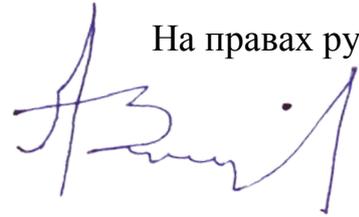


На правах рукописи



Зябкин Александр Александрович

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ТРАНСФОРМАТОРАХ ДЛЯ  
ПОГРУЖНЫХ ЭЛЕКТРОЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСОВ НЕФТЕДОБЫЧИ

05.09.01 – «Электромеханика и электрические аппараты»

05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы»

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

ОМСК 2013

Работа выполнена в **ФГБОУ ВПО «Нижевартовский государственный университет» (НвГУ), ФГБОУ ВПО Омский государственный технический университет (ОмГТУ)**

Научный руководитель:	доктор технических наук, профессор <b>Сушков Валерий Валентинович,</b> специальность <b>05.09.01</b>
Научный консультант:	доктор технических наук, профессор <b>Ковалев Владимир Захарович,</b> специальность <b>05.09.03</b>
Официальные оппоненты:	доктор технических наук, профессор <b>Харламов Виктор Васильевич</b> Профессор кафедры «Электрические машины и общая электротехника», ФГБОУ ВПО «Омский государственный университет путей сообщения» кандидат технических наук <b>Никишкин Алексей Сергеевич</b> Декан Омского института водного транспорта (Филиал) ФБОУ ВПО «НГАВТ»
Ведущая организация:	ФГБОУ ВПО «Российский государственный университет нефти и газа имени И.М. Губкина»

Защита диссертации состоится 24 декабря 2013 года в 12:00 на заседании диссертационного совета ДМ 212.178.03 при ОмГТУ по адресу: 644050, г. Омск, проспект Мира, 11, корп. 6, ауд. 340. Тел/факс: +7(3812)65-64-92, e-mail: dissov\_omgtu@omgtu.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОмГТУ по адресу: г. Омск, проспект Мира, 11.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные гербовой печатью учреждения, просим направлять по адресу: 644050, г. Омск, проспект Мира, 11, диссертационный совет.

Автореферат разослан 22 ноября 2013 года

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Р. Н. Хамитов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Основным направлением хозяйственной деятельности Ханты-Мансийского автономного округа – Югры (ХМАО-Югра) является нефтедобыча. Большая часть объемов извлекаемой пластовой жидкости обеспечивается механизированными способами, при этом наиболее эффективны газлифтный и посредством установок электрических центробежных насосов (УЭЦН). Ряд преимуществ УЭЦН (возможность гибкого подбора параметров установки под скважину, автоматизация управления установкой и др.), наделили данный способ добычи большой популярностью для нефтяных компаний Югры.

Масляные трансформаторы для УЭЦН (ТМПН) являясь одним из основных элементов электротехнического комплекса, обеспечивающего подвод и преобразование электрической энергии к УЭЦН, во многом определяют надежность технологической системы в целом. Отказ ТМПН влечет за собой огромные издержки в виде объемов недобытой нефти, затрат на восстановление технологического процесса и ремонт оборудования. По мнению специалистов эксплуатирующих организаций, одной из причин отказов трансформаторов ТМПН вследствие дефектов изоляции обмоток являются перегревы. Большая численность в общем парке трансформаторного оборудования НГДП (53%), отсутствие резервирования и тяжелый режим работы, способствующий ускоренному развитию дефектов, актуализируют разработку прогрессивных методов исследования, диагностики и прогнозирования тепловых состояний трансформаторов ТМПН.

