

На правах рукописи

КУЗЬМИН ВЯЧЕСЛАВ МАТВЕЕВИЧ

**ТРАНСФОРМАТОРЫ ДЛЯ УСТРОЙСТВ
ЭЛЕКТРОНАГРЕВА**

Специальность 05.09.01. – Электромеханика и
электрические аппараты

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание учёной степени
доктора технических наук

Томск – 2002

Работа выполнена на кафедре электромеханики
Комсомольского - на Амуре государственного технического университета.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор В.Я.Беспалов
доктор технических наук, профессор В.П.Обрусник
доктор технических наук А.И.Елшин

Ведущая организация – ВНИИФТИ “Дальстандарт”, г. Хабаровск.

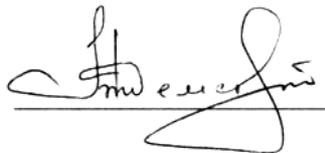
Защита диссертации состоится “ ____ ” июня 2002 г. в ____ часов на заседании диссертационного совета ДР 212.269.08 Томского политехнического университета по адресу: 634004, г. Томск, пр. Ленина, 30.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Томского политехнического университета

Автореферат разослан “ ____ ” _____ 2002 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета



Ю.Н.Дементьев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Производство тепловой энергии, как средство создания необходимых комфортных условий возникло в древнейшие времена и с тех пор является спутником человека на пути цивилизованного развития. Поэтому одной из наиболее важных и сложных проблем в развитии экономики является проблема энергосбережения, повышения эффективности производства тепловой энергии. В настоящее время горячее водоснабжение и обогрев жилых и промышленных помещений в крупных городах и промышленных центрах осуществляется с помощью таких источников тепловой энергии, как ТЭЦ, в небольших городах и поселках - с помощью котельных и печного отопления. Особенно остро стоит проблема получения тепла в небольших населенных пунктах и фермерских хозяйствах, удаленных от тепломагистрали жилых зданиях. Традиционные источники тепловой энергии обладают рядом существенных недостатков: низкий КПД, определенные сложности в доставке тепла потребителю и т.д. Необходимость строительства ТЭЦ и котельных в непосредственной близости от потребителя ухудшает экологическую обстановку в жилых микрорайонах. Поэтому представляет значительный интерес получение горячей воды и непосредственный обогрев таких объектов с помощью электронагрева, реализация которого не требует значительных капиталовложений, строительных работ и постоянного обслуживающего персонала.

Наиболее распространенными типами электронагревательных устройств являются установки, выполненные на основе трубчатых нагревательных элементов (ТЭН), электродные электроводонагреватели, электронагреватели с открытыми тепловыделяющими элементами и установки индукционного нагрева. Основными недостатками этих видов электроприборов являются их низкая надежность и недостаточный уровень безопасности в эксплуатации. Устранение указанных недостатков может быть достигнуто путем использования электронагревательных устройств трансформаторного типа. Они представляют собой понижающий трансформатор, первичная обмотка которого подключена к сети, а вторичная обмотка замкнута накоротко и является тепловыделяющим элементом.

Цель и задачи работы. Целью работы является разработка теории и создание новых видов трансформаторов для устройств электронагрева, обеспечивающих улучшение эксплуатационных показателей децентрализованных систем горячего водоснабжения и отопления.

В соответствии с указанной целью ставятся следующие задачи:

- разработка принципов формирования электронагревательных устройств на основе трансформаторов с короткозамкнутой вторичной обмоткой;
- анализ электромагнитных и тепловых процессов, разработка методик проектирования, определения параметров, электромагнитных и тепловых нагрузок, энергетических показателей;
- создание комплекса программ для расчета и проектирования трансформаторов с короткозамкнутой вторичной обмоткой, предназначенных для работы в качестве нагревательного элемента;
- выявление особенностей работы электронагревательных устройств в децентрализованных энергетических системах, разработка методов и устройств для питания и управления электронагревательными устройствами трансформаторного типа;
- выполнение комплекса работ по созданию, экспериментальному исследованию и освоению серийного производства новых типов электронагревательных устройств трансформаторного типа.

Методы исследований. Исследования проводились с использованием аналитических и численных методов расчета электромагнитных и тепловых полей, теории электрических цепей, теории обобщенного электромеханического преобразователя энергии, теплофизики, теории подобия, теории планирования эксперимента, физического моделирования, современных методов экспериментальных исследований.

Научная новизна работы заключается в том, что впервые выполнен комплекс теоретических и экспериментальных исследований, обеспечивающий создание и освоение серийного производства широкого спектра электронагревательных устройств трансформаторного типа, в частности:

- впервые разработаны принципы построения и предложены новые конструкции нагревательных элементов трансформаторного типа, обеспечивающих повышенный класс электробезопасности и высокую надёжность в эксплуатации;
- выявлены особенности работы трансформаторов с короткозамкнутой вторичной обмоткой в качестве нагревательных элементов;
- разработаны новые математические модели для анализа тепловых и электромагнитных процессов, учитывающие особенности конструкции и режимы работы как однофазных, так и трёхфазных трансформаторов, используемых в качестве нагревательных элементов;
- разработаны методики проектирования, определения рабочей частоты, параметров, размерных соотношений, электромагнитных и тепловых нагрузок трансформаторов с короткозамкнутой вторичной обмоткой, используемых в качестве нагревательного элемента трансформаторного типа;
- впервые сформулированы требования, предъявляемые к автономным системам энергообеспечения на основе нагревательных элементов трансформаторного типа, и разработаны принципы формирования таких систем;
- выявлены особенности работы электронагревательных устройств трансформаторного типа в децентрализованных энергетических системах, разработаны методы управления и устройства для питания электронагревательных устройств трансформаторного типа;
- в результате исследований выработаны рекомендации по использованию и проектированию специальных видов трансформаторов с короткозамкнутой вторичной обмоткой для установок электронагрева.
- показана эффективность использования трансформаторов с короткозамкнутой вторичной обмоткой в качестве нагревательных элементов. Впервые предложены и реализованы в масштабах серийного производства конструкции новых нагревательных устройств с нагревательными элементами трансформаторного типа мощностью от 0,5 до 200 кВт.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту.

1. Принципы формирования электронагревательных устройств на основе трансформаторов с короткозамкнутой вторичной обмоткой и новые конструкции нагревательных элементов трансформаторного типа, обеспечивающие высокие показатели безопасности и надёжности в эксплуатации;

2. Основы теории электромагнитных и тепловых процессов, протекающих в трансформаторах с короткозамкнутой вторичной обмоткой, работающих в качестве нагревательного элемента; комплекс программно-реализованных математических моделей для анализа электромагнитных и тепловых процессов, расчета и проектирования.

3. Комплекс теоретических и экспериментальных исследований электронагревательных устройств трансформаторного типа.

4. Результаты создания и серийного производства электронагревательных устройств трансформаторного типа, а также децентрализованных систем энергообеспечения на их основе.

Практическая ценность работы заключается в решении крупной научно-технической задачи по созданию нового энергетического оборудования для систем горячего водоснабжения и отопления, отвечающего современным требованиям и соответствующего уровню лучших мировых образцов, разработке и исследовании новых конструкций нагревательных элементов на основе трансформаторов с короткозамкнутой вторичной обмоткой, создании методик и алгоритмов электромагнитных и тепловых расчётов предложенных устройств и реализации их в виде пакетов прикладных программ, ориентированных на использование современных ЭВМ, разработке рекомендаций по выбору электромагнитных нагрузок и размерных соотношений для проектирования однофазных и трёхфазных трансформаторов с короткозамкнутой вторичной обмоткой различной мощности, создании макетных образцов и освоении серийного производства электронагревательных устройств на основе нагревательных элементов трансформаторного типа.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывалось и получило одобрение на Всесоюзной научно-практической конференции "Развитие и размещение производственных сил, и транспортное обеспечение Дальневосточного экономического региона на период до 2005 года", г. Хабаровск, 1984г.; конференции «Автоматизация электроприводов и оптимизация режимов электропотребления», г. Красноярск, 1985г.; научно-технических совещаниях в ЛитНИИ строительства и архитектуры, г. Каунас, 1986г.; Госплане Литовской ССР, г. Вильнюс, 1986г.; ВНИИЭТО, г. Москва, 1986г.; ВИТ, г. Запорожье, 1988г., 1990г.; межведомственной комиссии МЭТП, ВНИИ «Информэлектро», г. Москва, 1986г.; четырех дальневосточных региональных научно-практических конференциях "Совершенствование электрооборудования и средств автоматизации технологических процессов промышленных предприятий", г. Комсомольск-на-Амуре, 1986г., 1989г., 1992г., 1995г.; конференции по итогам выполнения МРНТП "Дальний Восток России" за 1993-1996 гг., г. Комсомольск-на-Амуре, 1996г.; научно-технической конференции «Механика твердого тела», г. Комсомольск-на-Амуре, 1997г.; Всесоюзной научно-технической конференции «Энергосберегающее электрооборудование для АПК», г. Москва, 1990г.; Республиканской научно-технической конференции «Электромеханические преобразователи и машинно-вентильные системы», г. Томск, 1991г.; трех Международных научно-технических симпозиумах «Научное и научно-техническое обеспечение экономического и социального развития Дальневосточного региона», г. Комсомольск-на-Амуре, 1993г., 1994г., 1999г.; региональной научно-технической конференции "Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири", г. Иркутск, 1994г.; 3-й Международной конференции "Новые энергетические системы и преобразование энергии" (NESSC'97), г. Казань 1997г.; Международной научно-технической конференции «Синергетика 2000. Самоорганизующиеся процессы в системах и технологиях», г. Комсомольск-на-Амуре, 2000г.; Международной научно-технической конференции «Электромеханические преобразователи энергии», г. Томск, 2001г.; Международной научно-технической конференции «Проблемы энергосбережения. Теплообмен в электротермических и факельных печах и топках», г. Тверь, 2001г.; научно-технических семинарах электротехнического факультета Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета, 1984-2001г.; научно-техническом семинаре кафедры электромеханики Томского политехнического университета, 2002г.

Реализация работы осуществлена в рамках межвузовской региональной научно-технической программы «Научно-технические и социально-экономические пробле-

мы развития дальневосточного региона России («Дальний Восток России») по проекту «Совершенствование преобразователей энергии, бытового и промышленного электрооборудования, направленное на применение и освоение производства предприятиями дальневосточного региона»; в соответствии с заказ-нарядом Е1286.594-3В14 ВПО «Союзтрансформатор» по теме «Исследование, разработка и освоение производства серии проточных электроводонагревателей мощностью 2-5 кВт»; ряда госбюджетных и хоздоговорных научно-исследовательских тем, выполняемых под руководством автора на кафедре электромеханики КнАГТУ. На новые технические решения получено 24 патента и свидетельства РФ.

Научные рекомендации и технические предложения автора использованы при разработке и освоении серийного производства на Биробиджанском заводе силовых трансформаторов однофазных и трехфазных электронагревателей мощностью от 0,5 до 200 кВт типов: ЭВАН-100/1,25Т1; ЭВАН-50/1,0 «Орель»; ЭВП-25/380; ЭВП-6/220; ЭВП-6/380; ЭНТ-16/380; ЭВП-50/500; ЭВП-100/500; ЭВП-200/500; ЭРГНТ-0,75/220; ЭРГУ-0,5/220 «Прогресс»; при разработке и созданию электрорадиатора трансформаторного типа ЭРГПС-0,75/220(ст) по заданию ОАО «Амурская ЭРА, г. Комсомольск-на-Амуре. Результаты теоретических и экспериментальных исследований, а также разработанная техническая документация и макетные образцы электронагревателей переданы в ЛитНИИ строительства и архитектуры, г. Каунас, ВНИИЭТО, г. Москва, ВИТ, г. Запорожье, ВНИИ «Информэлектро», г. Москва.

Результаты диссертационной работы используются в учебном процессе (специальность 230300 "Бытовые машины и приборы") при курсовом и дипломном проектировании, при чтении лекционных курсов "Бытовые машины и приборы", "Проектирование бытовых машин и приборов", "Бытовые электронагревательные устройства и приборы", в лабораторном практикуме и при проведении практических занятий по указанным курсам.

Созданные макетные образцы электронагревательных устройств трансформаторного типа экспонировались на Всероссийском выставочном центре (ВДНХ) в 1986, 1993 г.г.; на международных выставках в г. Шанхай, КНР (1996, 1997г.г.); на международной специализированной выставке «Российские наукоёмкие технологии и техника» в г. Харбине (КНР) (1996г.); региональных выставках в г.г. Хабаровск, Благовещенск, Комсомольск-на-Амуре (1996, 1997, 1998г.г.).

ПУБЛИКАЦИИ. По результатам исследований, отражённых в диссертационной работе, опубликована монография, учебное пособие, 72 научные работы, в том числе 22 патента и свидетельства Российской Федерации.

СТРУКТУРА РАБОТЫ. Диссертационная работа состоит из введения, семи разделов, заключения, библиографического списка из 216 наименований и 11 приложений. Она содержит 325 страниц машинописного текста и 128 рисунков.

Общий объем диссертации составляет 408 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, дана общая характеристика научной проблемы, поставлены цель и задачи, показана научная новизна, практическая ценность, апробация и реализация проведенных исследований. Приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первом разделе приведена классификация электронагревательных устройств и сделан обзор конструкций нагревательных элементов (НЭ) и приведена их классификация. При всём многообразии конструкций следует выделить основные группы НЭ (резистивные, электродные, индукционные и трансформаторного типа), которые нашли

наиболее широкое применение в промышленном производстве и в быту. Установлено, что элементы первой и второй групп обладают рядом существенных недостатков, ограничивающих область применения таких устройств. Этими недостатками являются низкий класс электробезопасности, невысокая надёжность и долговечность, а нагревательные элементы индукционного типа имеют низкий коэффициент мощности. В результате анализа производства и применения установок электронагрева в стране и за рубежом, прогнозов развития теплоэнергетики и тенденций развития технического уровня электронагревателей отмечено развитие разработок широкого спектра электронагревательных приборов. Такие приборы должны обеспечивать высокую степень защиты от поражения электрическим током, иметь простую и технологичную конструкцию, большой срок службы, невысокую стоимость, хорошие эксплуатационные и массогабаритные показатели, высокий КПД и коэффициент мощности.

Показано, что одним из наиболее эффективных путей повышения надёжности и безопасности систем децентрализованного горячего водоснабжения и отопления небольших промышленных и сельскохозяйственных предприятий и бытового сектора является применение в качестве нагревательных элементов однофазных и трёхфазных трансформаторов с короткозамкнутой вторичной обмоткой (КЗО), являющейся тепловыделяющим элементом.

1. *Во втором разделе* разработаны принципы построения электронагревательных устройств трансформаторного типа и сформулированы предъявляемые к ним требования. Общая классификация электронагревательных устройств трансформаторного типа представлена на рис. 1



Рис. 1. Классификация электронагревательных устройств трансформаторного типа.

По принципам построения нагревательные элементы устройства трансформаторного типа (НЭТ) могут быть подразделены на следующие группы:

2. По назначению: для низкотемпературного нагрева жидкостей; для низкотемпературного нагрева газов.

3. По типу индуктора (магнитопровод с первичной обмоткой): тороидальный; стержневой; пространственный; с вращающимся магнитным полем.

4. По взаимному расположению индуктора и вторичной обмотки: с расположением индуктора внутри вторичной обмотки; с расположением индуктора снаружи вторичной обмотки; с вторичной обмоткой, вращающейся относительно индуктора; с вынесенной нагрузкой.

5. По типу вторичной обмотки: короткозамкнутая обмотка; обмотка с пассивным элементом.

6. По исполнению вторичной обмотки: объемная; трубчатая; ленточная; волнообразная; гребенчатая; цилиндрическая; кольцевая.

7. По исполнению пассивного элемента вторичной обмотки: бифиляр; пассивный виток.

Тепловыделяющим элементом в таких конструкциях является вторичная обмотка трансформатора. Она должна отвечать следующим специфическим требованиям, которые часто противоречат друг другу:

- поверхность вторичной обмотки нагревательного элемента должна иметь достаточно большую площадь соприкосновения с нагреваемой средой для достижения минимального значения удельной поверхностной мощности.

- мощность, выделяющаяся с поверхности обмотки, не контактирующей с нагреваемой средой, должна быть минимальной для обеспечения максимально возможной величины КПД.

- обмотка должна быть короткозамкнутой, так при этом вся активная мощность, потребляемая электронагревателем из сети, отдается с поверхности обмотки в нагреваемую среду.

- конструкция вторичной обмотки должна исключать возможность соприкосновения первичной обмотки и магнитопровода с нагреваемой водой.

- индуктивность рассеяния вторичной обмотки должна быть минимальной для достижения максимально возможной величины коэффициента мощности устройства.

- для обеспечения требуемой безопасности при эксплуатации электронагревателя электродвижущая сила фазы вторичной обмотки не должна превышать величину 2...4 В.

- материал, из которого изготовлена обмотка, должен быть коррозионно-стойким и относиться к категории "пищевых" материалов (особенно для бытовых электронагревателей).

- конструкция и материал вторичной обмотки должны обеспечивать возможность изготовления и герметичного соединения деталей обмотки при использовании простых и дешевых методов (штамповка, сварка и т.п.).

- температура поверхности вторичной обмотки электроконвекторов трансформаторного типа не должна превышать значения 80...85 °С.

В работе предложены принципиально новые конструкции однофазных и трёхфазных трансформаторов, предназначенные для использования в качестве НЭ. НЭТ могут быть выполнены на основе однофазных трансформаторов (рис. 1) с тороидальным (рис.1 а, в) или стержневым (рис.1 б) магнитопроводом 1, на котором размещена первичная обмотка 2. Индуктор размещён внутри герметичной тороидальной камеры 3, которая является КЗ вторичной обмоткой и закрывает индуктор от проникновения воды. Вторичная обмотка со всех сторон омывается нагреваемой водой. Для увеличения

площади теплоотдающей поверхности нагревательного устройства вторичной обмотки она может быть изготовлена из токопроводящей ленты.

