

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Комсомольский-на-Амуре государственный
технический университет»

На правах рукописи

ЛИТОВЕЦ АНТОН ВЛАДИМИРОВИЧ
РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СИЛОВОГО
ТРАНСФОРМАТОРА С БЛОКОМ НАГРЕВА ЖИДКОСТИ

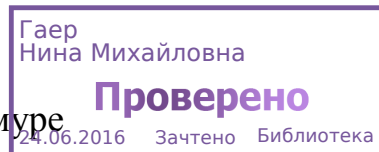
АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ

на соискание академической степени магистра техники и
технологии

Направление 13.04.02 – «Электроэнергетика и электротехника»

Профиль – «Электроснабжение»

Комсомольск – на – Амуре



2016

Работа выполнена на кафедре «Электромеханика» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (КНАГТУ).

Научный руководитель :

Доктор технических наук, профессор Сериков Александр Владимирович

Рецензент:

Кандидат технических наук, заместитель директора УПК, Филиал ПАО «Компании Сухой» «КнААЗ им.Гагарина» Киница Олег Игоревич

С диссертацией можно ознакомиться на кафедре «Электромеханика»

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время одной из самых актуальных задач является вопрос повышения энергоэффективности, в том числе систем теплоснабжения. Замена традиционных видов нагрева на основе твёрдого, жидкого или газообразного топлива электронагревом повышает надежность и безопасность оборудования, облегчает регулирование и контроль температуры. Развитие электронагревательных приборов является очень важным мероприятием, направленным на повышения жизненного уровня, производительности труда и экономию времени, улучшения условий помещений и создание комфорта. Поэтому важной и сложной проблемой в развитии экономики является проблема повышения эффективности производства и использования тепловой энергии.

Особое значение применения электронагревательных устройств приобретает для объектов, которые не имеют централизованного отопления, но нуждаются в поддержании температурного режима. В децентрализованных системах теплообеспечения и горячего водоснабжения наиболее целесообразно использовать более безопасные и надежные электронагревательные устройства. Именно к таким устройствам можно отнести силовой трансформатор с блоком нагрева жидкости. Тепловыделяющий контур в таких установках выполняется в виде короткозамкнутого витка. Нагревательная обмотка может выполняться цилиндрического и трубчатого типов из ленты или листов электропроводящего материала, по которым пропускается теплоноситель (вода, антифриз, трансформаторное масло и т.п.).

В настоящее время, несмотря на быстрое расширение производства электронагревателей, спрос на них значительно превышает предложение. Для обеспечения потребностей промышленно-бытового сектора необходимо развитие производства установок электронагрева, создание новых видов нагревателей и разработка методик по их расчету и проектированию.

Целью работы является разработка конструкции силового трансформатора с блоком нагрева жидкости, получение рекомендаций для проектирования и исследование особенностей электромагнитного и теплового расчётов.

Методика выполнения работы базировалась на применении математического и имитационного моделирования. В теоретических исследованиях использовались методы расчёта электромагнитных и тепловых процессов. Постановка и обработка экспериментов и моделирования велась с использованием персонального компьютера и современного программного обеспечения.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- Разработана конструкция силового трансформатора с блоком нагрева жидкости, позволяющая повысить КПД трансформаторного хозяйства;
- Выявлены особенности электромагнитного и теплового расчётов;
- Получены рекомендации по способу управления нагревательным блоком;
- Получены рекомендации по выбору конструкции и размеров тепловыделяющего контура цилиндрического типа;
- Для анализа электромагнитных процессов на базе существующей методики разработан алгоритм расчёта силового трансформатора с блоком нагрева жидкости;

Практическая ценность работы заключается в разработке новой конструкции силового трансформатора с блоком нагрева жидкости, позволяющая повысить КПД трансформаторного хозяйства, её исследовании и выработке

Апробация работы. Основное содержание работы докладывалось и получило одобрение на:

- трех научно-практических конференциях аспирантов и студентов Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета с 2014 по

2016 г. По результатам конференции подготовлены тезисы докладов для публикации в сборники «Научно-техническое творчество аспирантов и студентов: материалы 44-й научно-технической конференции студентов и аспирантов» (2014г.); «Научно-техническое творчество аспирантов и студентов: материалы 45-й научно-технической конференции студентов и аспирантов» (2015г.); «Научно-техническое творчество аспирантов и студентов: материалы 46-й научно-технической конференции студентов и аспирантов» (2016г.).