Существенный вклад в теорию исследования тепловых процессов в электрических машинах и разработку средств диагностики и прогнозирования состояний силовых масляных трансформаторов внесли: В.В. Боднар, Е.Ю. Комков, А.А. Лыков, Л. Киш, Э.И. Гуревич, Ю.Л. Рыбин, А.О. Валуйских, И.Н. Дулькин, М.Г. Пирогов, А.И. Тихонов, В.В. Щербатов, В.А. Жадан, М.Е. Алпатов, А.А. Голованов, Б.А. Алексеев, В.А. Русов, Ю.А. Хренников, Ю.М. Голоднов, И.В. Давиденко, Г.В. Попов, Аль Акопян, Д.А. Климов, Ю.Д. Минченко, Е.Ю. Комков, А.Н. Журавлев, Е.И. Гольдштейн и другие отечественные и зарубежные ученые.

**Цель работы** – разработка методов исследования, диагностирования и прогнозирования тепловых процессов в трансформаторах для установок электрических центробежных насосов нефтедобычи с целью повышения их надежности.

### **Задачи исследования**

1. Провести анализ и классификацию дефектов, причин их возникновения в трансформаторах ТМПН, известных подходов к диагностированию тепловых состояний силовых трансформаторов.
2. Разработать методику оценки факторов сети, оказывающих влияние на тепловые процессы в ТМПН, формализовать физические зависимости мощностей источников тепловой энергии от выявленных факторов, на

основании результатов оценки их фактических влияний, выделить наиболее значимые факторы.

3. Разработать методику многофакторного адаптивного диагностирования и прогнозирования тепловых процессов в трансформаторах ТМПН.
4. Разработать уточненную математическую модель нестационарных тепловых процессов в ТМПН с учетом влияния факторов питающей сети 0,4 кВ.
5. Разработать средство диагностирования, прогнозирования и защиты трансформаторов ТМПН, не оснащенных защитой по температуре.
6. Разработать блок тепловой динамики системы автоматизированного проектирования специальных силовых масляных трансформаторов.
7. Разработать программу инженерных расчетов тепловых процессов в трансформаторах ТМПН для различных режимов работы с учетом воздействия на них факторов питающей сети 0,4 кВ.

**Объект исследования** – силовые маслонаполненные трехфазные трансформаторы для УЭЦН нефтедобычи.

**Предмет исследования** – методы исследования температур различных узлов трансформаторов ТМПН с учетом влияния факторов питающей сети.

**Методы исследования.** При выполнении работы использовались: положения теорий электромагнитного поля, электрических цепей, теплопередачи, принятия решений, планирования эксперимента; методы оценки объектов по шкале порядков, электротепловых аналогий, численного решения систем алгебраических, дифференциальных и дифференциально-алгебраических уравнений и др. Математическое моделирование проводилось в программных средах Delphi, Matlab. Экспериментальная часть исследований проведена филиалом компании ОАО НК «Русснефть», ООО «ЗМБ», производством ЗАО «ГК «Электроцит»-ТМ Самара» «Русский трансформатор». Измерение показателей качества электрической энергии проводились комплексом Ресурс-UF2 на выходных зажимах станций управления скважин №877, №867, №554, №570 Малобалыкского нефтяного месторождения, температур трансформаторов прибором DT-8835.

**Научная новизна** работы заключается в следующем:

– *Получено* распределение дефектов по частоте их возникновения в подсистемах трансформаторов ТМПН, эксплуатирующихся в НГДП ХМАО-Югры, в том числе в результате тепловой деструкции изоляции;

– *Получено* выражение для расчета мощности потерь ЭЭ в конструкционных узлах баковых маслонаполненных силовых трансформаторах со схемой соединения Y/Y-n, учитывающее влияние фактора несинусоидальности питающего напряжения; *уточнено* известное выражение для расчета мощности потерь ЭЭ в магнитопроводе СТ для использования его в исследованиях потерь в специальных силовых трансформаторах, работающих при повышенной частоте и низкой синусоидальности питающего напряжения; *получено* обобщенное выражение для расчета добавочных потерь в силовых маслонаполненных трансформаторах, учитывающее влияние факторов сети,