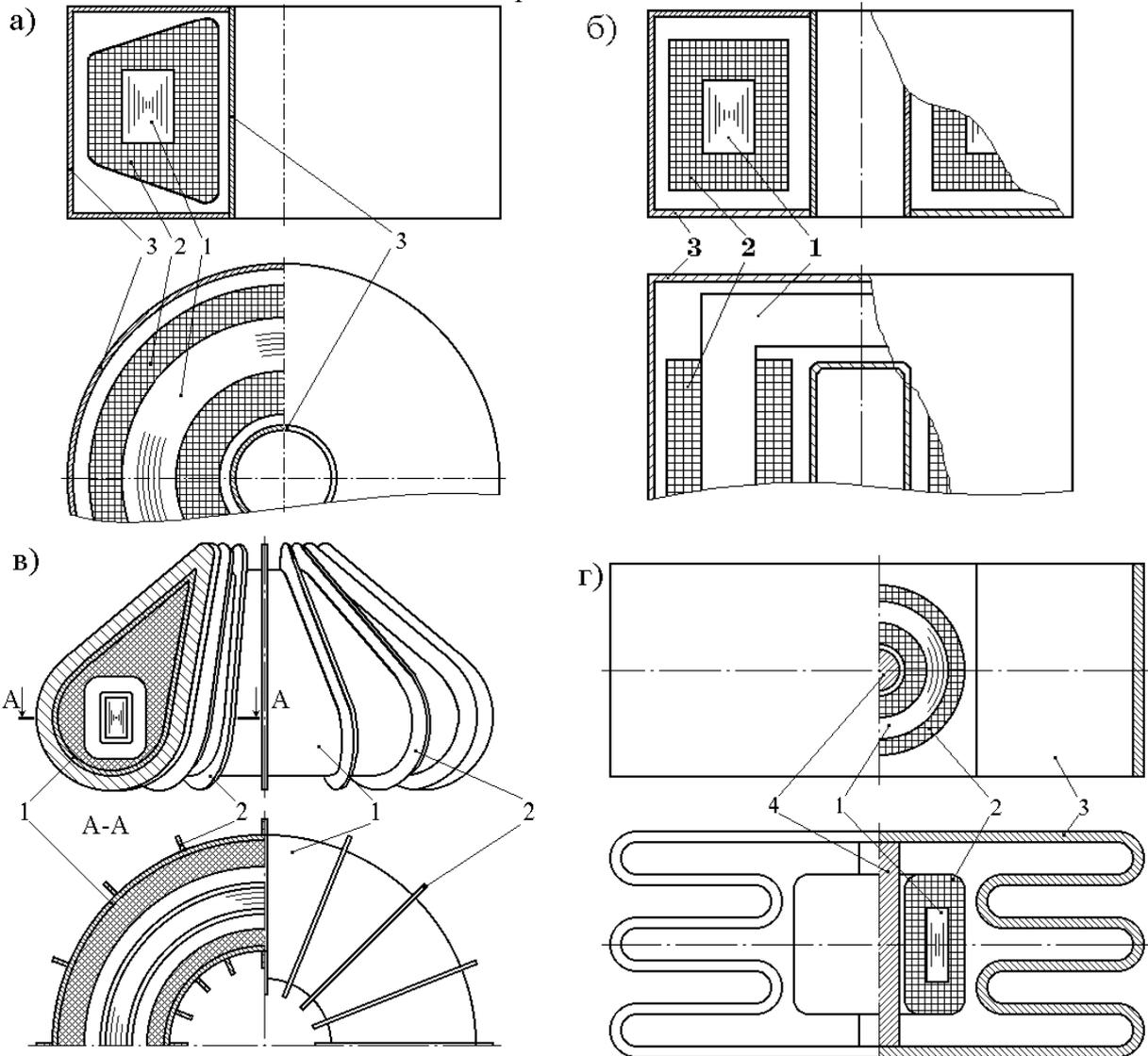


Рис. 1. Однофазные трансформаторы с короткозамкнутой вторичной обмоткой

Трехфазные электронагревательные элементы могут быть созданы на основе плоских стержневых шихтованных магнитных систем, широко используемых в трехфазных силовых трансформаторах. Магнитная система (сердечник) и первичная обмотка образуют индуктор нагревательного элемента, который подобен индуктору трехфазного силового трансформатора.

Короткозамкнутая вторичная обмотка цилиндрического типа (рис. 2) состоит из трех цилиндров 1, concentrically охватывающих первичные обмотки 2, боковины 3, охватывающей все три стержня 4 с обмотками и двух торцов (верхнего 5 и нижнего 6). Все части обмотки выполняются из металлических листов и соединяются между собой сваркой, образуя герметичную камеру, через которую пропускается нагреваемая вода и которая снабжается патрубками для входа и выхода воды.

Увеличение КПД электроводонагревателя с короткозамкнутой цилиндрической вторичной обмоткой возможно за счет ее размещения внутри кольцевого теплоизолированного резервуара, выполненного из диэлектрического материала.

Короткозамкнутая кольцевая вторичная обмотка (рис. 3) выполняется в виде полых электрически замкнутых колец, по которым пропускается нагреваемая вода. Кольца 1 концентрически охватывают стержень 2 с первичной обмоткой 3. На каждом стержне должно быть, по крайней мере, по одному кольцу. Кольца имеют патрубки для входа и выхода. Вода может пропускаться по кольцам параллельными или последовательными потоками.

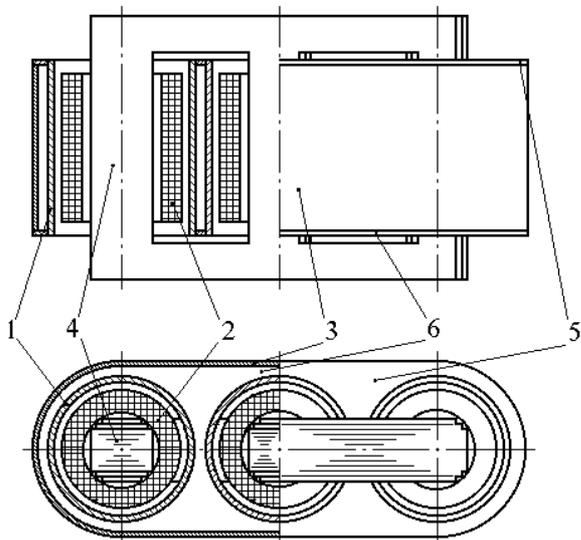


Рис.2

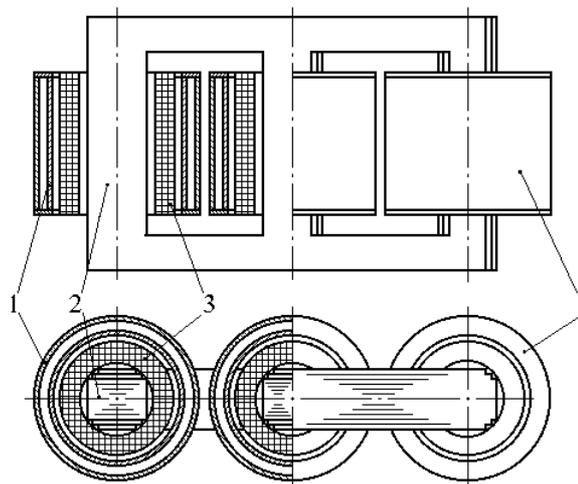


Рис. 3

В случае установки нагревательного элемента непосредственно в аккумуляторной емкости с водой, он может быть выполнен с вторичной обмоткой в виде металлического бака с переключками (рис. 4). Бак 1 снабжается дном 2 и крышкой 3, которые герметически закрывают индуктор 4 от проникновения воды. Две поперечные переключки 5, привариваемые изнутри к стенкам бака служат для замыкания фазных токов вторичной обмотки. В собранных нагревательных элементах эти переключки проходят через окна магнитопровода 6. Переключки водой не омываются. Поэтому для уменьшения выделяющейся в них тепловой мощности и для улучшения теплоотвода от них к стенкам бака и воде, их следует выполнять из более толстого листа, чем бак, а при возможности даже из материала с меньшим удельным электрическим сопротивлением.

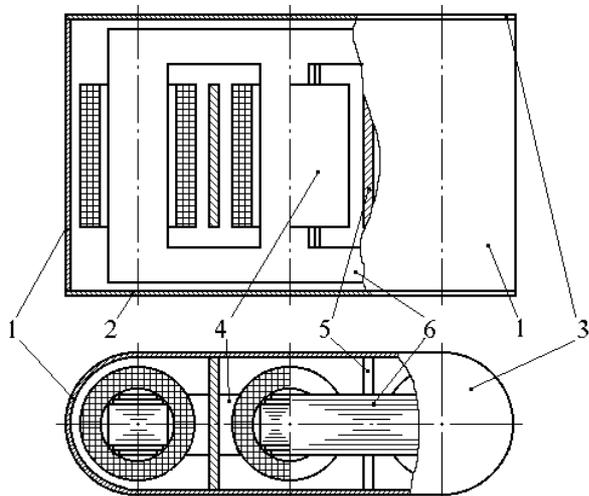


Рис. 4.

Одним из путей повышения эффективности короткозамкнутых вторичных обмоток является повышение скорости течения воды в канале вторичной обмотки, и, как следствие этого, увеличение коэффициента теплоотдачи в нагреваемую среду. Решение этой задачи обеспечивает использование короткозамкнутых трубчатых обмоток, выполненных из алюминиевых труб круглого или прямоугольного сечения. Расчеты показывают, что выполнение трубчатой обмотки в виде одного или нескольких обмоточных витков невозможно из-за малого активного сопротивления такого витка и высокой тепловой нагрузки вторичной обмотки. Разработано несколько вариантов конструкций короткозамкнутых трубчатых обмоток с увеличенной длиной витка: волнообразная обмотка; обмотка с бифиляром, намотанным на собственный стержень; обмотка с бифи-

ляром, намотанным по огибающей трех фаз; обмотка с пассивным витком. В тепловом отношении все типы трубчатых обмоток примерно одинаковы. Плотность теплового потока на внутренней поверхности вторичной обмотки невелика (менее 10 Вт/см^2), а коэффициент теплоотдачи в воду достаточно высокий. Температура вторичной обмотки невысока, а теплоотдача в воду происходит без кипения, только за счет конвекции.

Наилучшими эксплуатационными показателями обладает обмотка с пассивным витком, так как не имеет тупиковых подъемов и местных концентраций потерь.

Средняя скорость движения воды в трубчатой обмотке должна быть равна $0,08 \dots 0,11 \text{ м/с}$. При меньшей скорости уменьшается интенсивность теплоотдачи в воду, и повышается температура вторичной обмотки, а большая скорость не может быть получена за счет естественной циркуляции.

Электронагревательное устройство трансформаторного типа с пространственной магнитной системой (рис. 6) имеет магнитопровод, стержни 1 которого расположены в одной плоскости под углом 120° относительно друг друга и охвачены кольцевым ярмом 2. На стержнях размещена трехфазная первичная обмотка 3. Короткозамкнутая вторичная обмотка выполнена в виде трубок 4, предназначенных для прохождения нагреваемой жидкости, которые накоротко замкнуты на концах дисками 5. Трубки размещены между стержнями магнитопровода параллельно оси магнитной системы. Вторичная обмотка вместе с корпусной оболочкой 6 создает герметичную камеру, внутри которой размещен магнитопровод с первичной обмоткой.

Вследствие того, что конструкция электроводонагревателя герметична, он может использоваться как в качестве погружного, так и в качестве проточного. При этом вся тепловая мощность передается в нагреваемую жидкость, что обеспечивает максимальный коэффициент полезного действия устройства. К достоинствам этой конструкции следует отнести полную симметрию нагрузки фаз нагревателя, минимальное электромагнитное рассеяние вторичной обмотки, компактность, высокие энергетические, массогабаритные, стоимостные и технологические показатели.

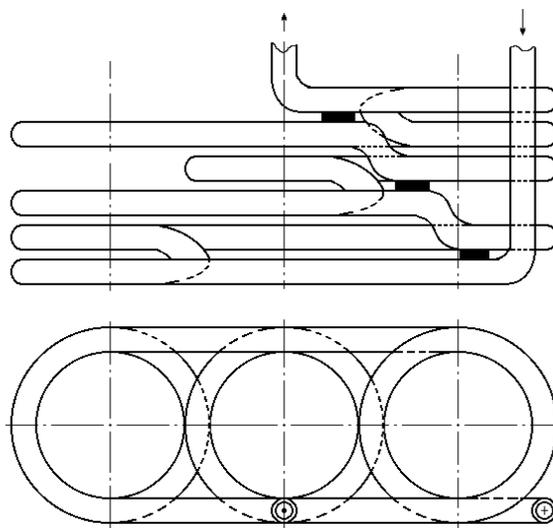


Рис. 5.

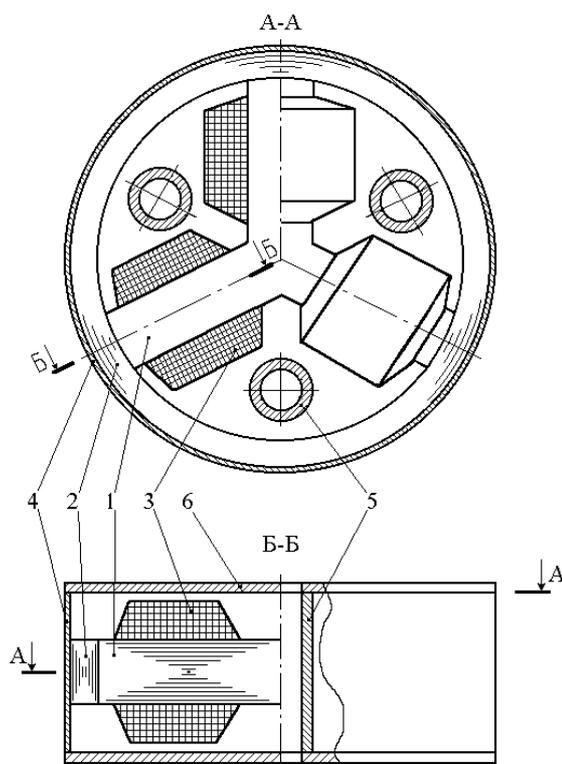


Рис. 6.

Электронагревательные устройства трансформаторного типа с вращающимся магнитным полем могут служить основой для создания нагревателя с вращающимся тепловыделяющим элементом. На рис. 7 показана конструктивная схема такого нагревателя. Шихтованный магнитопровод 1 из электротехнической стали имеет пазы, в которые уложена первичная обмотка 2 из алюминиевых или медных проводников. Маг-

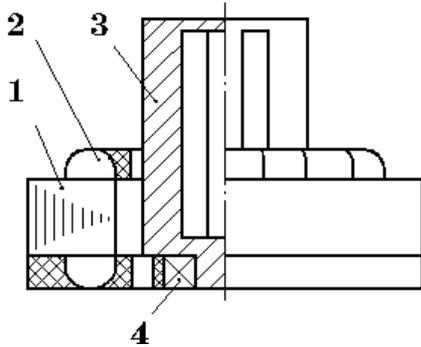


Рис. 7.

нитопровод и первичная обмотка образуют каркас нагревателя. Вторичная обмотка 3 является тепловыделяющим элементом и изготавливается из стержней, которые соединены между собой с помощью замыкающих соединений. В нижней части вторичной обмотки имеется опора 4, позволяющая этой обмотке свободно вращаться относительно каркаса.

Следует отметить, что вращение будет происходить при больших значениях скольжения, обусловленных повышенными потерями мощности во вторичной обмотке. Такая конструкция может

служить основой для создания бытовых и промышленных тепловентиляторов. Скорость вращения можно регулировать с помощью полупроводниковых регуляторов.

В децентрализованных системах энергообеспечения с повышенными требованиями к условиям безопасности и надежности в работе часто приходится применять дополнительные меры. В случае, когда применяются электронагревательные устройства трансформаторного типа, может быть использована «вынесенная нагрузка». В нагревателях с вынесенной нагрузкой короткозамкнутая вторичная обмотка выполняется таким образом, что основная доля мощности выделяется в той её части, которая удалена от индуктора и непосредственно контактирует с нагреваемой средой. Этот элемент вторичной обмотки должен иметь большую площадь теплоотдающей поверхности. Часть вторичной обмотки, охватывающая магнитопровод с первичной обмоткой, обычно изолируется от нагреваемой среды и проектируется так, чтобы в ней выделялся минимум тепловой мощности.

В третьем разделе рассматриваются особенности электромагнитных процессов и расчета параметров трансформаторов с короткозамкнутой вторичной обмоткой для устройств электронагрева.

Особенностями исследуемых трансформаторов является наличие короткозамкнутой одновитковой обмотки с большой и неравномерно распределенной по длине витка плотностью тока. Причём режим короткого замыкания является нормальным режимом работы таких устройств. В короткозамкнутой вторичной обмотке сосредоточена большая часть потерь мощности нагревательного элемента. Обмотка имеет воздушное или водяное охлаждение с естественной или искусственной конвекцией. В связи с этим, существующие рекомендации по выбору электромагнитных нагрузок и размерных соотношений не подходят для расчёта нагревательных элементов трансформаторного типа, и требуется иной подход при проектировании. Важным является то, что практически все тепловые потери трансформатора расходятся на нагрев, то есть по прямому назначению, поэтому тепловой коэффициент полезного действия можно принять равным 1.