– получен патент на полезную модель МПК H05B6/10 «Устройство для преобразования энергии с регулируемым нагревом жидкости»

– XI международной IEEE Сибирской конференции по управлению и связи SIBCON-2015 на базе Омского государственного технического университета. По результатам конференции опубликована статья в сборнике научных трудов. :Электротехника: сетевой электронный научный журнал (2015г.).

– международной научной практической конференции по проблемам экологии и безопасности Дальневосточная весна - 2016 в г. Комсомольске-на-Амуре. По результатам конференции опубликована статья в сборнике «Дальневосточная весна – 2016: материалы 14-й Международной научной практической конференции по проблемам экологии и безопасности».

Публикации. По результатам исследований, отражённых в диссертационной работе написаны научно-исследовательские статьи в сборники «Тезисы докладов 44-й, 45-й и 46-й научно-технической конференции аспирантов и студентов» (2014-2016 гг.), Электротехника: сетевой электронный научный журнал (2015г.), ФГБОУ ВО «КнАГТУ»: Дальневосточная весна 2016. Получен патент 160354 РФ на полезную модель, МПК H05B6/10. Общее количество публикаций – 6.

Объем и структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти разделов, заключения и списка использованных источников из 29 наименований, содержит 92 страницы машинописного текста, 31 рисунка и 1 приложение.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, приводится краткое изложение цели работы, намечен круг решаемых задач.

В первой главе рассматриваются основные принципы построения нагревательных элементов трансформаторного типа, рассмотрены достоинства и недостатки данных устройств.

К достоинствам НЭТ можно отнести:

1. Высокий класс защиты от поражения электрическим током, который обеспечивается за счет:

а) отсутствия электрической связи между вторичной обмоткой и сетью;

б) многоуровневой электрической изоляции первичной обмотки;

в) при расчётах, напряжение витка выбирается таким образом, чтобы электрический потенциал на вторичной обмотке был менее допустимого по условиям безопасности эксплуатации.

2. Большой срок службы. Так как этот показатель в основном зависит от срока службы изоляционных материалов, применяемых в НЭТ, то при расчётах электромагнитные нагрузки и основные геометрические соотношения выбираются так, чтобы температура первичной обмотки не превышала допустимых, для заданного класса нагревостойкости электроизоляционных материалов, значений. Большая поверхность теплоотдачи резко снижает интенсивность образования накипи, что обеспечивает стабильность теплового режима и также повышает срок службы НЭТ для установок электронагрева.

3. Высокий коэффициент мощности, который обеспечивается за счёт наличия шихтованного магнитопровода и малых полей рассеяния обмоток.

К недостаткам НЭТ можно отнести достаточно большие массу и размеры, но следует учитывать, что масса и размеры нагревательного элемента обычно не составляют основную часть массы и размеров всего электронагревательного устройства. Поэтому, указанные недостатки, в большинстве случаев, не являются определяющими факторами.

В децентрализованных системах теплообеспечения и горячего водоснабжения наиболее целесообразно использовать более безопасные и надежные электронагревательные устройства. Именно к таким устройствам можно отнести силовой трансформатор с блоком нагрева жидкости. Тепловыделяющий контур в таких установках выполняется в виде короткозамкнутого витка. Нагревательная обмотка может выполняться цилиндрического и трубчатого типов из ленты или листов электропроводящего материала, по которым пропускается теплоноситель (вода, антифриз, трансформаторное масло и т.п.). В процессе выполнения работы были найдены и проанализированы существующие технические решения на основе нагревательных элементов трансформаторного типа. Изучены принципы построения и классификации НЭТ, достоинства и недостатки стороны данных устройств

Предложена конструкция трансформатора с блоком нагрева жидкости на базе силового масляного трансформатора (рисунок 1). Исследуемая конструкция состоит из магнитопровода, обмоток НН и ВН для преобразования напряжения, а также нагревательного блока, состоящего из диэлектрического герметичного корпуса в котором циркулирует нагреваемая жидкость и тепловыделяющего контура. Для регулирования мощности тепловыделений ТВК состоит из разомкнутого цилиндра и вентильного полупроводникового устройства, используемого для замыкания контура. Таким образом предложенное устройство можно изготавливать на существующих предприятиях трансформаторостроения по традиционным технологиям, а регулирование мощности нагревательного блока или температуры нагреваемой воды осуществляется путём изменения угла включения вентиля или периодическим включением и отключением вентиля. Кроме этого часть потерь трансформатора идёт на полезный нагрев жидкости.