удобное для использования эксплуатирующими организациями при расчетах технических потерь электроэнергии в сетях;

– *Разработана* уточненная математическая модель тепловых процессов в ТМПН по стандарту нагрузки силовых масляных трансформаторов (ГОСТ 14209-97); *разработаны* четырехмассовая планарная математическая модель, многомассовая пространственная математическая модель и алгоритм расчета нестационарных тепловых процессов в ТМПН, учитывающие влияние факторов сети, добавочный нагрев конструктивных узлов, зависимость теплопроводности охлаждающей жидкости от температуры;

– *Разработана* методика многофакторного адаптивного диагностирования и прогнозирования тепловых процессов в трансформаторах ТМПН с функцией уточнения коэффициентов диагностической модели в результате ретроспективного анализа стохастических зависимостей температуры верхних слоев масла (ВСМ) от факторов питающей сети 0,4 кВ; *разработана* методика оценки факторов сети, оказывающих влияние на тепловые процессы в ТМПН, формализованы физические зависимости мощностей источников тепловой энергии от выявленных факторов, на основании результатов оценки их фактических влияний, выделены наиболее значимые факторы.

**Практическая ценность** работы заключается в следующем:

– Разработанная математическая факторная модель для расчета добавочных потерь в силовых маслонаполненных трансформаторах может быть использована при построении диагностических систем СТ;

– Разработан блок тепловой динамики, который может быть применен в системах автоматизированного проектирования специальных силовых масляных трансформаторов;

– Разработана программа инженерных расчетов тепловых процессов в трансформаторах ТМПН для различных режимов работы, с учетом воздействия на них факторов сети и окружающей среды;

– Разработанные математические модели тепловых процессов в трансформаторах ТМПН могут быть применены в качестве основы при построении систем защиты, диагностики и прогнозирования тепловых состояний силовых трансформаторов;

– Разработано средство диагностирования, прогнозирования и защиты трансформаторов ТМПН не оснащенных защитой по температуре.

**Основные положения, выносимые на защиты:**

– Многофакторная модель добавочных потерь в трансформаторах ТМПН;

– Четырехмассовая планарная и многомассовая пространственная модели тепловых процессов в трансформаторах ТМПН;

– Методика многофакторного адаптивного диагностирования и прогнозирования тепловых процессов в трансформаторах ТМПН.

**Достоверность научных исследований и результатов диссертационной работы** обоснована теоретически и подтверждена результатами экспериментальных исследований, а именно сравнением результатов

моделирования, полученных при помощи разработанной модели с результатами расчетов по методике стандарта нагрузки масляных трансформаторов (расхождение 8%); с результатами измерений температур обмоток и ВСМ трансформатора в условиях высоковольтной лаборатории производства «Русский трансформатор» (расхождение 6% - обмотки, 26% - ВСМ); с результатами измерений температур ВСМ трансформаторов ТМПН, эксплуатирующихся на скважинах ООО «ЗМБ» (9,8-18%). Исследования результатов диссертационной работы подтверждают их достоверность. Для достижения более высокой точности требуется глубокое исследование вопроса идентификации параметров.

**Реализация результатов работы.** Результаты проведенных в диссертации исследований по расчету температур и потерь электрической энергии в трансформаторах ТМПН с учетом влияния факторов сети используются в ОАО «Варьганнефть», г. Радужный; производстве «Русский трансформатор», г. Самара; разработанные математические модели, алгоритмы, программа применяются в научно-исследовательской работе и учебном процессе НвГУ при подготовке бакалавров и магистров кафедры энергетики.

**Личный вклад соискателя.** Постановка задач исследования, определение путей их решения, разработка математических моделей, алгоритмов, методик, анализ, обобщение, проверка достоверности исследований, полученные научные результаты и выводы принадлежат автору.