В классических трансформаторах коэффициент полезного действия (КПД) определяется отношением активной мощности, отдаваемой в нагрузку к потребляемой активной мощности. Для трансформаторов с короткозамкнутой вторичной обмоткой использование такого понятия неприемлемо, так как вся активная мощность, передаваемая во вторичную обмотку, расходуется на ее нагрев, а КПД в режиме короткого замы-

кания равен нулю. Поэтому для рассматриваемого класса устройств целесообразно использовать понятие «электромагнитный КПД»

$$\eta_{\text{эм}} = \frac{P_{\text{эм}}}{P_1}, \quad (1)$$

где $P_{\text{эм}} = mE_2I_2 = mI_2^2r_2$ – электромагнитная мощность короткозамкнутого трансформатора; P_1 – потребляемая мощность; m - число фаз; E_2 – электродвижущая сила вторичной обмотки; I_2 – ток вторичной обмотки; r_2 – активное сопротивление вторичной обмотки.

Так как потери мощности в обмотках и сердечнике короткозамкнутых трансформаторов могут быть использованы по прямому назначению, то есть на производство тепловой энергии, возможно их увеличение. Следовательно, электромагнитный КПД может быть меньше, чем у классических трансформаторов и допустимо завышение электромагнитных нагрузок, а тепловой коэффициент полезного действия можно принять равным 1.

Короткозамкнутые обмотки для электронагрева могут быть установлены и на электромеханических преобразователях энергии, имеющих обмотки традиционных конструкций и назначения. Такое техническое решение может быть использовано на трансформаторах для тупиковых трансформаторных подстанций. В этом случае, мощность, подводимая к подстанции, расходуется как для обеспечения потребителя как электрической, так и тепловой энергией. Такие устройства могут также использоваться как балластный элемент системы электроснабжения. В электрических тепловентиляторах с короткозамкнутыми тепловыделяющими обмотками, энергия, переданная в обмотку ротора, расходуется как на нагрев, так и на вращение ротора.

Все эти особенности необходимо учитывать при разработке новых подходов при анализе процессов и проектировании таких устройств.

Электромагнитные процессы в электронагревательных устройствах трансформаторного типа с m неподвижными обмотками на статоре и n обмотками на роторе, вращающимися с частотой ω_p , могут быть описаны системой дифференциальных уравнений обобщенного электромеханического преобразователя энергии, записанными в ортогональной системе координат $\alpha; \beta$.

Из модели можно получить модели всех основных типов электронагревательных устройств трансформаторного типа. Отличительной чертой, объединяющей все модели электронагревателей, выполненных на основе трансформаторов с короткозамкнутой вторичной обмоткой, является наличие в модели, как минимум, одной обмотки с напряжением $u = 0$. Математические модели электронагревателей, выполненных на основе трансформаторов с неподвижными обмотками и традиционными конструкциями индуктора, имеют обмотки, расположенные только по одной из осей и $\omega_p = 0$. Математические модели электронагревателей с пространственной магнитной системой и вращающимся магнитным полем имеют обмотки, как по оси α , так и по оси β . Электронагреватели с вращающимися короткозамкнутыми обмотками представляются моделями с $\omega_p \neq 0$. Например, однофазный электронагреватель на основе тороидального трансформатора представляется математической моделью, состоящей только из двух неподвижных обмоток $w_{1\alpha}^s$ и $w_{2\alpha}^s$, при этом $\omega_p = 0$; $u_{2\alpha}^s = 0$.

Реальный вторичный контур имеет один виток, но на модели вторичная обмотка w_2 предполагается приведенной к числу витков первичной обмотки с коэффициентом трансформации W_1 . Для учета магнитных потерь в стали сердечника в переходных ре-

жимах вводится в рассмотрение короткозамкнутая фиктивная обмотка w_3 , расположенная на сердечнике.

В качестве примера (рис. 7) приведены расчетные кривые изменения во времени относительных значений магнитного потока $\Phi_* = f(t)$ и тока первичной обмотки $i_{1*} = f(t)$ электронагревателя при $\varphi_0 = \pi/6$ в холодном состоянии (20°C).

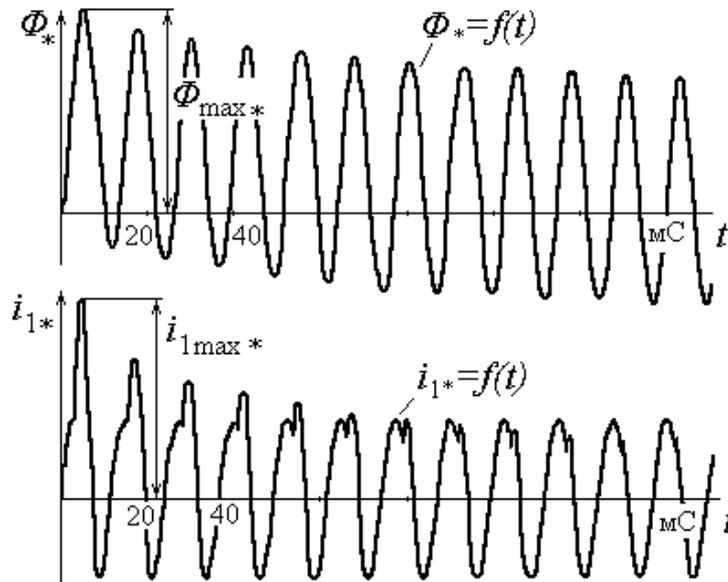


Рис.7. $\Phi_{\max*} = 1,71$, $i_{1\max*} = 3,38$.

Расчеты показали, что максимальный бросок тока включения $i_{1\max}$ сильно зависит от начальной фазы напряжения φ_0 . В кривой тока включения наблюдаются нагрузочная и намагничивающая составляющие. Нагрузочный ток ввиду малости индуктивностей рассеяния практически сразу принимает установившийся синусоидальный характер и не зависит от φ_0 .

Намагничивающий ток при включении сильно зависит от начальной фазы напряжения. При $\varphi_0 = 0$, когда напряжение в момент включения переходит через нуль, броски тока максимальны и достигают 4...6 кратного значения по сравнению с амплитудой номинального тока. При $\varphi_0 = \pi/2$, когда напряжение проходит через максимум, намагничивающий ток сразу достигает установившихся значений с небольшой амплитудой. Поэтому при $1/3\pi < \varphi_0 < 2/3\pi$ броски тока включения практически не превосходят амплитуду номинального тока.

Электронагреватели обычно комплектуют электронными терморегуляторами или регуляторами мощности, которые осуществляют достаточно частое повторно-кратковременное включение нагревательного элемента с длительностью цикла от нескольких десятков секунд до нескольких минут. Для предотвращения перегрева первичной обмотки индуктора, выхода из строя силовых элементов электронных регуляторов, а также ложного срабатывания элементов защиты питающих сетей необходимо ограничивать броски тока при включении. Поэтому схемы регуляторов должны обеспечивать их включение в момент времени, соответствующий максимальному значению напряжения питающей сети.

Вторичные обмотки рассматриваемых трансформаторов, как правило, выполнены в виде объемного полого короткозамкнутого витка большого сечения. Форма такого витка может быть достаточно сложной. Такие обмотки изготавливаются либо из листового токопроводящего материала, либо из металлических труб. Индуктивное сопротивление рассеяния короткозамкнутых обмоток в большинстве

случаев относительно невелико, оказывает незначительное влияние на величину коэффициента мощности трансформатора и может быть определено по известным методикам, однако, в ряде случаев требуется корректировка традиционных методик. Это обусловлено спецификой материала и формы короткозамкнутого витка, неравномерностью распределения тока по его длине, а также особенностями проявления эффекта вытеснения тока.

Указанные факторы оказывают существенное влияние и на величину активного сопротивления вторичной обмотки. При расчете и проектировании короткозамкнутых трансформаторов особое значение имеет определение активного сопротивления вторичной обмотки, так как именно на этом сопротивлении выделяется полезная мощность трансформатора. Расчет активного сопротивления алюминиевых обмоток, имеющих относительно простую форму, может быть выполнен с использованием аналитических методов. Определение параметров обмоток сложной формы, а также обмоток, выполненных с использованием ферромагнитных материалов, осуществляется на основе анализа их электромагнитного поля и требует применения ЭВМ.

Активное сопротивление вторичной обмотки сложной формы r_2 может быть представлено суммой сопротивлений r_{2i} отдельных последовательно соединенных между собой элементов относительно простой формы: лента, лист, цилиндр, труба, диск, кольцо, тор, конус и т.д.

При этом сопротивление каждого элемента определяется с учетом проявления эффекта вытеснения тока и неравномерности распределения плотности тока по длине l элемента, обусловленной формой элемента и особенностями токоподвода к элементу. Представляя сопротивление реальной обмотки в виде суммы сопротивлений

бесконечного числа её элементарных участков $r = \int_{l_1}^{l_2} dr$, где $dr = \rho \frac{dl}{S(l)}$ - активное

сопротивление элементарного участка, можно аналитически определить степень увеличения активного сопротивления за счет неравномерности распределение плотности тока в таких элементах.

Короткозамкнутая вторичная обмотка может содержать элементы, имеющие форму гофрированного тепловыделяющего корпуса (ТВК), замкнутого через центральную цилиндрическую шину. В этом случае на распределение плотности тока и, как следствие, на величину сопротивления элемента обмотки, оказывают влияние условия токоподвода к элементу обмотки. Степень увеличения активного сопротивления за счет неравномерности распределение плотности тока в таких элементах можно оценить на основе анализа их электрического поля.

Благодаря симметрии конструкции электрическое поле ТВК электрообогревателя является осесимметричным и описывается двухмерным уравнением в прямоугольной системе координат

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} = 0, \quad (2)$$

где U - электрический потенциал.

Расчетная область ограничивается четвертой частью сечения корпуса плоскостью XOY (рис. 8).

Внешняя поверхность вторичной обмотки омывается воздухом или водой и для нее выполняются граничные условия второго рода:

Анализ распределения электрического поля и определение активного сопротивления r_2 вторичной обмотки (тепловыделяющего контура) с центральной шиной прямоугольного сечения проводились по аналогии с расчетами для обмотки с центральной цилиндрической шиной.

В результате расчетов установлено, что на величину сопротивления вторичной обмотки, выполненной в виде гофрированного тепловыделяющего корпуса (ТВК), замкнутого через центральную шину, наибольшее влияние оказывают условия токоподвода от шины к ТВК.

Степень концентрации тока на участках ТВК, расположенных в непосредственной близости к центральной шине и увеличение относительного значения активного сопротивления в основном определяются: геометрическими соотношениями ширины B корпуса и радиуса R центральной цилиндрической шины (рис. 9); соотношениями размеров центральной шины прямоугольного сечения b/C и тепловыделяющего корпуса A/C (рис. 10). С увеличением отношений B/R и A/C значение сопротивления r_{2*} возрастает, хотя и не в значительной степени.

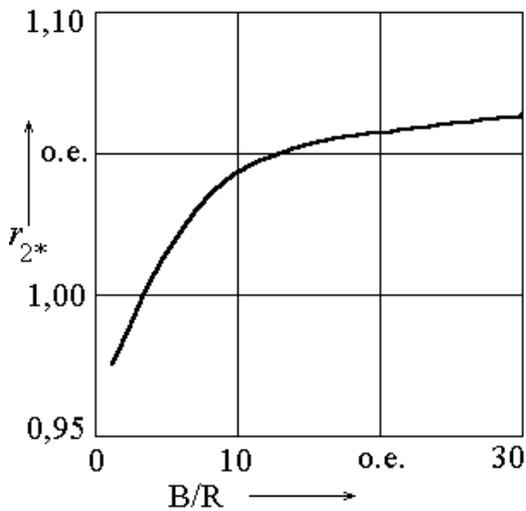


Рис. 9.

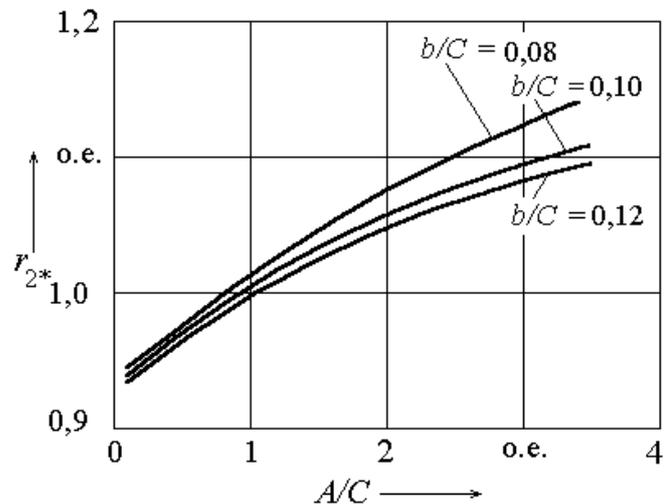


Рис.10.

Получены соотношения, позволяющие достаточно просто определить величину относительного значения активного сопротивления короткозамкнутой вторичной обмотки (табл. 1). Предлагаемые методики расчета могут быть применены и при определении активного сопротивления токопроводящих участков любой другой формы.

Учет эффекта вытеснения тока при расчете сопротивления короткозамкнутых обмоток осуществляется на основе анализа электромагнитного поля в электропроводящем листе при протекании переменного тока. Определены коэффициенты увеличения активного и полного сопротивления, а также коэффициент мощности проводника (элемента) вторичной обмотки, обусловленные вытеснением тока:

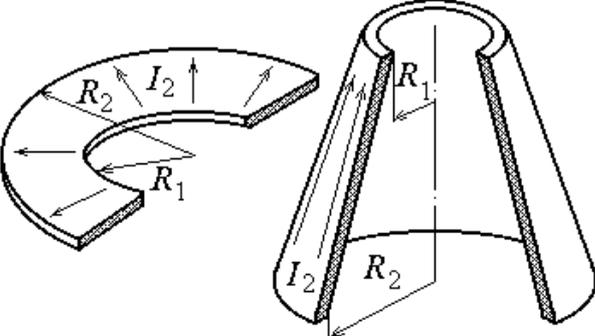
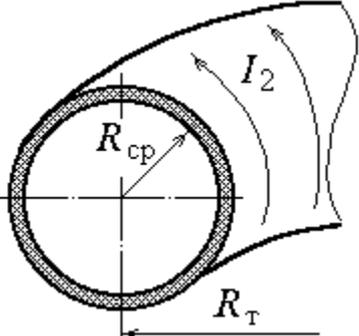
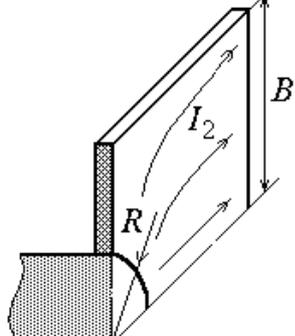
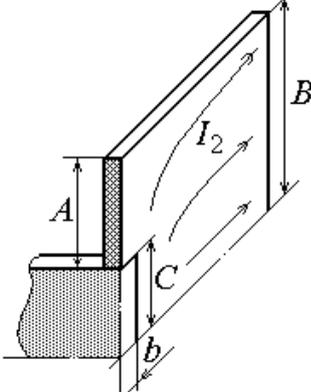
$$k_r = \frac{r_2}{r_{2l}}; \quad K_r = \frac{Z_2}{r_{2l}};$$

$$\cos \varphi_2 = \frac{r_2}{Z_2}, \text{ где } r_{2l} - \text{сопротивление проводника постоянному току, приходящееся на}$$

единицу длины элемента вторичной обмотки (рис.11). Расчеты, проведенные с учетом реальных значений электрической проводимости и магнитной проницаемости, для проводников, выполненных из конструкционной стали (Ст.3) и сплава АМг-5, показали что эффект вытеснения тока практически не влияет на величину сопротивления проводников из сплава АМг-5 ($\mu = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м). Для проводников из конструкционной

стали влияние вытеснения тока ярко выражено, особенно при толщине листа более 0,5 мм (см. рис. 11). Магнитная проницаемость стали определялась по реальной кривой намагничивания $\mu=f(I\Phi_m)$ для листов толщиной от 0,5 до 3,0 мм.

Таблица 1

Форма элемента обмотки	Относительное значение активного сопротивления
	$r_{2*} = \frac{(R_1 + R_2)}{2(R_1 - R_2)} \ln \frac{R_2}{R_1}$
	$r_{2*} = \frac{R_r}{\sqrt{R_r^2 - R_{cp}^2}}$
	$r_{2*} = 0,0256 \ln \frac{B}{R} + 09801$
	$r_{2*} = 0,0173 \left(\frac{b}{C} \right)^{-0,59} \ln \left(\frac{A}{C} \right) + 0,923 \left(\frac{b}{C} \right)^{-0,0423}$

Приведенные на рис. 11 зависимости с достаточной степенью точности (99,8%) определяются следующими выражениями:

$$k_r = 0,1373\Delta^2 - 0,2418\Delta + 1,0982;$$

$$K_r = 0,4004\Delta^2 - 0,2794\Delta + 1,0167; \quad (8)$$

$$\cos \varphi_2 = 0,0753\Delta^3 - 0,3506\Delta^2 + 0,1936\Delta + 0,978.$$

Исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод, что для изготовления короткозамкнутой вторичной обмотки можно использовать алюминий и его сплавы, а также конструкционную сталь толщиной не более 0,8...1,0 мм. При использовании стали с большей толщиной, значительно возрастает индуктивная составляющая сопротивления вторичной обмотки, что приводит к росту потребляемой реактивной мощности и снижению коэффициента мощности всего устройства.

В четвертом разделе приведены результаты исследований тепловых процессов в трансформаторах для устройств электронагрева.

Исследование теплового состояния нагревательного элемента позволяет выявить особенности тепловых процессов, оценить правильность выбора электромагнитных нагрузок и режимов работы, выработать рекомендации по совершенствованию конструкции, выбору материалов и т.д.

Исследование тепловых режимов различных электротехнических устройств основывается либо на решении уравнения теплопроводности при определенных идеализирующих допущениях, либо на использовании формальной аналогии между электрическими и тепловыми процессами. Последний способ, известный как метод тепловых схем замещения, получил широкое распространение при расчете и проектировании электротехнических устройств из-за простоты, что особо важно для конструкций, отличающихся сложной схемой процесса теплообмена.