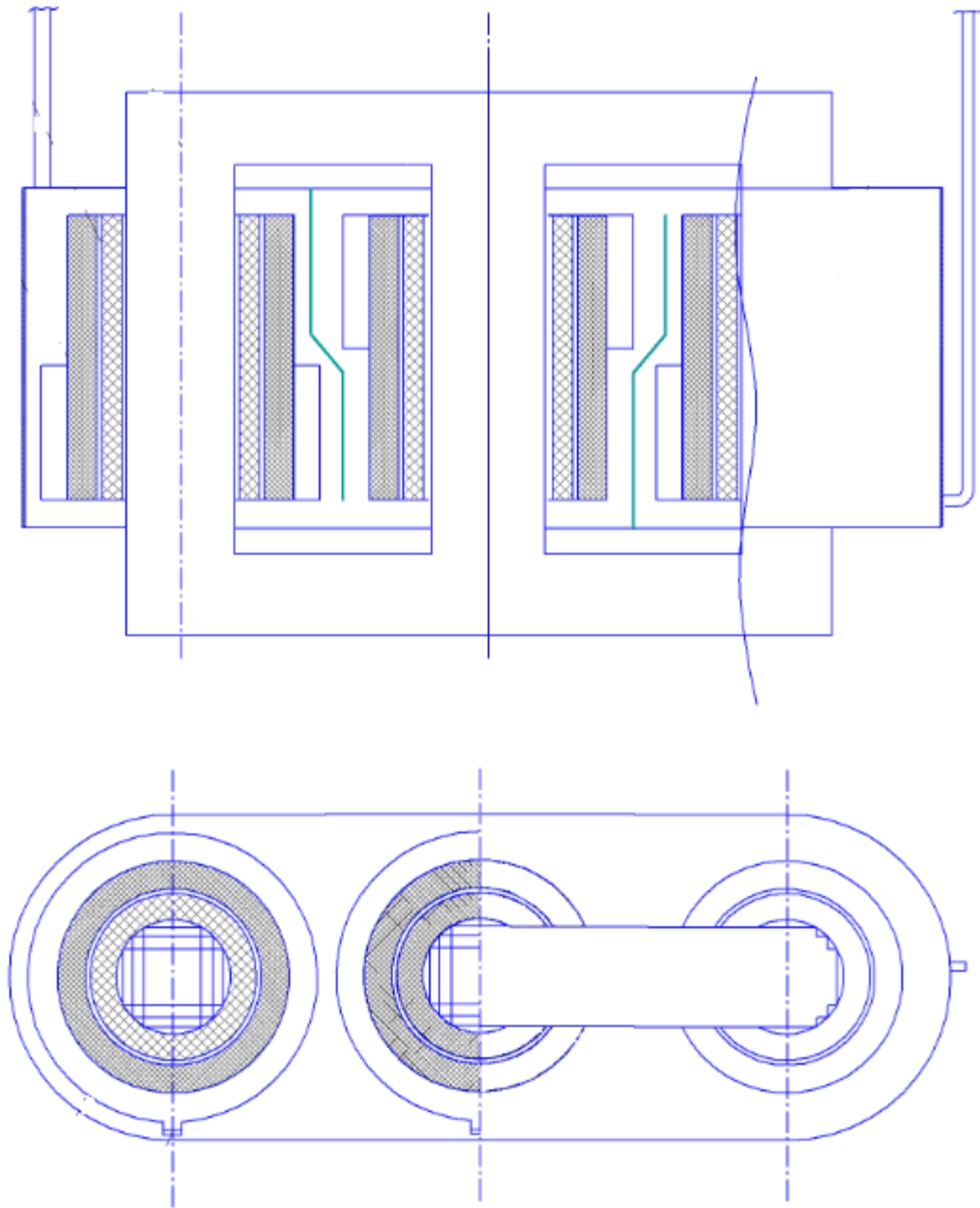


Рисунок 1 – Активная часть силового трансформатора с блоком нагрева жидкости

Вторая глава посвящена особенностям электромагнитных процессов в трансформаторах с короткозамкнутой обмоткой. Рассмотрены общие сведения о расчётах силовых трансформаторов и особенности трансформаторов с нагревательным блоком. Конструкция нагревательных элементов трансформаторного типа имеет много общего с конструкцией силовых трансформаторов (наличие магнитопровода, первичной и вторичной обмоток). Особенности исследуе-

ных электронагревательных устройств является наличие короткозамкнутой одновитковой вторичной обмотки с большой и неравномерно распределённой по длине витка плотностью тока.