**Апробация работы.** Основные материалы диссертации докладывались на международной научно-практической конференции «Энергосбережение в теплоэлектроэнергетике и теплоэлектротехнологиях», Омск, 2010; конференции Международного IT-Форума, Ханты-Мансийск, 2010; VII Всероссийской научно-технической конференции, Тула, 2010; второй региональной научно-технической конференции, Ханты-Мансийск, 2011; Региональной методической семинаре-конференции, Нижневартовск, 2012; II международной научно-технической конференции, Сургут, 2012; II всероссийской научно-практической конференции, Нижневартовск, 2013.

**Публикации.** По теме диссертации опубликованы 18 работ, из них 4 статьи в изданиях рекомендованных ВАК, 1 патент на полезную модель, 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

**Структура диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 128 названий, содержит 138 стр. основного текста, 33 рис., 6 табл., 5 прил. на 23 стр.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность, сформулирована цель и задачи исследования, отражена структура диссертации, охарактеризована научная новизна и практическая ценность результатов исследования, представлены основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** рассмотрено современное состояние парка трансформаторного оборудования нефтегазодобывающих предприятий, произведен анализ распределения силовых трансформаторов типового НГДП по классам напряжений. В результате исследования выявлено, что размер парка в

развитом НГДП может превышать 20 000 единиц, при этом доля СТ класса напряжения 220-110 кВ составляет 1% от общего числа в энергохозяйстве, класса напряжения 35 кВ – 4%, распределительных СТ класса напряжения 6(10) кВ – 42% и ТМПН класса напряжения 0,4 (6) кВ – 53%. Частые коммутации трансформаторов ТМПН и тяжелый режим работы способствуют развитию дефектов и увеличивают вероятность отказа. Для сбора информации о возможных дефектах в ТМПН было проведено анкетирование. Проведенный до анкетирования опрос показал, что не все организации детально фиксируют потоки отказов и причины их возникновения, поэтому для сбора информации о дефектах в ТМПН был использован метод групповых экспертных оценок: разработана анкета и роздана для заполнения специалистами сервисных компаний. Анкета была представлена в виде двух информационных блоков: листа дефектов и листа воздействий, повлекших возникновение дефектов. Для наглядности и обеспечения однозначности сортирования, дефекты были объединены в следующие группы по системам трансформатора ТМПН: система обмоток, система вводов, система охлаждения и масляной изоляции, система регулирования напряжения, система магнитопровода, прочие дефекты. Полученные в результате опроса данные были проверены на наличие статистической связи. Коэффициент конкордации Кендэла  $W > 0.5$ , что говорит о высокой степени согласованности мнений специалистов. Значимость коэффициента  $W$  по  $\chi^2$ -критерию согласия Пирсона соответствует высокому уровню  $\alpha = 0,05$  ( $\chi^2_{\text{рас.}} > \chi^2_{\text{табл.}}$ ). Анализ результатов опроса представим на рисунке 1.