В основе решения задачи лежит закон Фурье, записанный в форме, аналогичной закону Ома в электротехнике $Q_x = \frac{\Delta T}{R_x}$, где Q_x - тепловой поток в направлении x ; $\Delta T = T_1 - T_2$ - перепад температур (термический потенциал); R_x - термическое сопротивление в направлении x .

В случае передачи тепла теплопроводностью термическое сопротивление определяется как $R_x = \frac{\delta_x}{\lambda S}$, где δ_x - толщина стенки в направлении теплового потока, S - площадь поверхности теплообмена, λ - коэффициент теплопроводности стенки. При конвективном теплообмене термическое сопротивление определяется из выражения $R_x = \frac{1}{\alpha_x S_x}$, где α_x - коэффициент конвективной теплоотдачи (КТО) на поверхности раздела жидкого и твердого тела; S_x - площадь поверхности омываемой жидкостью.

Учитывая, что сумма перепадов температуры вдоль замкнутого контура схемы замещения равна нулю, для каждого из контуров можно составить уравнение

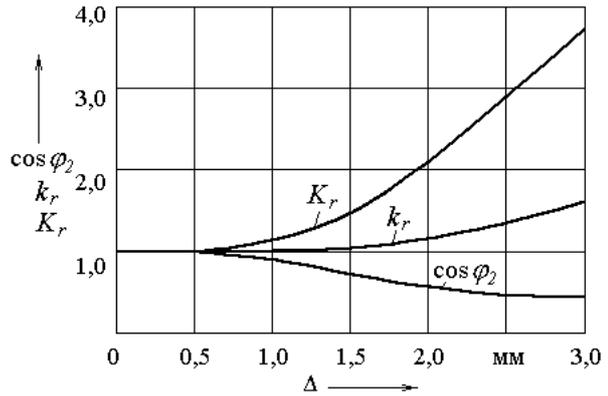


Рис. 11.

$\sum_{i=1}^n R_i Q_i = 0$, где Q_i и R_i - тепловой поток и термическое сопротивление i -й ветви в выбранном контуре соответственно.

Дополнительным условием, используемым при составлении математической модели процесса теплообмена, является тот факт, что при стационарных режимах в узлах схемы замещения не может происходить накопления энергии, тогда

$$P_k = \sum_{i=1}^n Q_{ki}, \text{ где } P_k - \text{ мощность } k\text{-го элементарного теплового источника; } Q_{ki} -$$

тепловой поток i -й ветви, отходящей от k -го теплового источника.

Коэффициент конвективной теплоотдачи $\alpha = \frac{\lambda \text{Nu}}{l}$, где Nu - критерий Нуссельта; l - характерный размер системы. Характерный размер системы в случае гидравлического канала в водонагревателе определяется для каждого участка канала как эквивалентный диаметр соответствующего участка $D_\vartheta = \frac{4F}{\Pi}$, где F - площадь потока жидкости в сечении участка канала; Π - смоченный периметр.

Характерный размер системы в случае теплопередачи от внешней поверхности бака в неограниченное пространство определяется высотой бака.

Критерий Нуссельта Nu при вынужденной конвекции связан с характером движения жидкости и ее теплофизическими свойствами, которые определяются

числами Рейнольдса $\text{Re} = \frac{\rho v D_\vartheta}{\mu}$, где ρ - плотность нагреваемой жидкости; v -

скорость движения жидкости; μ - динамическая вязкость жидкости, и Прандтля

$$\text{Pr} = \frac{\mu c_p}{\lambda}, \text{ где } c_p - \text{ удельная теплоемкость жидкости.}$$

Для турбулентного потока воды в гидравлическом канале водонагревателя

$$\text{Nu} = 0,021 \text{Re}^{0,8} \text{Pr}_m^{0,43} \left(\frac{\text{Pr}_m}{\text{Pr}_s} \right)^{0,25}.$$

Индексы m и s означают, что величины, характеризующие теплофизические свойства, выбираются по среднему значению температуры жидкости и стенки соответственно.

При определении теплового сопротивления теплопередачи свободной конвекцией от внешней поверхности бака в неограниченное пространство число Нуссельта рассчитывается из условия

$$\text{Nu}_f = 0,8 (\text{Gr}_f \text{Pr}_f)^{0,25} \left[1 + \left(1 + \frac{1}{\sqrt{\text{Pr}_f}} \right)^2 \right]^{-0,25},$$

где Gr - число Грасгофа, характеризующее действие гидростатической подъемной силы и силы вязкости жидкости при конвекции. Индекс f здесь показывает на то, что все физические свойства должны определяться при $T_f = (T_s + T_\infty)/2$. При этом следует отметить, что ламинарная конвекция имеет место, когда $10^4 < \text{Gr}_f \text{Pr}_f < 10^9$. При $\text{Gr}_f \text{Pr}_f < 10^4$ влияние конвекции на теплообмен незначительно.

Тепловой расчет однофазного тороидального трансформатора для проточного электроводонагревателя следует проводить при следующих допущениях:

- режим течения потока принимается турбулентным ввиду сложной геометрической формы канала для протекания жидкости;
- коэффициенты теплопроводности изоляционных материалов, материала корпуса бака и водоразделяющего кожуха в водонагревателе считаются неизменными в широком диапазоне температур и равными значениям соответствующих коэффициентов при 20 °С;
- форма внешнего корпуса электроводонагревателя принимается цилиндрической с площадью основания, равной площади основания реального корпуса.

Эквивалентная тепловая схема замещения трансформатора может быть представлена в виде, изображенном на рис. 12. На схеме приняты следующие обозначения: P_1 -магнитные потери в тороидальном магнитопроводе; $P_2 - P_5$ - основные электрические потери в первичной обмотке; $P_6 - P_9$ - мощности, выделяющиеся в объемном короткозамкнутом витке (вторичной обмотке), определенные соответственно для четырех элементарных поверхностей; R_1-R_4 - тепловые сопротивления изоляции между сердечником и первичной обмоткой; R_5-R_8 - тепловые сопротивления вдоль проводников первичной обмотки между элементарными участками; R_9-R_{12} - тепловые сопротивления изоляции между обмотанным сердечником и внутренней поверхностью вторичной обмотки; $R_{13}-R_{16}$ - тепловые сопротивления вдоль вторичной обмотки между элементарными участками теплоотдающей поверхности; $R_{17}-R_{19}$ - тепловые сопротивления между соответствующими участками теплоотдающей поверхности нагревательного элемента и воздухом; R_{20} - тепловое сопротивление между поверхностью выходной трубки и нагреваемой средой; Q_1, Q_2, \dots, Q_{20} - тепловые потоки в соответствующих элементах конструкции водонагревателя или их частях.

Разработана эквивалентная тепловая схема замещения для расчета теплового состояния аккумуляционных электронагревательных устройств, учитывающая наличие вынесенной нагрузки и особенности аккумуляционного режима работы.

Порядок расчета тепловой схемы замещения трансформатора имеет итерационный характер, причем на каждой итерации должны рассчитываться среднemasовые температуры воды в участках гидравлического канала, температуры соответствующих поверхностей элементов конструкции и, в конечном счете, новые значения теплофизических параметров воды, которые являются исходными на последующей итерации. Указанный итерационный процесс является сходящимся, при завершении которого определяются точные значения температур и величин перегревов. Для ускорения сходимости применяется не простая итерация, а релаксационный

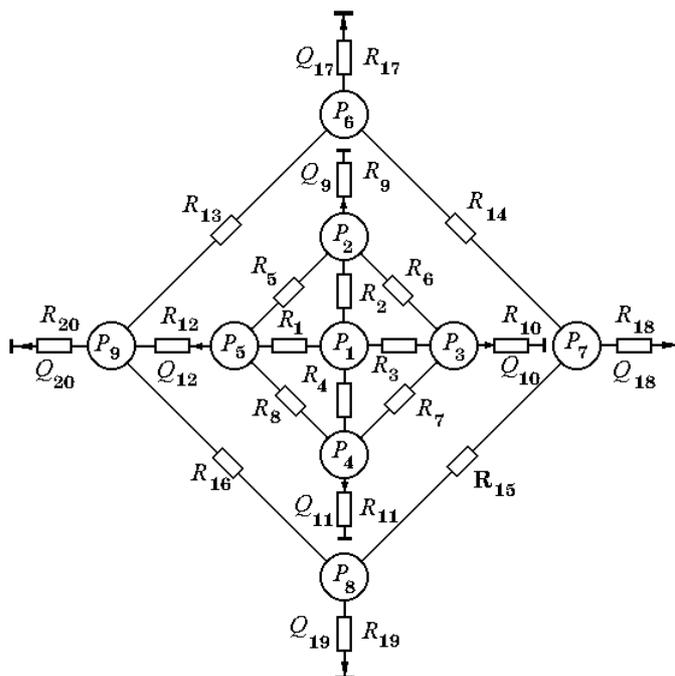


Рис.12.

процесс, при котором коэффициенты теплоотдачи для последующего $(n+1)$ -го итерационного шага вычисляются по формуле

$$\alpha^{(n+1)} = \alpha^{(n)} + U_p \left(\alpha^{(n+\frac{1}{2})} - \alpha^{(n)} \right),$$

где $\alpha^{(n)}$, – значение коэффициента теплоотдачи на предыдущем шаге; $\alpha^{(n+\frac{1}{2})}$ – уточненное значение коэффициента теплоотдачи; $U_p = 0,2 \dots 0,6$ – коэффициент релаксации. Итерационный процесс заканчивается, если достигается заданная точность $|T_i^{(n)} - T_i^{(n-1)}| \leq \varepsilon$, где $T_i^{(n)}, T_i^{(n-1)}$ - значения температур, полученные на данном и предыдущем шагах; ε – заданная точность расчета температур.

Температуры на выходе участков гидравлического канала водонагревателя определяются на каждой итерации по известным значениям среднетемпературы и температуры на выходе предыдущего участка. Первоначально температура жидкости в гидравлическом канале задается равной температуре воды в водопроводе.

Эквивалентные тепловые схемы замещения однофазных электроотопительных устройств трансформаторного типа имеют аналогичную структуру. Расчет тепловых сопротивлений в этом случае производится с учетом того, что нагреваемой средой является воздух.

При составлении эквивалентных тепловых схем замещения трехфазных электронагревателей следует учитывать то обстоятельство, что их магнитная система и первичная обмотка образуют индуктор, подобный индуктору обычного силового трехфазного трансформатора.

Как показали расчеты и экспериментальные исследования, наиболее пригодной является трубчатая обмотка с активным витком, охватывающим одну фазу, и одним пассивным витком, охватывающим одновременно все три фазы. Такая обмотка обладает небольшим электромагнитным рассеянием, что обеспечивает высокий коэффициент мощности электроводонагревателя. Кроме того, она имеет монотонный подъем, что исключает образование воздушных или паровых пробок. Это делает возможной естественную циркуляцию воды через нагреватель. Для этого накопительная емкость с водой должна располагаться на $0,5 \dots 1$ м выше нагревателя и на небольшом отдалении от него. Живое сечение трубы вторичной обмотки и подводящего трубопровода должно быть достаточно большое, чтобы скорость воды при максимальном расходе была около $0,1$ м/с.

Эквивалентная тепловая схема электроводонагревателя, выполненного на основе трехфазного масляного трансформатора с трубчатой обмоткой и пассивным витком показана на рис. 13.

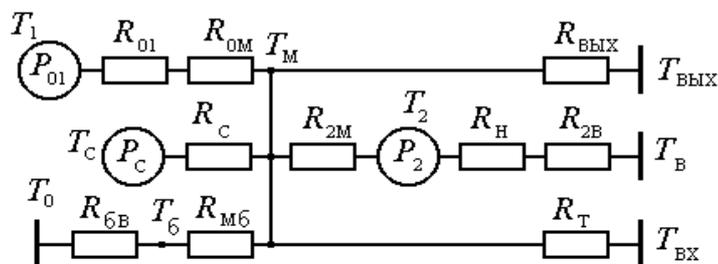


Рис.13.

Источниками тепла в ней являются мощность вторичной обмотки P_2 , потери в первичной обмотке P_{01} и потери в сердечнике P_C . В схеме имеются следующие термические сопротивления конвективной теплоотдачи: $R_{2В}$, $R_{2М}$ – с поверхностями вторичной обмотки, соответственно, в воду и масло; $R_{ОМ}$ – с поверхности первичной обмотки в масло; R_C – с поверхности сердечника в масло; $R_{М6}$ – от масла к стенкам бака; $R_{6В}$ – от стенки бака в окружающий воздух. Термическое сопротивление R_{01} соответствует теплопроводности изоляции первичной обмотки, а R_H есть термическое сопротивление загрязнения (накипи) на внутренней поверхности трубы вторичной обмотки. Тепловые процессы во входной и выходной частях трубы учитываются введением сопротивлений теплопередачи от масла к холодной воде входной части трубы R_T и от горячей воды выходной части трубы к маслу $R_{ВЫХ}$. Температуру воздуха T_0 , температуру воды на входе $T_{ВХ}$ и выходе $T_{ВЫХ}$, а также среднюю температуру воды в канале вторичной обмотки $T_B = (T_{ВХ} + T_{ВЫХ})/2$ можно считать заданными.

Проведены тепловые расчеты электроводонагревателей мощностью 160 кВт при различных температурах окружающего воздуха (от 0 до 40 °С) и воды на входе (от 10 до 40 °С). Температура воды на выходе была принята неизменной и равной 90 °С. Получены зависимости температуры масла от температуры воздуха и входящей воды, а также зависимость КПД нагревателя от указанных параметров (рис. 14).

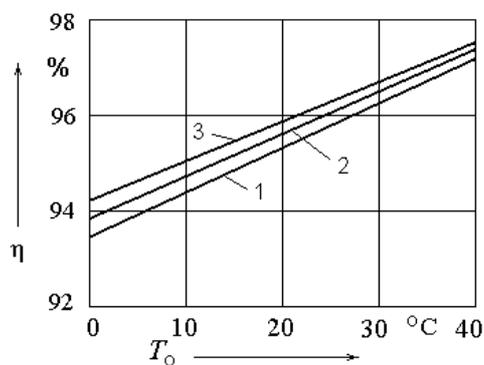


Рис. 14.

- 1- при температуре входящей
2- воды $T_{ВХ} = 10$ °С; 2 – при
 $T_{ВХ} = 25$ °С; 3 - при $T_{ВХ} = 40$ °С

Расчеты показывают, что изменение температуры входящей воды не приводит к такому же изменению температуры масла. Например, при отсутствии тепловой изоляции бака уменьшение температуры входящей воды на 30 °С (от 40 до 10 °С) приводит к понижению температуры масла лишь на 3...4 °С. Это объясняется уменьшением теплоотдачи от вторичной обмотки в воду, поэтому температура вторичной обмотки уменьшается лишь на 1...1,5 °С. С другой стороны, понижение температуры масла приводит к повышению температурного напора между вторичной обмоткой и маслом, а, следовательно, и теплового потока, направленного от обмотки в масло. Температура окружающего воздуха относительно слабо влияет на температуру масла. В случае идеальной теплоизоляции бака температура входящей воды оказывает более сильное влияние на температуру масла и индуктора.

Потери энергии в нагревателе обусловлены рассеянием ее в окружающий воздух. Как показали расчеты, потери и КПД нагревателя существенно зависят от температуры воздуха и слабо зависят от температуры входящей воды. С уменьшением температуры воздуха КПД значительно уменьшается, поэтому желательно теплоизолировать бак электроводонагревателя от воздуха.

Расчёт теплового поля в электронагревательных устройствах трансформаторного типа преследует следующие основные цели: получение картины распределения температуры внутри нагревательного элемента; оценку правильности выбора электромагнитных нагрузок; анализ распределения температуры и тепловых потоков для разработки рекомендаций по выбору электромагнитных нагрузок и оптимизации конструкции.

Для решения задачи методом конечных элементов сечение электроводонагревателя разбивается на совокупность E треугольных элементов так, чтобы границы раздела сред совпадали со сторонами треугольников.

При исследовании теплового состояния нагревательного элемента, очевидно, что максимальная температура в нём будет наблюдаться в длительном режиме работы, когда температура всех частей нагревателя достигнет установившихся значений. Поэтому рассматривается установившийся режим работы, тепловое поле в котором является стационарным. Расчёт тороидальных трансформаторов производится в цилиндрической системе координат r, z, φ при следующих допущениях.

1. Температурное поле осесимметрично $\left(\frac{\partial T}{\partial \varphi} = 0 \right)$, что обосновывается

симметричностью конструкции, распределения потерь и расположения поверхностей охлаждения относительно оси z .

2. Область исследования кусочно-однородна, а коэффициенты теплопроводности материалов и мощность источников тепла не зависят от температуры.

3. Главные оси анизотропии сред совпадают с осями координат r, z .

С учетом принятых допущений тепловое поле электроводонагревателя может быть описано двумерным уравнением в сечении Orz .

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda_r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_V = 0, \quad (9)$$

где T – температура, К; λ_r, λ_z – коэффициенты теплопроводности среды по осям r и z , соответственно, Вт/(м·К); q_V – удельная мощность источников тепла, Вт/м³.