Для анализа электромагнитных процессов на базе существующей методики разработан алгоритм расчёта силового трансформатора с блоком нагрева жидкости (рисунок 2). Особенностью расчёта тепловыделяющего контура является то, что замыкание тока происходит через вентиляльные устройства, в которых происходит дополнительное падение напряжения. Кроме этого необходимо учитывать потери при протекании тока через вентили (рисунок 3).

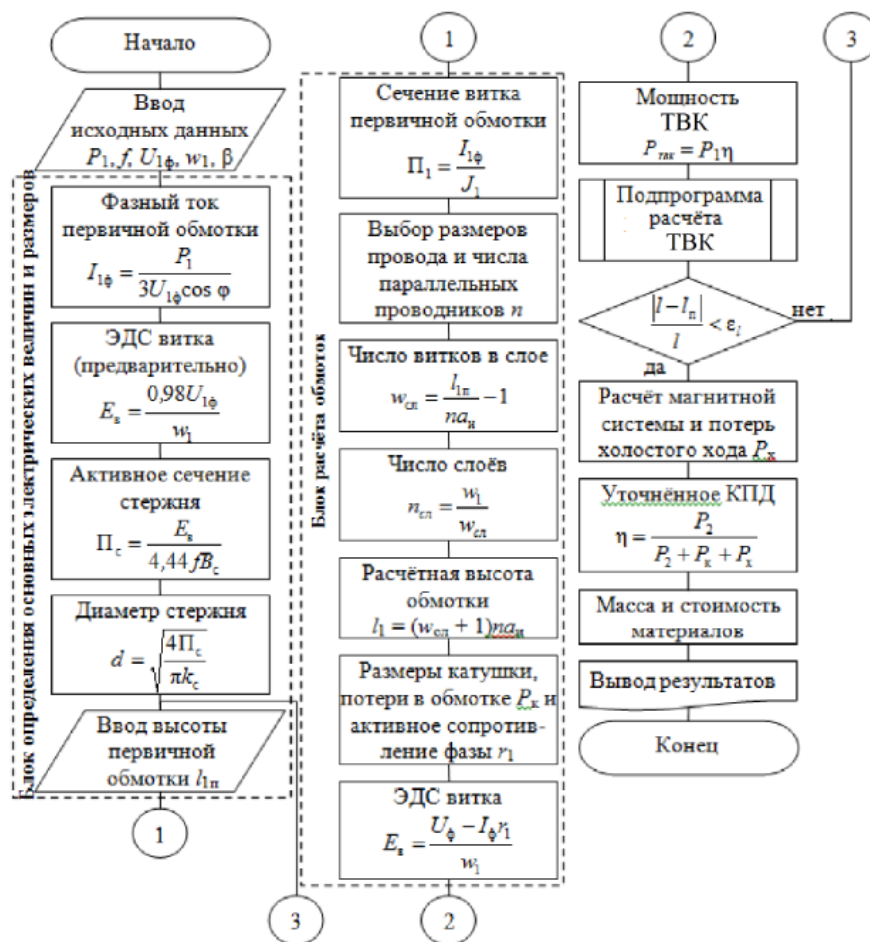


Рисунок 2 – Алгоритм расчёта силового трансформатора с блоком нагрева жидкости

ПОДПРОГРАММА РАСЧЁТА ТВК

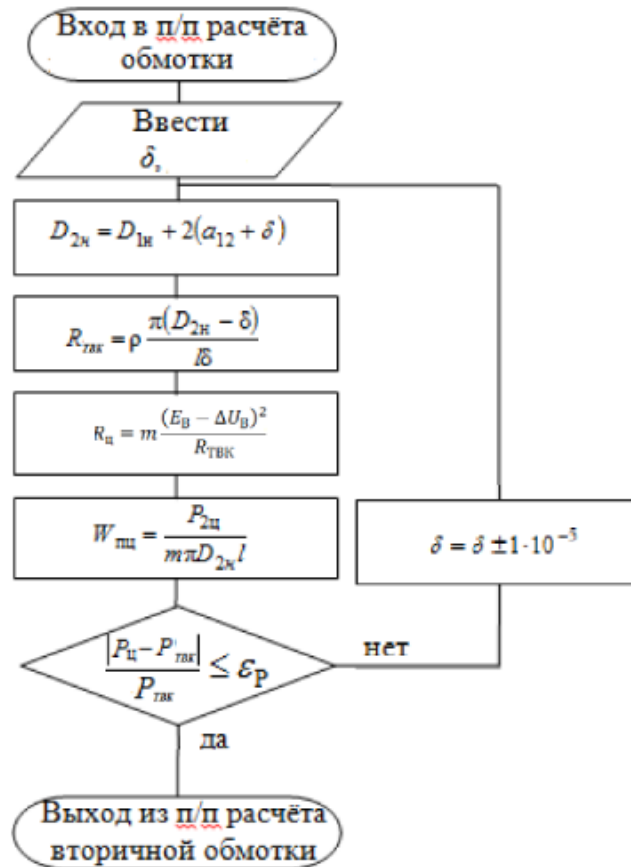


Рисунок 3 – Подпрограмма расчёта тепловыделяющего контура

Так как тепловыделяющий контур замыкается в некоторых точках с помощью вентилях была поставлена задача уточнения сопротивления контура с целью обеспечения необходимой мощности. Для этого выполнено моделирование электрического поля, которое описывается дифференциальным уравнением

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} = 0, \text{ где } U - \text{электрический потенциал.}$$

На границах области исследования задаются граничные условия (рисунок 4). С учётом этого с помощью программы elcut выполнен расчёт электрического поля. Определены токи через рассматриваемые области и определены активные сопротивления.