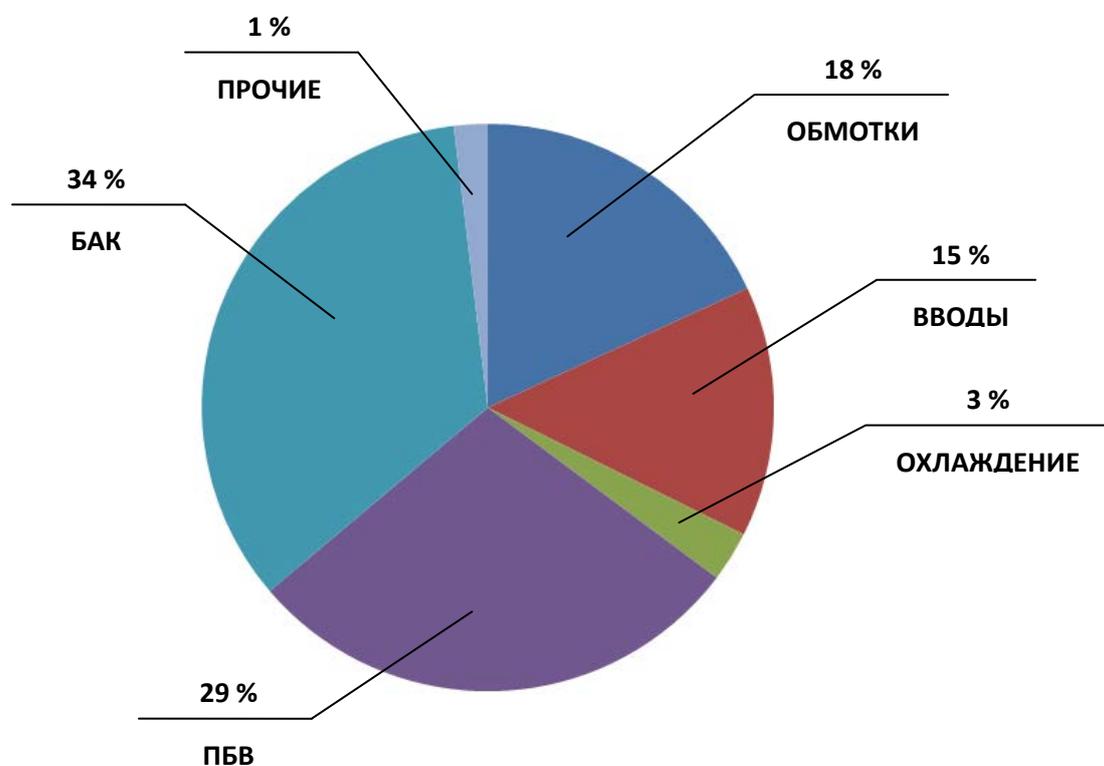


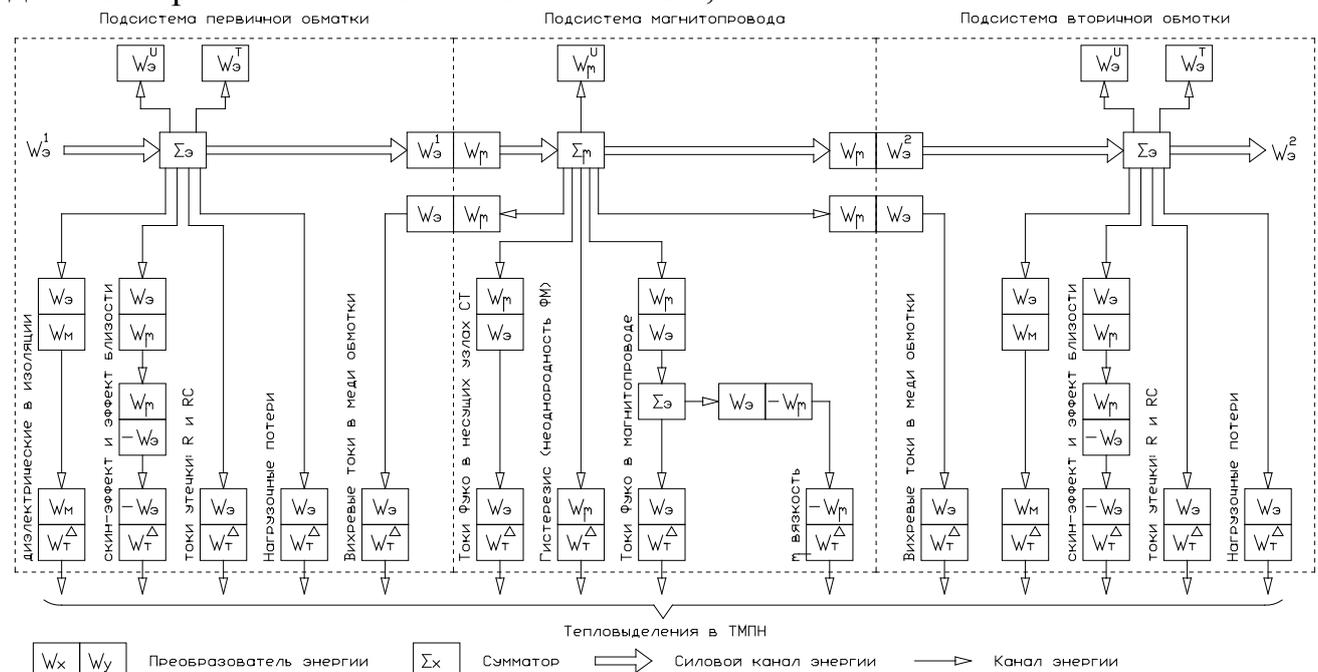
Рисунок 1 - Распределение дефектов по частоте возникновения в различных системах трансформатора ТМПН

