат. 2716817 Российская Федерация. 2020., Бюл. №8

5. В.М. Степанов, А.Ю. Тимонин. Анализ конструктивных схем электромеханических систем охлаждения и условий их эксплуатации / Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ,

2021. №6. -С. 342-346.

6. В.М. Степанов, А.Ю. Тимонин. Методы прогнозирования электромагнитных и тепловых процессов в силовых трансформаторах и расчета параметров электромеханических устройств их систем охлаждения / Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2021. №6. - С. 330-338.

Авторское редактирование

Подписано в печать 26.10.2021

Формат бумаги 70х100^{1/16}. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 1,6. Тираж 100 экз. Заказ_____

Отпечатано в Издательстве ТулГУ. 300012, г. Тула, пр. Ленина, 95