На внешней поверхности вторичной обмотки справедливы граничные условия конвективной теплоотдачи в воду

$$\lambda_r \frac{\partial T}{\partial r} l_r + \lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} l_z + \alpha (T - T_B) = 0, \quad (10)$$

где l_r, l_z – направляющие косинусы внешней нормали к граничной поверхности; α – коэффициент теплоотдачи в воду, Вт/(м²·К);

Если температура стенки превышала 100 °С, то кипение воды учитывалось при нахождении коэффициента теплоотдачи следующим образом

$$\alpha = \frac{q}{100 + \Delta T_{\text{нас}} - T_B}, \quad \Delta T_{\text{нас}} = \sqrt[3]{\frac{q - \alpha_v (T'_s - T_B)}{44}},$$

где q – плотность теплового потока, полученная по данным предыдущего итерационного шага; T'_s – температура теплоотдающей стенки, полученная на предыдущем шаге; T_B – уточнённое значение среднемассовой температуры воды; α_v – уточнённое значение коэффициента теплоотдачи за счет только вынужденной конвекции. T_B – температура воды в канале, К. Так как вторичная обмотка выполнена из изотропного материала ($\lambda_r = \lambda_z$), то рассматриваемое граничное условие

записывается в виде $\lambda \frac{\partial T}{\partial n} + \alpha (T - T_B) = 0$, где n – внешняя нормаль к границе. На

конце выступающей части внутренней трубки справедливы условия теплоизоляции

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = 0.$$

В МКЭ решение уравнения (9) заменяется поиском функции, минимизирующей функционал

$$J = \int_V f_V dV + \int_{S_r} f_r dS = \quad (11)$$

$$= \int_V \frac{1}{2} \left[r \lambda_r \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)^2 + r \lambda_z \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 - 2r q_V T \right] dV + \int_{S_r} r \frac{\alpha}{2} (T - T_b)^2 dS.$$

Так как объект исследования осесимметричен, то интеграл (11) представляется в следующем виде

$$J = \sum_{e=1}^E \int f_V 2\pi r dS + \sum_{g=1}^G \int f_r 2\pi r dL. \quad (12)$$

Минимизация функционала (11) приводит к системе линейных уравнений, причём матрица её имеет симметричную и ленточную структуру. Система решалась методом квадратных корней, который учитывает структуру матрицы.

Картина распределения температуры в исследуемом сечении трансформатора мощностью 5 кВт для проточного электроводонагревателя показана на рис. 15, распределение температуры по радиальной координате в средней части трансформатора – на рис. 16.

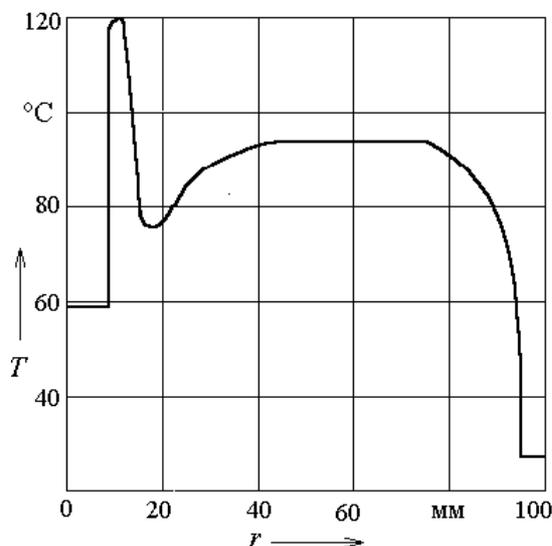


Рис. 15.

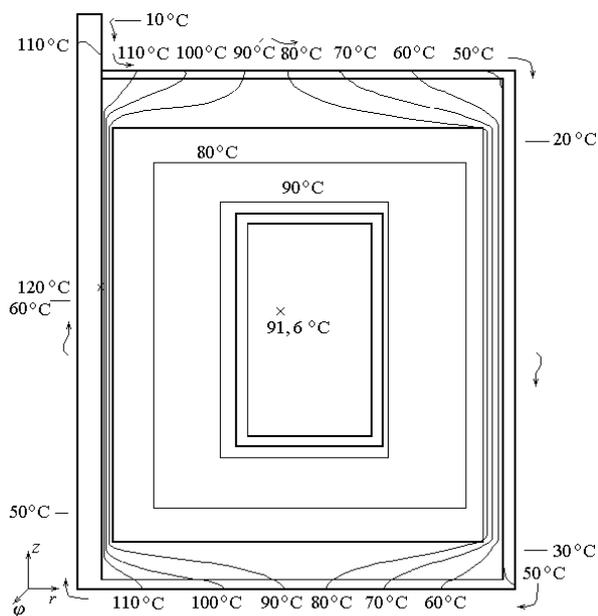


Рис. 16.

Приведённые результаты показывают, что распределение температуры в сечении нагревательного элемента трансформаторного типа происходит неравномерно. Это объясняется неравномерным распределением плотности источников тепла во вторичной обмотке. Так, например, во внутренней трубке выделяется в 4 раза больше мощности, чем во внешнем цилиндре, имеющем в 9,5 раза большую поверхность охлаждения. Этим объясняется то, что плотность теплового потока на поверхности трубки (около $30,6 \text{ Вт/см}^2$) в 40 раз больше, чем на поверхности внешнего цилиндра ($0,75 \text{ Вт/см}^2$). Часть тепла от внутренней трубки вторичной обмотки отводится через

изоляционный промежуток и по виткам первичной обмотки к наружному цилиндру вторичной обмотки. Максимальная температура 120°C наблюдается во внутренней трубке вторичной обмотки. Внутренняя трубка и соседние с ней участки торцевых частей вторичной обмотки нагреваются выше 100°C . Вода на этих участках канала начинает кипеть, а это нежелательно с точки зрения возникновения накипи и ухудшения теплового состояния трансформатора. Поэтому целесообразно принять меры для получения более равномерного распределения мощности источников тепла во вторичной обмотке, что, в частности, может быть достигнуто уменьшением толщины внешнего цилиндра и применением для него материала с более высоким электрическим сопротивлением, чем для внутренней трубки, небольшим увеличением внутреннего диаметра трубки (до $30\text{...}40\text{ мм}$) и её толщины (до $5\text{...}7\text{ мм}$). Следует отметить, что коэффициент теплоотдачи внешнего цилиндра вторичной обмотки относительно низок (около $300\text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$), что обусловлено большим сечением внешнего кольцевого канала и малой скоростью воды в нём. Очевидно, на этой поверхности целесообразно увеличить интенсивность теплоотдачи уменьшением сечения канала за счёт усложнения пути протекания воды, а также турбулизацией течения. Анализ математической модели позволил оценить правильность выбора электромагнитных нагрузок и указать направления для улучшения конструкции трансформатора с целью более равномерного распределения тепловых нагрузок, в частности, это может быть достигнуто уменьшением толщины внешнего цилиндра и применением для него материала с более высоким электрическим сопротивлением, чем для внутренней трубки. Расчёт показал, что перепад температуры приходится, в основном, на поверхность теплоотдачи в воду. Перепад температуры в изоляции обмоток и в первичной обмотке относительно невелик. Максимальная температура первичной обмотки равна $90,5^{\circ}\text{C}$, сердечника – $91,6^{\circ}\text{C}$.

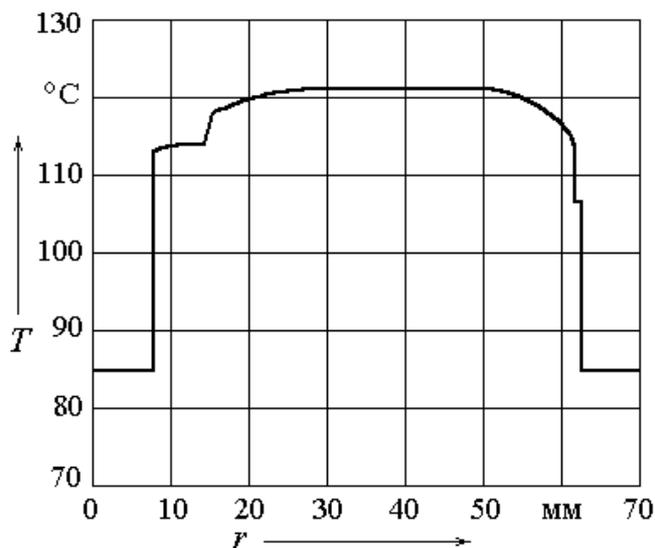


Рис. 17.

увеличения электромагнитных нагрузок.

Математическая модель расчёта теплового поля для трёхфазного нагревательного элемента, выполненного на основе пространственной магнитной системы, с учетом симметричности конструкции, реализуется для одного сегмента в прямоугольной системе координат x, y при следующих допущениях.

1. Тепловой поток на прилегающих сторонах сегмента отсутствует.
2. Область исследования кусочно-однородна, а коэффициенты теплопроводности материалов и мощность источников тепла не зависят от температуры.
3. Главные оси анизотропии сред совпадают с осями координат x, y .

Распределение температуры в исследуемом сечении трансформатора для аккумуляционного электроводонагревателя мощностью $1,25\text{ кВт}$ приведено на рис. 17. Расчеты показали, что температура распределена в сечении трансформатора относительно равномерно. Наибольший перепад температур происходит на поверхности вторичной обмотки. Перепад температур в изоляции между обмотками и в изоляции между сердечником и первичной обмоткой невелик, что указывает на возможность

С учётом принятых допущений тепловое поле трансформатора описывается двумерным уравнением теплопроводности в сечении Oxy

$$\lambda_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + q_V = 0. \quad (13)$$

На внутренней поверхности вторичной обмотки и внешней поверхности герметизирующей оболочки справедливы граничные условия конвективной теплоотдачи в воду (10). На прилегающих сторонах сегмента справедливо условие теплоизоляции. Решение уравнения (13) с граничными условиями заменяется поиском функции, минимизирующей функционал

$$\begin{aligned} J &= \int_V f_V dV + \int_{S_r} f_r dS = \\ &= \int_V \frac{1}{2} \left[\lambda_x \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \lambda_y \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 - 2q_V T \right] dV + \int_{S_r} \frac{h}{2} (T - T_B)^2 dS. \end{aligned} \quad (14)$$

При рассмотрении граничных условий конвективного теплообмена предполагалось, что температура воды, которая омывает внутреннюю поверхность трубок и внешнюю поверхность герметизирующей оболочки известна, а КТО определялись итерационным методом как для однофазной конструкции. Особенностью является то, что режим течения воды, омывающей поверхности теплоотдачи, ламинарный, в связи с большим расчётным диаметром трубок. В работе реализована математическая модель теплового поля НЭТ в виде программы для ЭВМ, написанной на языке Паскаль. Картина поля для трансформатора мощностью 25 кВт с КЗ вторичной обмоткой, выполненной из нержавеющей стали, приведена на рис. 18.

Анализ теплового поля в среднем сечении трёхфазного трансформатора показывает, что максимальная температура наблюдается в районе первичной обмотки и величина её 160°C , поэтому необходимо выбирать изоляцию, соответствующую классу Н. Часть тепла от первичной обмотки через изоляцию и магнитопровод отводится с наружной поверхности трансформатора, а другая часть отводится через изоляцию к трубкам. Максимальная температура поверхности вторичной обмотки равна 110°C . Поэтому целесообразно

принять меры для увеличения интенсивности теплоотдачи с помощью турбулизации течения за счёт искусственного усложнения пути протекания воды.

В пятом разделе работы рассмотрены вопросы проектирования трансформаторов с короткозамкнутой обмоткой, работающих в режиме нагревательного элемента. Исследуемые трансформаторы имеют внутренний осевой канал для прохождения нагреваемой жидкости. Размеры этого канала определяются из условий обеспечения заданного значения удельной тепловой нагрузки вторичной обмотки и, в значительной степени, определяют массогабаритные показатели и стоимость трансформатора. Гео-

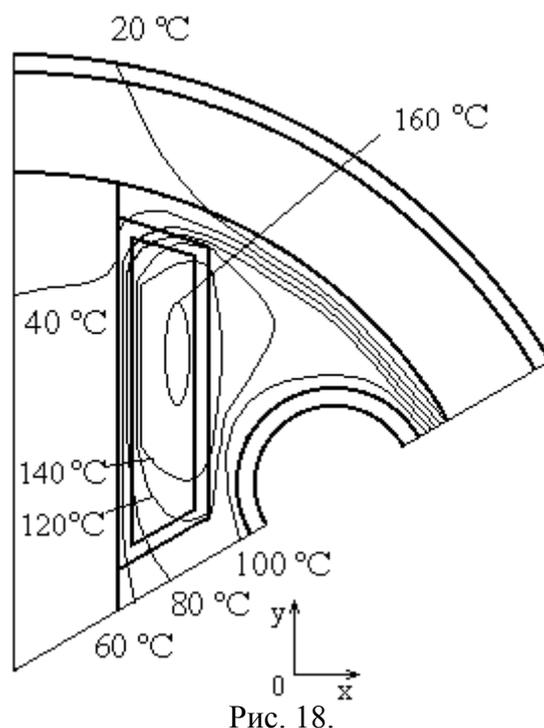


Рис. 18.

метрия таких трансформаторов с прямоугольной формой поперечного сечения магнитопровода характеризуется безразмерными коэффициентами.

$$x = \frac{D_{c1}}{a}; \quad y = \frac{H_c}{a}; \quad z = \frac{D_T}{a}, \quad (15)$$

где a - ширина магнитопровода; D_{c1} - внутренний диаметр магнитопровода; H_c - высота магнитопровода. D_T - внутренний диаметр центральной трубки вторичной обмотки. Коэффициенты x , y , z представляют собой относительные значения внутреннего диаметра магнитопровода, высоты магнитопровода и внутреннего диаметра центральной трубки соответственно; Через эти коэффициенты и ширину a магнитопровода можно выразить все характеристики, зависящие от геометрических размеров (площади поперечных сечений и поверхностей, объем и др.), а также вес и стоимость. Все эти величины выражаются формулами вида $\varphi_i(x, y, z) a^n$, где n может принимать значения от 1 до 3, а характер функции φ_i зависит от определяемой величины и типа трансформатора.

Определены новые соотношения между φ_i и безразмерными коэффициентами x , y , z , учитывающие наличие внутреннего осевого канала для прохождения нагреваемой жидкости.

Поиск оптимальных размеров трансформаторов с короткозамкнутой вторичной обмоткой относится к классу задач условной оптимизации, для решения которых может быть применен метод штрафных функций.

В качестве целевой функции принят комплексный критерий качества K_E , который является интегральным критерием оценки оптимальности геометрии и для трансформатора промышленной частоты представляется следующим образом

$$K_E = \varphi_E \left[\frac{\varphi_k}{\varphi_{пк} (m y \varphi_{ок})^2} \right]^{0,43}, \quad (16)$$

где $\varphi_E = \varphi_k (C_{o1} \gamma_{o1} k_o + C_{o2} \gamma_{o2}) + \varphi_c C_c \gamma_c k_c$ - функция коэффициента эффективности; C_{o1} - цена обмоточного провода первичной обмотки; C_{o2} - цена материала вторичной обмотки; C_c - цена стали магнитопровода; γ_{o1} - удельная плотность материала первичной обмотки, кг/м³; γ_{o2} - удельная плотность материала вторичной обмотки, кг/м³; γ_c - удельная плотность материала магнитопровода; k_o - коэффициент заполнения обмотки; k_c - коэффициент заполнения сталью магнитопровода.

Используемые в комплексном критерии качества K_E относительные значения объема φ_c , площади поперечных сечений и поверхностей, φ_k , $\varphi_{ок}$, $\varphi_{пк}$ позволяют учесть особенности конструкции вторичной обмотки трансформатора, а функция коэффициента эффективности φ_E учитывает массу и специфику материала вторичной обмотки.

Предварительный анализ показывает, что критерий качества K_E является унимодальной функцией и имеет минимум в области изменения параметров оптимизации. Допустимая область ограничена условиями положительности значения ширины a и высоты H_c магнитопровода. Кроме того, необходимо, чтобы внутренний диаметр обмотки D_{o1} превышал минимальное значение, допустимое по технологическим условиям, а толщина трубки Δ_T была больше минимального значения (1 мм).

В качестве штрафной функции принята функция вида

$$\varphi(a, H_c) = \sum_{i=1}^p [g_i(a, H_c)]^2 \{1 - \text{sign}[g_i(a, H_c)]\}, \quad (17)$$

где $g_i(a, H_c)$ - i -тая функция-ограничение; $i=1, \dots, p$; p – число функций.

В качестве внутреннего метода безусловной оптимизации использован метод Гаусса-Зайделя с выбором на каждой итерации оптимального шага t из условий минимума целевой функции по параметру t .

Расчет оптимального шага по каждой из переменных осуществляется методом золотого сечения. В итоге определяются значения параметров оптимизации a, H_c , в качестве которых принимаются середины последних интервалов неопределенности.

Разработана программа расчета оптимальных геометрических соотношений для трансформаторов с короткозамкнутой вторичной обмоткой, работающих в режиме нагревательного элемента.

В работе реализован алгоритм поиска электромагнитных нагрузок и размерных соотношений этих с помощью математической модели, построенной на основе метода планирования эксперимента. В качестве функции цели Y выступала стоимость активных материалов трансформатора $C_{\text{а.м.}}$, а в качестве ограничительных функций – максимальная температура изоляции $T_{\text{из}}$ и плотность теплового потока с поверхности центральной трубки вторичной обмотки q_T . Факторы, которые в наибольшей степени влияют на эти функции, выбраны по результатам анализа тепловых процессов в тороидальном трансформаторе. Ими являются плотность тока в первичной обмотке $J_1(x_1)$, относительная высота магнитопровода $y(x_2)$ – отношение высоты магнитопровода к его ширине. В качестве третьего фактора взят изоляционный промежуток между первичной обмоткой и центральной трубкой вторичной обмотки $\delta_1(x_3)$, так как эта величина влияет на значение теплового потока от трубки к первичной обмотке. Четвёртым варьируемым фактором выбрано расстояние между первичной обмоткой и торцевой поверхностью $h_{12}(x_4)$, от которого зависит q_T . Зависимости $C_{\text{а.м.}}$, $T_{\text{из}}$ и q_T от независимых переменных x_1, x_2, x_3 и x_4 найдены в виде полиномов второго порядка

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^4 b_i x_i + \sum_{i=j}^4 b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^4 b_{ii} x_i^2, \quad (11)$$

Коэффициенты b_0, b_i, b_{ij}, b_{ii} этих полиномов определялись с помощью численного эксперимента, для постановки которого применялось ортогональное центральное композиционное планирование второго порядка.