Были исследованы различные варианты расположения вентилях (рисунок 5). В каждой фазе вторичной обмотки могут располагаться несколько вентиляхных устройств. Для создания короткозамкнутого контура вентиляхные полупроводниковые приборы могут включаться различными сочетаниями, таким обра-

зом осуществляется регулирование мощности, тем самым позволяя регулировать температуру нагреваемой жидкости. Для определения распределения тока

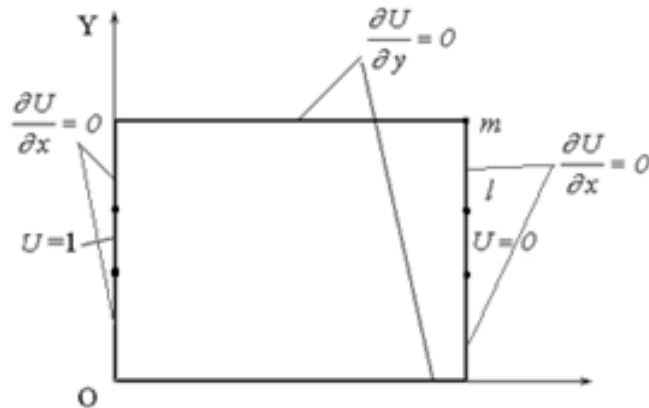


Рисунок 4 – Граничные условия

при различных вариантах включения вентилях были смоделированы электрические поля (рисунок 5). В результате было выявлено, что при одновременном включении различных сочетаний вентилях передаваемая мощность увеличивается незначительно (меняется в диапазоне 20%), таким образом применение нескольких устройств на одном листе можно считать не целесообразным. Возможным вариантом решения задачи является разделение целого листа вторичной обмотки на ряд изолированных друг от друга полос, замыкаться каждая из которых будет отдельным вентиляльным устройством. Таким образом, является возможным достижение плавного и эффективного регулирования нагревательного устройства. Исходя из вышесказанных выводов обмотка нагревательного блока была выполнена согласно рисунку. Обмотки соседних фаз НБ в окне магнитопровода располагаются друг над другом, что кроме прочего позволяет уменьшить ширину окна магнитопровода.