По результатам численного эксперимента построены зависимости (рис.19), анализ которых позволил обоснованно подойти к выбору варианта для проектирования трансформатора с минимальной стоимостью при следующих ограничениях: максимальная температура изоляции не должна превышать допустимую, определяемую классом используемых изоляционных материалов; величина плотности теплового потока с поверхности центральной трубки вторичной обмотки q_T не должна превышать 10 Вт/см^2 . Анализ полученных зависимостей показал, что наибольшее влияние на стоимость активных материалов трансформатора оказывает плотность тока в первичной обмотке (рис. 19а), а наименьшее – относительная высота магнитопровода, причём наблюдается точка с минимальной стоимостью при $y \approx 1,4$ (рис. 19б). На выбор этих величин существенное влияние оказывает увеличение тепловых нагрузок $T_{\text{из}}$ и q_T при повышении J_1 и y .

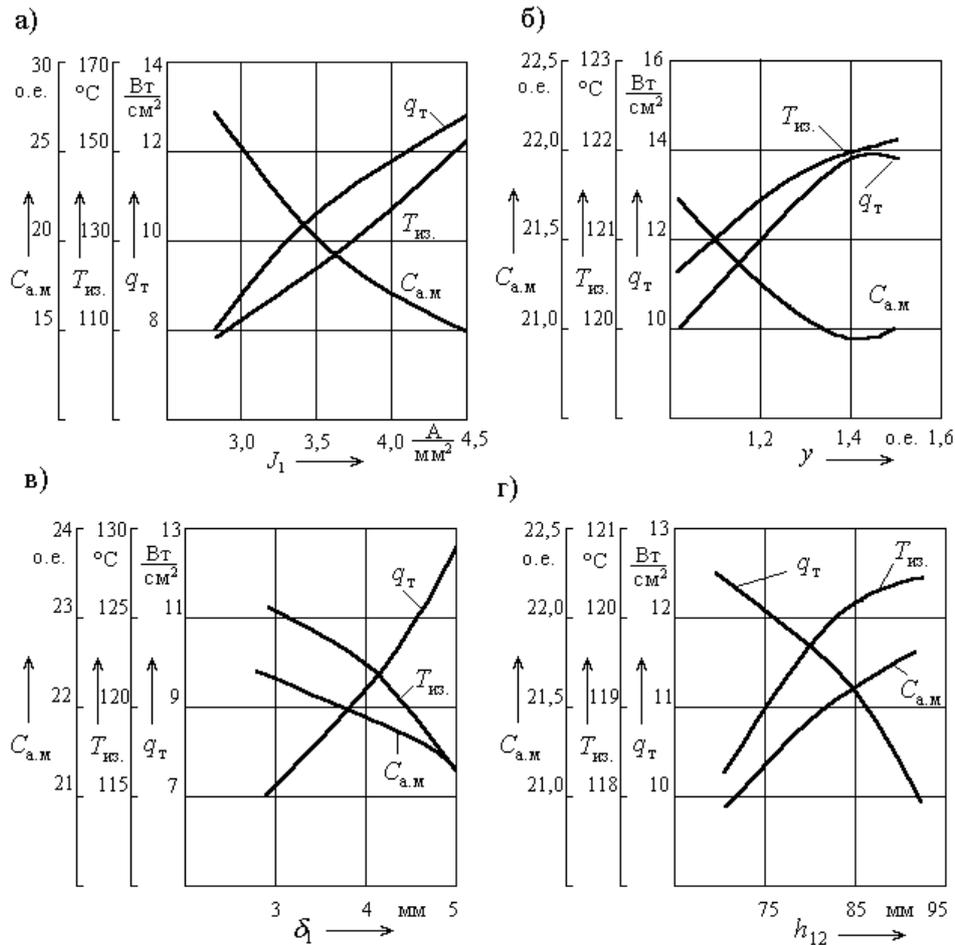


Рис. 19.

С учётом ограничений целесообразно выбирать значения плотности тока в области 3...3,5 А/мм², а относительную высоту магнитопровода можно выбирать в достаточно широких пределах от 1 до 1,5. Анализ зависимостей (рис. 19в) показал, что увеличение изоляционного расстояния δ_1 приводит к уменьшению $T_{из.}$ вследствие ограничения величины теплового потока от центральной трубки к первичной обмотке. Уменьшается и стоимость активной части. Из-за уменьшения диаметра центральной трубки уменьшается поверхность охлаждения и значительно повышается q_T . Поэтому необходимо увеличивать поверхность трубки за счёт её удлинения. Это приводит к некоторому повышению стоимости и температуры первичной обмотки (рис. 19г).

Результаты расчётов (рис. 20) для однофазных трансформаторов мощностью 1,25...7 кВт с вторичной обмоткой из алюминия марки АД-1 позволяют определить взаимосвязь основных геометрических соотношений (x – относительный внутренний диаметр магнитопровода; z – относительный внутренний диаметр центральной трубки вторичной обмотки), размеров магнитопровода ($D_{с1}$, H_c , a – внутренний диаметр, высота и ширина магнитопровода), электромагнитных нагрузок (j_1 , j_2 – плотности тока в первичной обмотке и в центральной трубке) и электромагнитного коэффициента полезного действия $\eta_{эм}$ с мощностью нагревательного элемента. Эти соотношения могут быть использованы при проектировании тороидальных трансформаторов с короткозамкнутой вторичной обмоткой.

Для разработки рекомендаций при проектировании трехфазных трансформаторов с пространственной магнитной системой, в работе исследовано влияние электромагнитных нагрузок и размеров вторичной обмотки δ_T (x_4) на стоимость материалов

$C_{a.m.}$ трансформатора и максимальную температуру изоляции $T_{из.}$. Результаты исследования в виде графиков представлены на рис. 21.

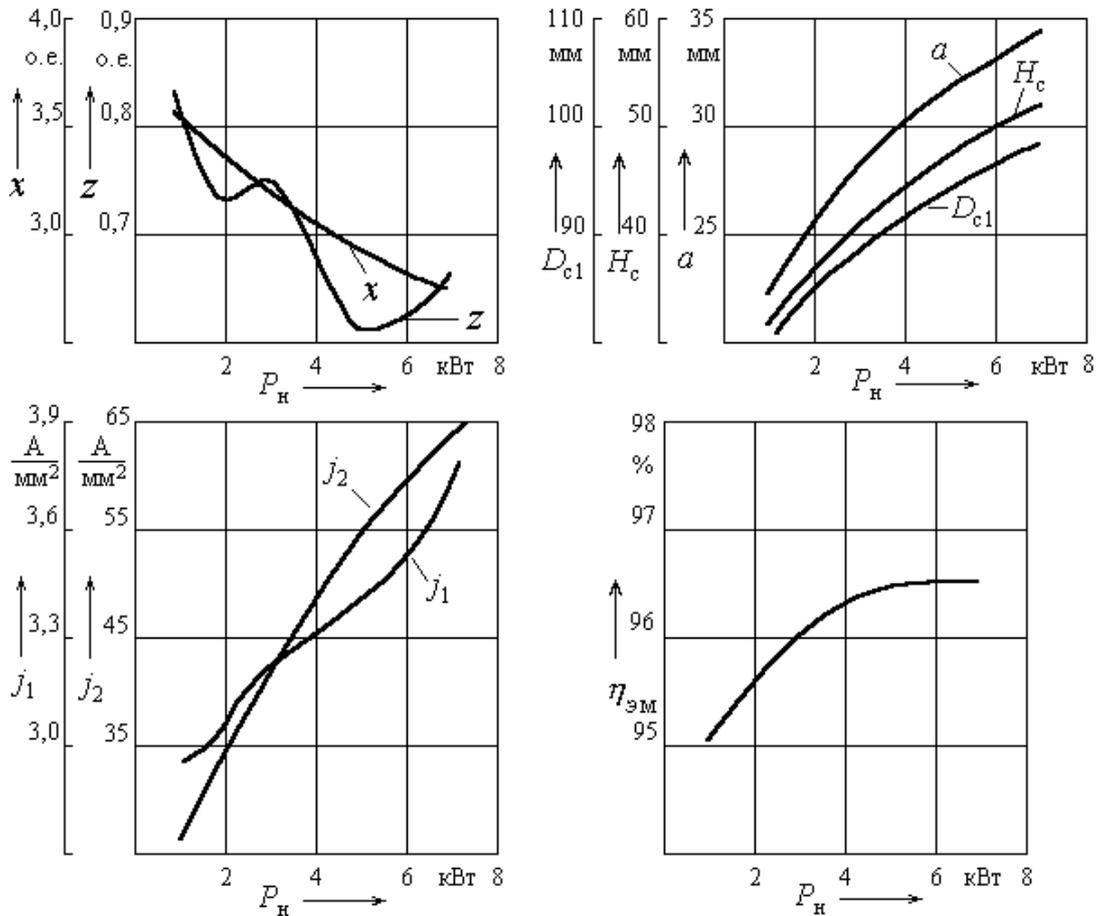


Рис. 20.

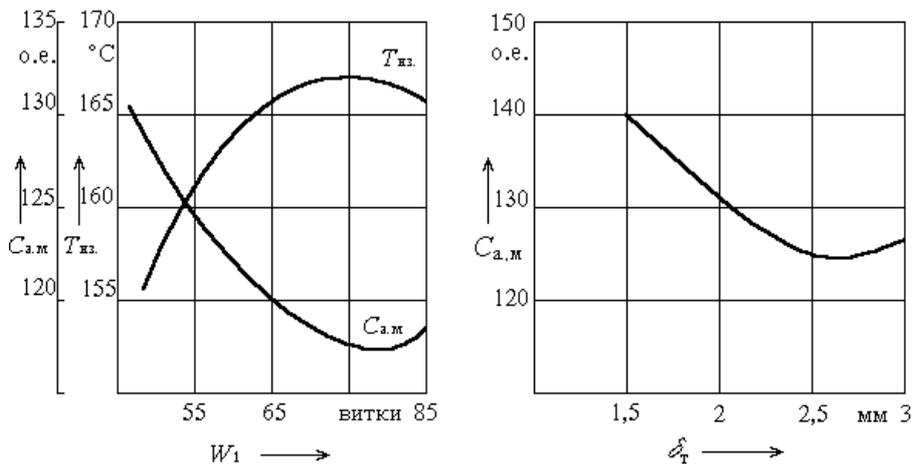


Рис. 21.

Зависимость стоимости от числа витков при постоянной плотности тока и индукции имеет вид пологой кривой с точкой экстремума, в которой наблюдается минимум. Зависимость максимальной температуры изоляции от W_1 при тех же условиях так же имеет экстремум (максимум) в зоне больших значений W_1 , поэтому число витков в первичной обмотке при расчётах следует принимать в пределах 60...70. При больших значениях W_1 трудно обеспечить необходимую величину $T_{из.}$ и требуется значительное снижение плотности тока, что сказывается на стоимости. При меньших значениях W_1

не обеспечивается необходимый по условиям безопасной эксплуатации НЭТ потенциал на вторичной обмотке.

Исследования показали, что выбор W_1 свыше 75 витков приводит к значительному возрастанию диаметра трубки, так как ток обмотки низшего напряжения возрастает пропорционально уменьшению напряжения витка и для обеспечения требуемой мощности необходимо уменьшать сопротивление трубки за счёт повышения её диаметра. Эти обстоятельства приводят к увеличению габаритных размеров магнитопровода, массы и стоимости активных материалов. При этом, повышение стоимости происходит более быстрыми темпами, чем уменьшение температуры и при $W_1 > 75$ витков невозможно получить требуемые условия по нагреву. Зависимость стоимости активных материалов от толщины трубки при постоянной индукции B_c и допустимой температуре изоляции имеет минимум. Анализ этих зависимостей показал, что при толщине стенки трубки менее 2 мм для обеспечения требуемого сопротивления необходимо увеличивать диаметр трубки, что влечёт за собой увеличение габаритов и стоимости магнитопровода. При толщине трубки более 3 мм, для обеспечения необходимого сопротивления, её диаметр необходимо уменьшать. С другой стороны, чтобы обеспечить требуемую поверхность охлаждения, необходимо увеличивать длину трубки. В этом случае резко повышается температура изоляции и приходится снижать плотность тока в первичной обмотке, что является причиной повышения стоимости.

Результаты расчётов (рис. 22) позволяют оценить влияние мощности нагревательного элемента на изменение основных геометрических соотношений, (β – отноше-

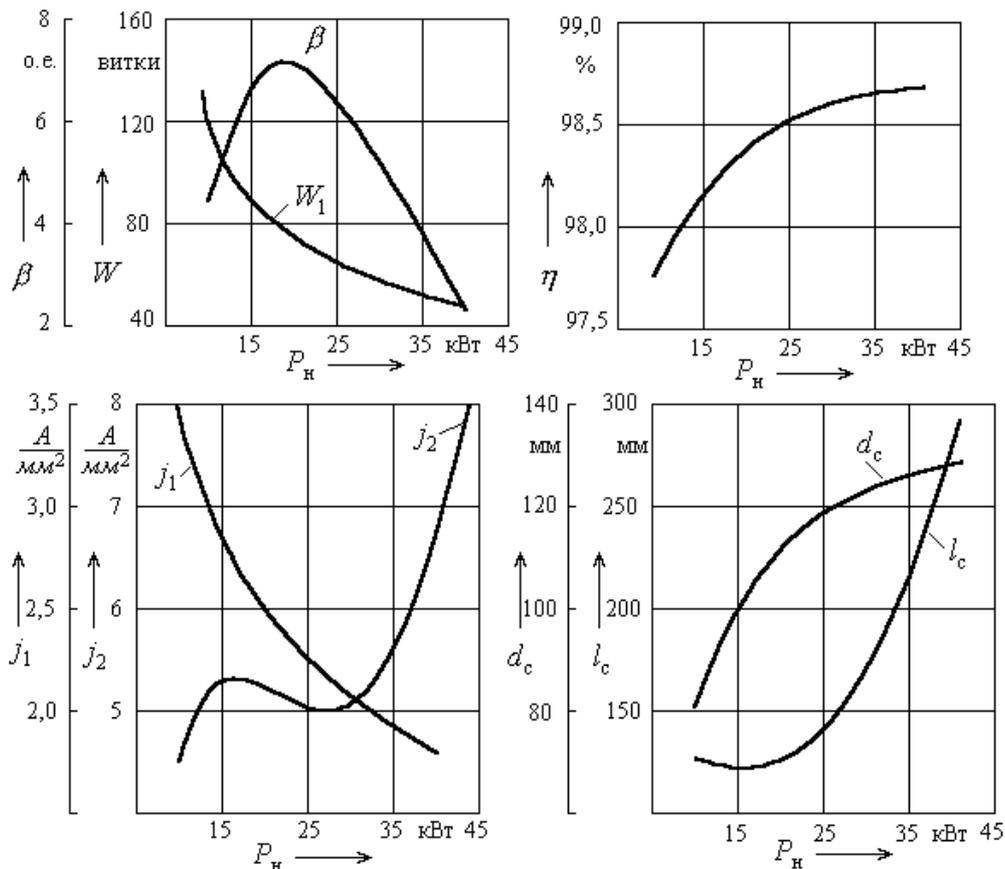


Рис. 22.

ние средней длины витка первичной обмотки к длине стержня, занимаемой обмоткой), размеров магнитопровода и электромагнитных нагрузок и могут быть использованы

при проектировании трёхфазных трансформаторов с пространственной магнитной системой и короткозамкнутой вторичной обмоткой.

Предложенные методики проектирования можно использовать и для любых других конструкций трансформаторов с короткозамкнутой вторичной обмоткой, предназначенных для работы в режиме нагревательного элемента.

В шестом разделе рассмотрены особенности работы короткозамкнутых трансформаторов в автономных энергетических системах.

Резко возросший в последнее время интерес к системам децентрализованного теплоснабжения объясняется, прежде всего, неудовлетворительным качеством централизованного теплоснабжения при явной тенденции к повышению стоимости отпускаемой теплоты. За рубежом, в том числе для крупных потребителей, наряду с системами централизованного теплоснабжения широкое применение имеют системы децентрализованного энергоснабжения на основе высокоэффективных автоматизированных источников, обеспечивающих меньший расход энергоресурсов (на 10...30%), снижение материалоемкости в 2...5 раз, значительное сокращение сроков строительства.

Большинство применяемых в России децентрализованных систем электроотопления и горячего водоснабжения выполнены на базе выпускаемых электроводонагревателей ЭПЗ, САОС, ВЭТ и др., либо реализующими электродный способ нагрева воды, либо содержащими в качестве нагревательных элементов трубчатые электронагреватели. Следует отметить, что такие недостатки как низкая степень надежности и безопасности, присущие устройствам таких типов, в значительной степени усугубляются с ростом единичной мощности децентрализованной системы энергообеспечения.