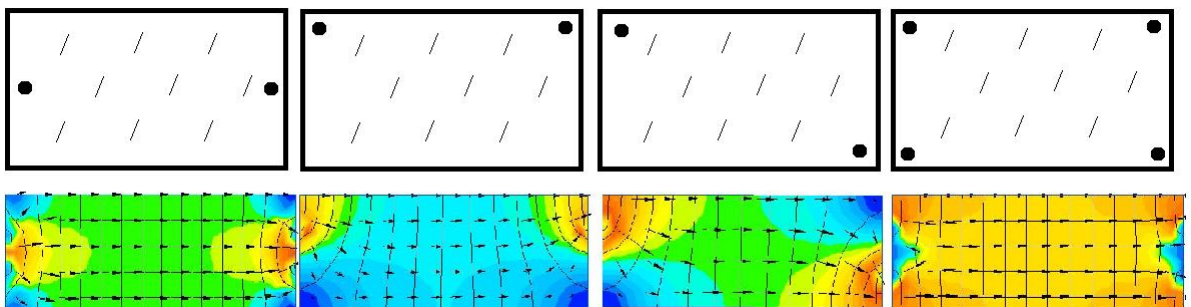


Рисунок 5 – Моделирование электрических полей

Третья глава посвящена тепловым процессам в трансформаторе с блоком нагрева жидкости.

Оценка теплового состояния электротехнического устройства является необходимой задачей при создании, проектировании и расчёте новых изделий, в том числе трансформатора с блоком нагрева жидкости.

При исследовании тепловых процессов были проанализированы тепловые потоки от различных частей трансформатора (рисунок 1). Выявлено, что часть потерь холостого хода и короткого замыкания идут на полезный нагрев жидкости. Таким образом повышается КПД трансформатора.

Были произведены расчёты трансформатора ТМ-1000-35/10 с блоком нагрева жидкости мощностью 40 кВт. Тепловой расчёт электротехнического устройства позволяет определить уровень нагрева различных элементов его конструкции при заданной температуре окружающей среды или (и) температуры теплоносителя в системе охлаждения. В НБ теплоносителем является нагреваемая вода и тепловое состояние будет зависеть от её параметров (расход, значение температуры на входе и выходе и др.).

Использование метода тепловых схем замещения при исследовании и оценки теплового состояния нагревательного блока позволяет получить результаты, удовлетворяющие практическим требованиям, не прибегая к усложнению математической модели процесса теплообмена. Анализ результатов теплового расчёта также даёт возможность определить геометрические размеры каналов, образующих в водонагревателе своеобразный лабиринт для протекающей через него воды. Следует отметить, что размеры этих каналов имеют большое влияние на эффективность работы электронагревателя в целом и могут быть определены только из теплового расчёта путём сравнения нескольких вариантов.

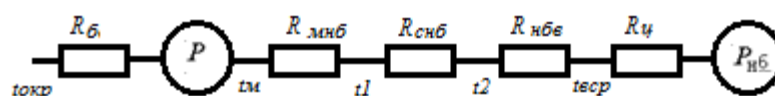


Рисунок 6 – Тепловая схема замещения

Эквивалентная тепловая схема электроводонагревателя показана на рисунке 6. Источниками тепла являются мощность нагревательной обмотки $P_{НБ}$, потери в первичной и вторичной обмотках, а также потери в сердечнике P . В схеме имеются следующие термические сопротивления конвективной теплоотдачи: R_{δ} – с поверхностей бака в воздух; $R_{\text{ц}}$ – нагревательного блока; $R_{\text{нбв}}$ – с поверхности стенки бака в воду; $R_{\text{мнб}}$ – от масла в нагревательный блок; $R_{\text{снб}}$ – от стенки бака в окружающий воздух. Температуру воздуха окружающей среды $T_{\text{окр}}$, температуру воды на входе $T_{\text{ВХ}}$ и выходе $T_{\text{ВЫХ}}$, а также среднюю температуру воды в канале вторичной обмотки $T_{\text{В}} = (T_{\text{ВХ}} + T_{\text{ВЫХ}})/2$ можно считать заданными.

В ходе проведения исследования было выявлено, что более 10% потерь полезно используются для нагрева теплоносителя в нагревательном блоке. Причём данные значения были получены в наиболее нагруженном режиме, т.е. при работающем блоке нагрева жидкости. Процент потерь, полезно использующихся для нагрева возможно увеличить с помощью уменьшения температуры воды в блоке нагрева (т.е. уменьшая температуру воды в нагревательном блоке, большее количество тепла будет передаваться от потерь), а также за счёт оптимизации конструкции нагревательного блока.

В ходе проведения исследования был проведён тепловой расчёт трансформатора без нагревательного блока и с ним, в ходе которого было установлено, что размеры бака с нагревательным блоком являются меньшими, чем размеры бака с подобранными радиаторами, при этом превышение температуры масла над температурой окружающей среды является незначительно более низким, чем с радиаторами.