Использование в таких системах в качестве нагревательных элементов трансформаторов с короткозамкнутой вторичной обмоткой позволяет устранить указанные недостатки, однако требует использования специальных принципов управления и устройств электропитания. Необходимость разработки новых принципов и систем управления обусловлена следующими особенностями децентрализованных систем электроотопления и горячего водоснабжения, выполненных на основе нагревательных элементов трансформаторного типа:

1. Возможность выполнения систем теплоснабжения на широкий диапазон номинальных мощностей (от 0,5 до 800 кВт);
2. Возможность подключения к электрическим сетям с напряжением до 6...10 кВ;
3. Возможность выполнения в одном модуле понижающей трансформаторной подстанции и нагревательного элемента;
4. Возможность использования трансформатора с короткозамкнутой вторичной обмоткой в качестве балластного элемента системы стабилизации переменного напряжения;
5. Улучшение массогабаритных показателей системы при питании первичной обмотки нагревательного элемента токами повышенной частоты;
6. Высокая степень надежности нагревательных элементов, определяющая специфику требований к элементной базе и конструкциям коммутирующей аппаратуры и регуляторов;
7. Обеспечение II класса по электробезопасности, диктующее требования к устройствам защиты;
8. Наличие апериодических составляющих токов при включении и в других переходных режимах работы;
9. Нелинейность параметров нагревательных элементов, обусловленная насыщением магнитопровода трансформатора и эффектом вытеснения тока во вторичной обмотке;

10. Возможность возникновения перенапряжений при отключениях и в переходных режимах работы;

11. Необходимость точного определения момента подключения каждой из фаз первичной обмотки трансформатора к сети;

Особенности нагревательных устройств, используемых в децентрализованных системах энергоснабжения, во многом определяют специфику источников электропитания и устройств управления. При изменении частоты питающего напряжения трансформатора с короткозамкнутой вторичной обмоткой изменяются электродвижущие силы и индуктивные сопротивления обмоток, потери мощности в магнитопроводе, потребляемая и полезная мощность. Поэтому важно установить взаимосвязь между частотой питающего напряжения и параметрами нагревательных элементов трансформаторного типа, а также определить наиболее приемлемые типы источников питания для децентрализованных энергосистем, в которых применяются нагреватели трансформаторного типа. В работе предложены и исследованы такие источники питания.

В качестве критерия выбора рабочей частоты КЗТ предлагается использовать удельную ЭДС $e_{уд}$, представляющую собой отношение ЭДС одного витка к площади поперечного сечения магнитопровода. Определены зависимости рабочей частоты трансформатора с короткозамкнутой вторичной обмоткой от удельной ЭДС (рис. 23) и наибольшего допустимого значения рабочей частоты от мощности (рис. 24).

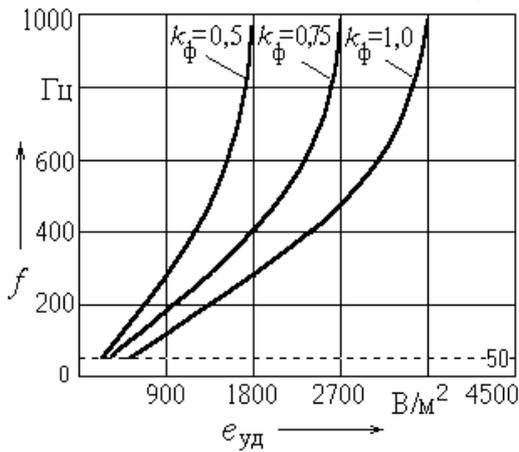


Рис. 23.

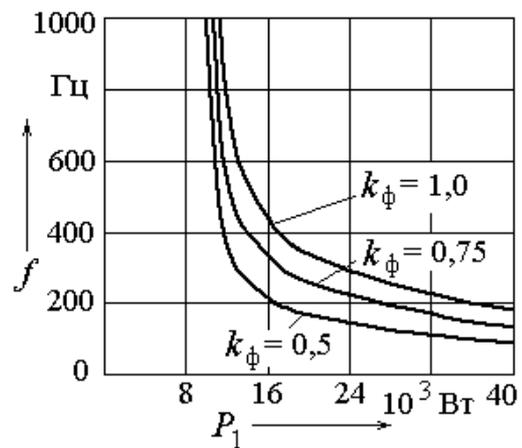


Рис. 24.

Для управления мощностью нагревательного элемента трансформаторного типа на промышленной частоте наиболее целесообразно использование двухпозиционного регулирования. При этом необходимо, чтобы включение КЗТ производилось в момент ожидаемого перехода тока через ноль, а длительности включенного и выключенного состояния были кратными периоду напряжения сети.

При анализе процессов регулирования мощности в электронагревательных приборах трансформаторного типа возникает необходимость исследование нестационарных тепловых режимов работы этих устройств. Система уравнений, описывающая переходные тепловые процессы работы аккумуляционного электронагревателя выглядит следующим образом.

$$\left. \begin{aligned}
 U &= \left\{ \begin{array}{l} 0, \text{ при } T_y - T \leq 0 \\ kU_c, \text{ при } T_y - T \geq \Delta T; \end{array} \right. \quad P_n = \frac{U^2}{R(1 + \alpha T)}; \\
 P_p &= cV(T - T_x); \quad P_n = \frac{S\lambda}{L}(T - T_n); \\
 \frac{dQ}{dt} &= P_n - P_p - P_n; \quad T = T_0 + \frac{1}{cm} \int \frac{dQ}{dt} dt.
 \end{aligned} \right\}, \quad (12)$$

где U_c – напряжение сети; k – коэффициент приведения короткозамкнутого трансформатора; T_y – температура уставки; T – текущая температура воды; ΔT – дифференциал терморегулятора; P_n – мощность нагревательного элемента; R – сопротивление нагревательного элемента; α – температурный коэффициент сопротивления материала; c – теплоёмкость воды; V – массовый расход воды; T_x – температура вновь поступающей холодной воды; P_p – потери тепла при разборе воды; P_n – тепловая мощность потерь при хранении горячей воды. S – площадь поверхности бака; λ – теплопроводность теплоизоляции бака; L – толщина теплоизоляции; T_b – температура окружающего воздуха; T_0 – начальная температура воды; c – удельная теплоёмкость воды; m – масса воды.

В качестве примера приведены расчеты тепловых процессов в серийном электронагревателе ЭВАН-50/1,0 на основе КЗТ (рис. 25).

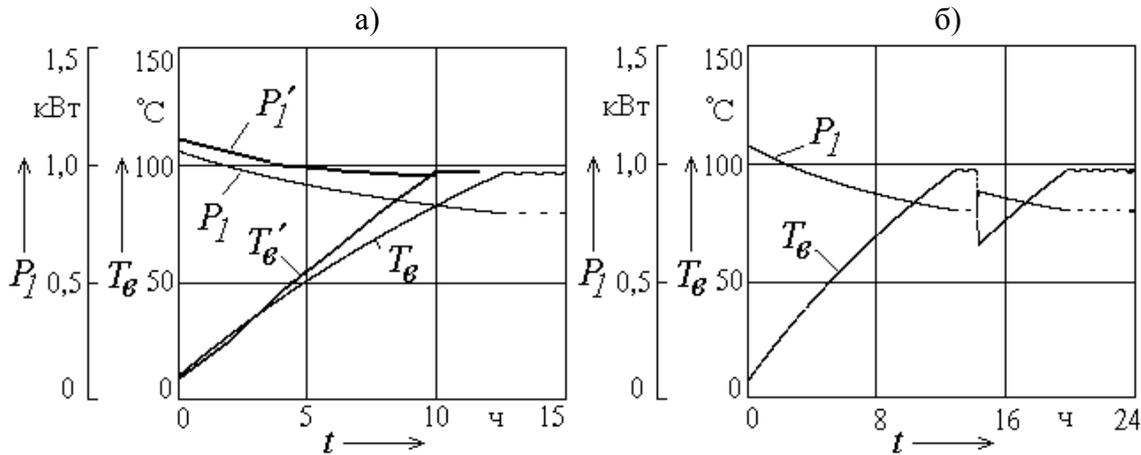


Рис. 25.

Зависимости потребляемой мощности P_1' и температуры воды T_e' от времени (см.рис. 25а) построены по экспериментальным данным

В седьмом разделе приведены результаты практической реализации теоретических разработок и экспериментальных исследований исследуемых трансформаторов

Для экспериментальных исследований режимов работы трансформаторов с короткозамкнутой вторичной обмоткой, определения энергетических и массогабаритных показателей были изготовлены физические модели трансформаторов для электроннагревательных устройств различного назначения, конструктивного исполнения и мощности:

- тороидальный нагревательный элемент со сварной алюминиевой вторичной обмоткой мощностью 1,25 кВт, напряжением 220 В, частотой 50 Гц;
- тороидальный нагревательный элемент, с алюминиевой вторичной обмоткой, изготовленной методом глубокой вытяжки и холодной сварки мощностью 1,25 кВт, напряжением 220 В, частотой 50 Гц;;
- проточный электроннагреватель с тороидальным НЭТ мощностью 5 кВт, напряжением 220 В, частотой 50 Гц;
- трехфазный электроннагреватель с цилиндрической вторичной обмоткой мощностью 1,25 кВт, напряжением 220/380 В, частотой 50 Гц;
- трехфазный электроннагреватель с алюминиевой трубчатой вторичной обмоткой мощностью 1,25 кВт, напряжением 220/380 В, частотой 50 Гц;
- проточный электроннагреватель с первичной обмоткой трансформатора состоящей из двух полуобмоток, подключенных к промышленной сети напряжением 220/380 В, 50 Гц через выпрямительно-инверторный блок и вторичной обмотку, со-

стоящей из корпуса и соединенных с ним двух алюминиевых коаксиальных труб. Мощность 16 кВт, частота 400 Гц;

- проточный электронагреватель с вынесенной нагрузкой в виде ленты гребнеобразной формы и первичной обмоткой подключенной к промышленной сети напряжением 220/380 В, 50 Гц через мостовой выпрямитель и однофазный инвертор мощностью. Мощность 16 кВт, частота 400 Гц.

В результате испытаний макетных образцов установлено следующее.

1. Проведенный эксперимент показал эффективность использования трансформаторов с короткозамкнутой вторичной обмоткой в качестве нагревательных элементов для систем горячего водоснабжения и отопления.

2. Результаты испытаний подтвердили теоретические выводы о высоких энергетических показателях таких устройств.

3. Значения температур, полученные в ходе эксперимента, полностью подтвердили правильность теоретических исследований.

4. Измеренный в ходе эксперимента потенциал вторичной обмотки относительно бака и заземленных частей составил величину менее 2 В, что подтвердило соответствие устройства второму классу электробезопасности.

Результаты диссертационной работы в виде технических решений, методик электромагнитных и тепловых расчетов использованы при проектировании и подготовке серийного производства электронагревателей трансформаторного типа, выпускаемых Биробиджанском заводе силовых трансформаторов (табл.2).

Таблица 2.

Технические данные электронагревателей трансформаторного типа

Тип, марка	Мощность, кВт	Рабочая температура, °С	Напряжение сети, В	Число фаз	Особенности конструкции
ЭВАН-100/1,0 “Орель”	1,0	30-85	220	1	Аккумуляционного типа, полезная емкость 100 л, электронный блок управления
ЭВАН-50/1,0 “Орель”	1,0	5-80	220	1	Аккумуляционного типа, полезная емкость 100 л, электронный блок управления, цифровая индикация
ЭВП-25/380	25,0	70	380	3	Проточный, с автоматизацией процесса нагрева воды
ЭВП-6/220	6,0	30-85	220	1	Проточный
ЭВП-6/380	6,0	30-85	380	3	Проточный
ЭНТ-16/380	16,0	90	380	3	Проточный
ЭВП-50/500	50,0	90	380	3	Проточный, для электрических котельных
ЭВП-100/500	100,0	90	380	3	Проточный, для электрических котельных
ЭВП-200/500	200,0	90	380	3	Проточный, для электрических котельных
ЭРГНТ-0,75/220	0,75	90	220	1	Электрорадиатор
ЭРГУ-0,5/220 “Прогресс”	0,50	85	220	1	Электрорадиатор

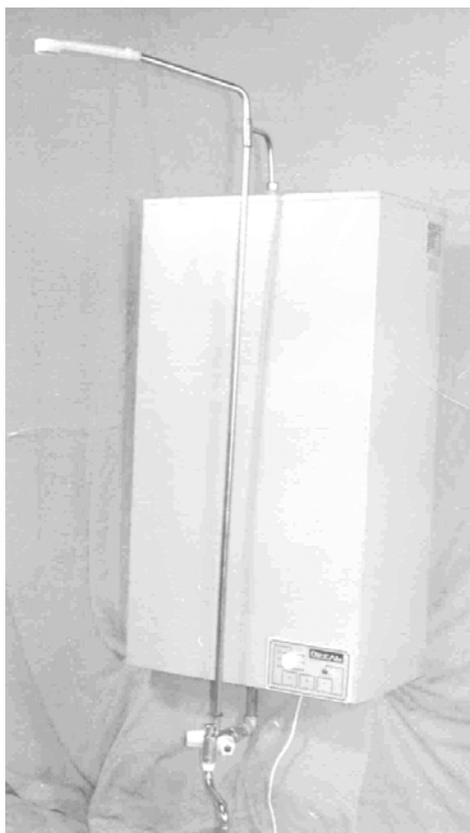


Рис. 26. Аккумуляционный электроводонагреватель ЭВАН-100/1,0 “Орель”

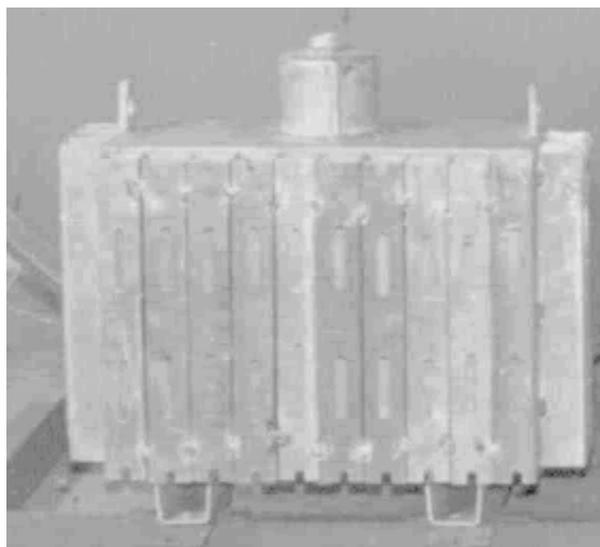


Рис. 27. Проточный электроводонагреватель ЭНТ-16/380



Рис. 28. Электрорадиатор ЭРГНТ– 0,75/220

На основе разработанных электронагревателей ЭВАН-100/1, ЭВП-6/220, ЭВП-6/380, ЭВАН-100/1, ЭНТ-16/380 и электрорадиаторов ЭРГНТ-0,75/220 трансформаторного типа созданы системы децентрализованного отопления и горячего водоснабжения СЖ-8×0,75/1, СЖ-12×0,75/3, СЖ-1×6,0/1, СЖ-2×6,0/3, СЖ-1×16,0/3 и СЖ-2×16,0/3, предназначенные для оборудования индивидуальных домов с отапливаемой площадью 60...300 м². Системы отличаются мощностью, комплектацией и типом используемых нагревательных приборов, имеют емкость аккумуляционного бака 0,1...0,3 м³, емкость бака холодной воды 0,2...50 м³.

Комплектные электрические котельные типа КЭК, выпускаемые на БирЗСТ, предназначены для автоматических аккумуляционных систем отопления общей площадью от 250 до 2000 м². Котельные построены на базе проточных электронагревателей трансформаторного типа ЭВП-50/500, ЭВП-100/500, ЭВП-200/500 и имеют 9 различных исполнений. Мощность котельных от 100 до 800 кВт, емкость аккумулирующего бака от 12 до 64 м³.

В работе предложена методика определительных испытаний трансформатора с короткозамкнутой вторичной обмоткой на надёжность позволяющая установить показатели долговечности в соответствии с ГОСТ 27.002-89 (средний, гамма-процентный и назначенный сроки службы, средний, гамма-процентный и назначенный ресурсы) или показателей безотказности (вероятности безотказной работы и отказов, частота и интенсивность отказов, средняя наработка до отказа). Показано, что основными критериями отказа КЭТ являются: обрыв в схеме; короткое замыкание в обмотках; механическое повреждение конструкции (появление трещин в корпусе, необратимые тепловые деформации); снижение сопротивления изоляции ниже значения 500 МОм; увеличение первичного тока более чем на 10 % от первоначального измеренного при номинальном напряжении.

Надёжность КЗТ определяется, в основном, состоянием изоляции первичной обмотки. Интенсивность старения изоляции зависит от степени соответствия её рабочей температуры классу нагревостойкости и от скорости нарастания температуры. Поэтому для повышения долговечности электронагревателя на базе КЗТ целесообразно ограничивать максимальную скорость нарастания температуры. Это задача может решаться за счёт мягкого включения, обеспечиваемого устройством питания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе решена научная проблема, имеющая важное значение и заключающаяся в создании электронагревательных устройств трансформаторного типа значительно превосходящих существующие электронагреватели других типов по эксплуатационным показателям.

Основными результатами работы являются следующие:

1. Установлено, что использование трансформаторов с короткозамкнутой вторичной обмоткой в качестве нагревательных элементов является одним из наиболее эффективных путей повышения надёжности и безопасности децентрализованного горячего водоснабжения и отопления.

2. Впервые сформулированы принципы формирования нагревательных элементов трансформаторного типа. Разработаны новые конструкции однофазных и трехфазных трансформаторов с короткозамкнутой вторичной обмоткой, предназначенных для работы в качестве нагревательных элементов.

3. Наилучшими массогабаритными, эксплуатационными и технологическими показателями при производстве и эксплуатации электронагревательных приборов, обладают нагревательные элементы, выполненные на основе трансформаторов с короткозамкнутой вторичной обмоткой следующих типов:

- в качестве электроотопительных приборов - однофазные трансформаторы мощностью 0,5 - 0,75 кВт с короткозамкнутой вторичной обмоткой, выполненной из токопроводящей ленты;

- в качестве тепловентиляторов – нагреватели с вращающимся тепловыделяющим элементом

- в качестве нагревательных элементов для бытовых установок электроводонагрева аккумуляционного типа - однофазные тороидальные трансформаторы мощностью 1,0 - 1,25 кВт с короткозамкнутой вторичной обмоткой в виде объёмной поллой камеры, внутри которой находится магнитопровод с первичной обмоткой;

- в качестве нагревательных элементов для бытовых установок электроводонагрева проточного типа - короткозамкнутые однофазные тороидальные трансформаторы мощностью 2,0 – 5,0 кВт;

- в качестве нагревательных элементов для систем горячего водоснабжения жилых домов проточного типа - однофазные и короткозамкнутые трехфазные трансформаторы мощностью 2,0 – 25,0 кВт с вынесенной нагрузкой или с пространственной магнитной системой;

- в качестве электронагревательных устройств для систем децентрализованного горячего водоснабжения (электрокотельные) - короткозамкнутые трехфазные трансформаторы мощностью 40,0 – 200,0 кВт с плоским стержневым магнитопроводом;

- в качестве электронагревательных устройств с электронными устройствами управления короткозамкнутые трансформаторы повышенной частоты.

4. На основе методов теории электромагнитных и тепловых полей, моделирования электромеханических преобразователей энергии создана научная основа для исследований, расчета и проектирования электронагревателей трансформаторного типа.

5. Выявлены особенности электромагнитных процессов в однофазных и трёхфазных трансформаторах с короткозамкнутой вторичной обмоткой, учитывающие особенности их работы в качестве нагревательного элемента. Определены условия снижения максимального значения тока включения. Установлено, что активное сопротивление короткозамкнутой вторичной обмотки определяется лишь относительными параметрами. Получены соотношения, позволяющие определить величину относительного значения активного сопротивления короткозамкнутой вторичной обмотки. Разработаны и программно реализованы методики электромагнитного расчёта однофазных и трёхфазных трансформаторов с короткозамкнутой вторичной обмоткой учитывающие особенности их работы в качестве нагревательного элемента.

6. Разработанные тепловые схемы замещения и выполненные на их основе исследования позволяют анализировать тепловое состояние трансформаторов с короткозамкнутой вторичной обмоткой, работающих в режиме нагревательного элемента. Показано, что одним из наиболее эффективных методов моделирования теплового состояния трансформаторов с короткозамкнутой вторичной обмоткой является метод конечных элементов. Исследования теплового состояния нагревательных элементов однофазных тороидальных короткозамкнутых трансформаторов целесообразно проводить в цилиндрической системе координат, а трехфазных трансформаторов с пространственной магнитной системой – в декартовой системе координат. Созданы и программно реализованы математические модели теплового поля в однофазных и короткозамкнутых трехфазных трансформаторах.

7. С целью выбора варианта при проектировании нагревательных элементов трансформаторного типа целесообразно использовать метод планирования численного эксперимента, с помощью которого установлена связь максимальной температуры изоляции и стоимости трансформатора от электромагнитных нагрузок, геометрических соотношений и размеров. Разработаны рекомендации по выбору электромагнитных нагрузок, геометрических размеров и соотношений при проектировании исследуемых трансформаторов минимальной стоимости.

8. Выявлены особенности работы нагревательных устройств на основе трансформаторов с короткозамкнутой вторичной обмоткой в децентрализованных системах энергообеспечения. Выбор частоты питающего напряжения в таких системах определяется типом источника электропитания, мощностью, напряжением прикосновения или электродвижущей силой витка, а также типоразмером магнитопровода. Предложены источники электропитания для децентрализованных систем энергообеспечения.

9. Научные разработки автора и технические решения, защищенные авторскими свидетельствами и патентами, использованы при создании и освоении серийного производства ряда однофазных и трехфазных электронагревательных устройств трансформаторного типа, а также в учебном процессе, что подтверждается соответствующими документами. Анализ результатов освоения производства и опыт эксплуатации серийных образцов аккумуляционных и проточных электроводонагревателей, электрорадиаторов трансформаторного типа, а также децентрализованных систем электроотопления и горячего водоснабжения на их основе, подтверждают эффективность использования нагревательных элементов трансформаторного типа.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Монография:

1. Кузьмин В.М. Электронагревательные устройства трансформаторного типа. - Владивосток: Дальнаука, 2001. - 143 с.

Учебное пособие:

2. Кузьмин В.М. Основы теории и расчет бытовых вентиляторов: Учеб. пособие - Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре гос. техн. ун-т, 2001. - 78 с. (Гриф ДВ РУМЦ (УМО)).

Свидетельства и патенты:

3. А.с. 1811038 СССР, МКИ Н 05 В 6/10. Индукционный нагреватель жидкой среды /А.В. Янченко, В.М. Кузьмин, А.В. Пяталов, Ю.М. Гуревич (СССР).– № 4861336/07; Заявлено 12.06.90; Опубл. 23.04.93. Бюл. № 15. – 4 с.
4. Свидетельство РФ № 2692 на полезную модель, МКИ Н 05 В 6/10. Трёхфазное электронагревательное устройство трансформаторного типа /В.М. Кузьмин, А.В. Сериков (Россия). – № 95105690/20; Заявлено 13.04.95; Опубл. 16.08.96. Бюл. № 8.– 1с.
5. Свидетельство РФ № 3674 на полезную модель, МКИ Н 05 В 6/10, F 24 Н 3/04. Электронагреватель /С.Н. Иванов, В.М. Кузьмин, (Россия). – № 95115749/20; Заявлено 11.09.95; Опубл. 16.02.97. Бюл. № 2. – 1 с.
6. Пат. 2101882 РФ, МКИ Н 05 В 6/10, F 24 Н 1/10. Электроводонагревательное устройство трансформаторного типа /В.М. Кузьмин, А.В. Сериков, С.П. Бобровский (Россия). - № 94044177/09; Заявлено 15.12.94; Опубл. 10.01.98. Бюл. № 1 – 3 с.
7. Свидетельство РФ № 5482 на полезную модель, МКИ Н 05 В 3/00. Электронагреватель /С.Н. Иванов, В.М. Кузьмин, (Россия). – № 96115617/20; Заявлено 26.07.96; Опубл. 16.11.97. Бюл. № 11. – 1 с.
8. Пат. 2109413 РФ, МКИ Н 05 В 6/10, F 24 Н 3/04. Электронагревательное устройство /В.М. Кузьмин, С.П. Бобровский, А.В. Сериков, Ю.М. Гуревич, А.В.Пяталов (Россия). - № 96107425/09; Заявлено 16.04.96; Опубл. 20.04.98. Бюл. № 11 – 3 с.
9. Свидетельство РФ № 9114 на полезную модель, МКИ Н 05 В 6/10. Электронагреватель /С.Н. Иванов, В.М. Кузьмин, Н.Н. Мельникова (Россия). – № 97121536/20; Заявлено 23.12.97; Опубл. 16.01.99. Бюл. №1. – 2 с.
10. Свидетельство РФ № 12303 на полезную модель, МКИ Н 02 М 5/257, Н 05 В 6/10. Стабилизатор переменного напряжения /В.С. Климаш, В.М. Кузьмин, Р.Н. Круговой, Д.А. Киба (Россия). – № 99111675/20; Заявлено 26.05.99; Опубл. 16.12.99. Бюл. № 12. – 2 с.
11. Пат. 2153779 РФ, МКИ Н 05 В 6/10, F 24 Н 1/10. Электроводонагреватель трансформаторного типа / А.В. Сериков, В.М. Кузьмин, Р.Г. Игнатов (Россия). - № 98113611/09; Заявлено 15.07.98; Опубл. 27.07.2000. Бюл. № 21 – 1 с.
12. Свидетельство РФ № 13133 на полезную модель, МКИ Н 05 В 6/10. Электронагреватель трансформаторного типа /В.М. Кузьмин, А.В. Сериков, К.Е. Тюсов, Л.В. Меренкова (Россия). – № 99117308/20; Заявлено 06.08.99; Опубл. 20.03.00. Бюл. № 8. – 1 с.
13. Пат. 2164644 РФ, МКИ F 24 Н 3/04, Н 05 В 6/10. Электронагревательное устройство трансформаторного типа /В.М. Кузьмин, В.А.Размыслов, Т.В. Герасименко (Россия). - № 99111041/06; Заявлено 26.05.99; Опубл. 27.03.2001. Бюл. № 9 – 3 с.
14. Свидетельство РФ № 21992 на полезную модель, МКИ Н 05 В 6/10. Электроводонагреватель трансформаторного типа /В.М. Кузьмин, А.В. Сериков, М.М. Борисенко (Россия). - № 2001116347/20; Заявлено 13.06.2001; Опубл. 27.02.2002. Бюл. № 6 – 2 с.

15. А.с. 1051660 СССР, МКИ Н 02 К 29/00. Машинно-вентильный источник трехфазного напряжения стабильной частоты. /Ш.С.Ройз, А.Б.Цукублин, В.М. Кузьмин, А.И. Озга (СССР).– № 3383511/24-07; Заявлено 20.01.82; Оpubл. 30.10.83. Бюл. №40.– 5с.
16. А.с. 1046862 СССР, МКИ Н 02 К 29/00. Машинно-вентильный источник трехфазного напряжения стабильной частоты. /Ш.С.Ройз, А.Б.Цукублин., В.М. Кузьмин, Б.В. Лукутин, А.И. Озга (СССР). – № 3380017/24-07; Заявлено 08.01.82; Оpubл. 07.10.83. Бюл. № 37. – 6 с.
17. А.с. 1144171 СССР, МКИ Н 02 К 29/00, Н 02 М 5/48. Машинно-вентильный источник трехфазного напряжения стабильной частоты. / Ш.С. Ройз, А.Б. Цукублин, Б.В. Лукутин, А.И. Озга, А.В. Пяталов, В.М. Кузьмин (СССР). - № 3633407/24-07; Заявлено 05.08.83; Оpubл. 07.03.85. Бюл. 9. – 6 с.
18. А.с. 1149357 СССР, МКИ Н 02 М 5/48, Н 02 К 29/00. Машинно-вентильный источник трехфазного напряжения стабильной частоты. /Ш.С. Ройз, А.Б. Цукублин, В.М. Кузьмин, А.И. Озга (СССР). - № 3576674/24-07; Заявлено 11.04.83; Оpubл. 07.04.85. Бюл. № 13. – 5 с.
19. Свидетельство РФ № 10791 на полезную модель, МКИ F 03 D 1/00. Генератор для микроГЭС. /В.М. Кузьмин, Р.В. Кузьмин (Россия). - № 98121288/20; Заявлено 23.11.98; Оpubл. 16.08.99. Бюл. №8. – 2 с.

Статьи, тезисы докладов:

20. Кузьмин В.М, Сериков А.В. Разработка и исследование трансформаторов для установок электроводонагрева //Электротехника - 2001 - № 7 - С. 45-51.
21. Размыслов В.А., Кузьмин В.М., Мельникова Н.Н Расчет теплового поля проточного индукционного электроводонагревателя //Известия ВУЗов «Электромеханика». - 1988 - № 8 - С. 15-19.
22. S. Ivanov, V. Kuzmin, V. Razmyslov, V. Romanyuk, A. Serikov, A. Yanchenko. Design and investigation of transformer-type electric heaters.The third international conference on new entry system and conversions (NESSC'97) – Kasan, 1997. – P. 209-214.
23. Кузьмин В.М. Электронагревательные устройства трансформаторного типа. Выставка российских наукоемких технологий – Каталог. Харбин, КНР, 1996. – С. 140-141. (Кит. яз.).
24. Кузьмин В.М., Мельникова Н.Н., Размыслов В.А. Расчет теплового поля трансформатора для нагрева воды. Деп. в Информэлектро»; Оpubл. ВИНТИ, 1987, № 11. С. 172.
25. Кузьмин В.М., Размыслов В.А., Мельникова Н.Н. Оптимизация конструкции тороидального трансформатора для нагрева воды. Теория и расчет электромеханических систем и устройств их обеспечения.-Межвуз. сб.научн.тр., Хабаровск, 1989г. С. 98-103.
26. Иванов С.Н., Кузьмин В.М., Скрипилев А.А. Методика определительных испытаний нагревательного элемента трансформаторного типа на надежность. Вестник Комсомольского-на-Амуре гос.техн. ун-та. Сб. 5. Электромеханика и автоматизация производственных систем. – Сб.науч.тр., Комсомольск-н/А, 1996г. – С. 33-37.
27. Сериков А.В., Кузьмин В.М. Особенности электромагнитного расчёта трёхфазного нагревательного элемента трансформаторного типа с пространственной магнитной системой. Вестник Комсомольского-на-Амуре гос.техн. ун-та. Сб. 5. Электромеханика и автоматизация производственных систем. – Сб.науч.тр. Комсомольск-н/А, 1996.– С. 57-66.
28. Иванов С.Н., Кузьмин В.М. Вопросы учета параметров надежности объектов научно-технического обеспечения. Научное и научно-техническое обеспечение экономического и социального развития Дальневосточного региона. Материалы докл. междунар. симпозиума, Комсомольск-н/А, 1999г. С. 22.

29. Кузьмин В.М., Киба Д.А. Особенности анализа безопасности и экологичности высокочастотных трансформаторных устройств электронагрева. Научное и научно-техническое обеспечение экономического и социального развития Дальневосточного региона. Материалы докл. междунар. симпозиума, Комсомольск-н/А, 1999г. С.154-155.
30. Кузьмин В.М., Размыслов В.А. Электрообогревательные устройства трансформаторного типа. Научное и научно-техническое обеспечение экономического и социального развития Дальневосточного региона. Материалы докл. междунар. симпозиума, Комсомольск-н/А, 1999г. С.23-24.
31. Сериков А.В., Кузьмин В.М. Расчет теплового поля трехфазного электроводонагревателя трансформаторного типа. Электроэнергетика и энергосберегающие технологии: Сб.научн.тр. – Владивосток: Дальневост.гос.техн. ун-т, 1998.- С. 43 – 51.
32. Сериков А.В., Кузьмин В.М. Расчет механической прочности вторичной обмотки короткозамкнутого трансформатора. Проблемы механики сплошной среды. Ч.1: Материалы международной научно-техн. конф., Комсомольск-н/А, 1997г.
33. Кузьмин В.М., Размыслов В.А., Степанова И.П. Тепловое состояние электроводонагревателей трансформаторного типа с трубчатой короткозамкнутой вторичной обмоткой. Повышение эффективности и надежности систем электроснабжения: Межвуз. сб.научн.тр. Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 1999. – С. 166-169.
34. Кузьмин В.М. Электронагревательные устройства трансформаторного типа //Инновационные предложения научных организаций Хабаровского края: Сб. науч. разработок – Хабаровск: Б.И., 1999. – С. 11.
35. Кузьмин В.М., Размыслов В.А. Пяталов АВ. Аккумуляционный электроводонагреватель "Орель" Информационный листок № 134-88, ЦНТИ, г.Хабаровск, 1988г.
36. В.М.Кузьмин, В.А.Размыслов. Синергетический подход к исследованию электрического поля и определению параметров короткозамкнутых обмоток электронагревательных устройств трансформаторного типа. Материалы докл. междунар. симпозиума, Комсомольск-н/А, 2000г. - С. 291 – 293.
37. Кузьмин В.М. Трансформаторы с короткозамкнутой вторичной обмоткой для установок электронагрева. Материалы международной научно-технической конференции «Электромеханические преобразователи энергии», Томск, 2001 г., С. 125.
38. Кузьмин В.М. Регулирование мощности электронагревателей трансформаторного типа. Материалы международной научно-технической конференции «Электромеханические преобразователи энергии», Томск, 2001 г., С. 127.
39. Кузьмин В.М., Ройз Ш.С., Цукублин А. Б. Энергетические соотношения в модуляционном вентильном генераторе. Оптимизация режимов работы систем электроприводов. - Межвуз. сб.научн. тр., Красноярск, 1981г.
40. Кузьмин В.М., Ройз Ш.С., Саяпин В.С. Трехфазный модуляционный вентильный генератор. Исследование специальных электрических машин и машинно-вентильных систем. - Межвуз. сб.научн.тр., Томск, 1979г., С. 163-167.
41. Кузьмин В.М., Ройз Ш.С. Озга А.И., Работа НПЧ в трехфазном источнике стабильной частоты. Исследование специальных электрических машин и машинно-вентильных систем. - Межвуз.сб. науч. тр., Томск, 1984г.
42. Кузьмин В.М., Ожегов В.Г., Пяталов А.В. Проточный электроводонагреватель для сельскохозяйственных ферм на базе серийных трансформаторов серии ТМ. Тезисы докл. 2-й Всесоюзной научно-технической конференции «Энергосберегающее электрооборудование для АПК» Москва, 1990г.
43. Кузьмин В.М., Пяталов А.В. Возможности использования энергии ветра для производства тепла и электрической энергия. Тезисы докладов и сообщений Всесоюзной научно–практической конференции "Развитие и размещение производственных сил

и транспортное обеспечение Дальневосточного экономического региона на период до 2005 года", Хабаровск, 1984 г.

44. Кузьмин В.М., Пяталов А.В. Децентрализованные системы энергообеспечения с электроводонагревателями трансформаторного типа. Тезисы докладов Республиканской научно-технической конференции «Электромеханические преобразователи и машинно-вентильные системы», Томск, 1991г.
45. Кузьмин В.М., Размыслов В.А., Бобровский С.П. Трехфазные электроводонагреватели трансформаторного типа. Тезисы докладов Республиканской научно-технической конференции «Электромеханические преобразователи и машинно-вентильные системы», Томск, 1991г.
46. Кузьмин В.М., Сериков А.В., Бобровский С.П. Применение децентрализованных систем горячего водоснабжения и отопления в строительстве. Тезисы докладов Международного научно-технического симпозиума. Комсомольск-н/А, 1993г.
47. Сериков А.В, Кузьмин В.М., Бобровский С.П. Математическая модель трехфазного электроводонагревателя трансформаторного типа. Тезисы докладов Международного научно-технического симпозиума. Комсомольск-н/А, 1994г.
48. Сериков А.В., Кузьмин В.М. Оптимизация конструкции и выбор основных электромагнитных нагрузок в нагревательном элементе трансформаторного типа. Тезисы докладов Всероссийской научно-технической конференции. г.Иркутск, 1994г.-С. 40-41.