Четвертая глава посвящена вопросу надёжности и безопасности устройства. Преимущества безопасности нагревательных элементов на основе устройств трансформаторного типа перед нагревательными приборами других типов достигаются за счёт соответствия высокому классу защиты от поражения электрическим током, класс защиты II согласно ГОСТ 12.2.007.0-75 [24]. Осу-

ществляется это с помощью следующих технических решений, с учётом которых выполнено устройство: 1) отсутствует электрическая связь между сетью и тепловыделяющей обмоткой; 2) при проведении расчётов напряжение витка выбирают так, чтобы значение электрического потенциала на нагревательном блоке находилось ниже допустимого по условиям безопасности при эксплуатации; 3) многоуровневой электрической изоляцией обмоток силового трансформатора.

Помимо перечисленного данные устройства имеют большой срок службы. Так как этот показатель в основном зависит от срока службы изоляционных материалов, применяемых в силовом трансформаторе с блоком нагрева жидкости, то при расчётах основные геометрические соотношения выбираются так, чтобы температура обмотки не превышала допустимых, для заданного класса нагревостойкости электроизоляционных материалов, значений. Большая поверхность теплоотдачи резко снижает интенсивность образования накипи, что обеспечивает стабильность теплового режима и также повышает срок службы нагревательного блока.

Пятая глава посвящена релейной защите силового трансформатора с блоком нагрева жидкости. Так как мощность нагревательного блока по отношению к мощности силового трансформатора составляет несколько процентов, то уставки релейной защиты можно не пересматривать. Особенностью силовых трансформаторов с блоком нагрева жидкости является то, что для трансформаторов более 1МВА реализация дифференциальной релейной защиты невозможно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе предложена новая конструкция силового трансформатора с блоком нагрева жидкости. Выявлены особенности электромагнитного и теплового расчётов. Проведены исследования и даны рекомендации по способу управления нагревательным блоком, выбору конструкции и размеров тепловыделяющего контура цилиндрического типа.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

1. Литовец, А.В. Вопросы управления трансформатором с короткозамкнутой вторичной обмоткой / А.В. Литовец, А.В. Сериков, В.И. Суздорф // XI Международная IEEE Сибирская конференция по управлению и связи SIBCON-2015 : сб. науч. Тр. / Омский государственный технический университет. – Омск :Электротехника: сетевой электронный научный журнал, 2015. – С. 56-58
2. Литовец, А.В. Проблема регулирования мощности в электромагнитном преобразователе энергии с короткозамкнутым ротором / А.В. Литовец, А.В. Сериков // Научно-техническое творчество аспирантов и студентов: материалы 45-й научно-технической конференции студентов и аспирантов, Комсомольск-на-Амуре, апрель 2015 г. / редкол.: Э.А. Дмитриев (отв. ред.) [и др.]. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВПО «КнАГТУ», 2015.
3. Литовец, А.В. Разработка конструкции электробезопасного нагревательного устройства / А.В. Литовец, А.В. Сериков, Зар Ни Ньейн // Дальневосточная весна – 2016 :материалы 14-й Междунар. науч. - Д156 практ. конф. по проблемам экологии и безопасности, Комсомольск-на-Амуре, 28 апреля 2016 г. / редкол.: И. П. Степанова (отв. ред.) [и др.]. – Комсомольск-на-Амуре : ФГБОУ ВО «КнАГТУ», 2016. – 349 с.
4. Литовец, А.В. Силовой трансформатор с блоком нагрева жидкости / А.В. Литовец, А.В. Сериков // Научно-техническое творчество аспирантов и студентов: материалы 46-й научно-технической конференции студентов и ас-

пирантов, Комсомольск-на-Амуре, апрель 2016 г. / редкол.: Э.А. Дмитриев (отв. ред.) [и др.]. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КНАГТУ», 2016.

5. Литовец, А.В. Релейная защита силового трансформатора / А.В. Литовец, А.В. Сериков // Научно-техническое творчество аспирантов и студентов: материалы 46-й научно-технической конференции студентов и аспирантов, Комсомольск-на-Амуре, апрель 2014 г. / редкол.: Э.А. Дмитриев (отв. ред.) [и др.]. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КНАГТУ», 2014. – 764 с.

6. Пат. 160354 РФ на полезную модель, МПК H05B6/10. Устройство для преобразования энергии с регулируемым нагревом жидкости / А.В. Сериков, А.В. Литовец (Россия).-№2015114276/02;заявл. 16.04.2015;опубл. 20.03.2016, Бюл. №8 – 1с.