Специалистами сервисных компаний отмечено, что одной из вероятных причин возникновения дефектов в обмотках трансформаторов, зачастую приводящих к отказу устройства, являются перегревы изоляции вследствие действия добавочных потерь, вызванных низким качеством сетевого напряжения. Для выявления степени проработки вопроса влияния качества сетевого напряжения на тепловые состояния СТ при решении задач диагностирования, прогнозирования и защиты был проведен сравнительный анализ известных к решению указанных задач подходов. В результате анализа выявлено, что существующие подходы к тепловой диагностике и защите СТ не достаточно полно рассматривают физическую картину добавочных потерь в подсистемах СТ, а также не учитывают ряд значимых факторов, что может приводить к ошибкам.

**Во второй главе** разрабатывается методика адаптивного многофакторного диагностирования и прогнозирования тепловых состояний в трансформаторах ТМПН, отличающаяся от известных подходов тем, что в ней реализованы адаптивный системно-факторный и системно-энергетический принципы.

*Системно-энергетический принцип* методики состоит в рассмотрении энергетической структуры СТ и анализе распределения электромагнитной энергии по подсистемам, выявлении интенсивностей ее преобразования в тепло с учетом влияния режимных и сетевых параметров. В результате разработки системно-энергетического принципа:

- разработана структурно-энергетическая схема трансформатора ТМПН (рисунок 2) и в результате анализа электромагнитных преобразований выделен дополнительный источник тепла – макровихревые токи в металлических конструкционных узлах СТ, не рассматриваемый в известных подходах к диагностированию тепловых состояний СТ;



Индексы на схеме: U – потенциальная энергия, T – кинетическая энергия, Э – электрическая энергия, M – механическая энергия, μ – электромагнитная энергия, 1,2 – индексы первичной и вторичной обмоток, T – тепловая энергия, Δ – потери энергии.

Рисунок 2 – структурно-энергетическая схема трансформатора ТМПН

- получено уточненное выражение расчета мощности добавочных потерь в магнитопроводе СТ, дополнительно учитывающее влияние повышенной частоты питающего напряжения:

$$\Delta P_{МТР} = P_{ХХ} \left( \sum_{v=2}^n U_v^2 + \varepsilon_U^2 + 0,7 \left( \frac{f}{f_H} \right)^2 + 0,3 \left( \frac{f}{f_H} \right) - 1 \right), \quad (1)$$

где  $P_{ХХ}$  – потери холостого хода СТ,  $\varepsilon_U$  – коэффициент несимметрии питающего напряжения по обратной последовательности,  $U_v$  – отношение напряжения  $v$ -ой гармоники к номинальному,  $f$  – действующая частота сети,  $f_H$  – номинальная частота напряжения трансформатора;

- получено выражение расчета мощности добавочных потерь в конструкционных узлах СТ со схемой соединения Y-n/Y-n-0, учитывающее влияние несинусоидальности питающего напряжения:

$$\Delta P_{КТР} = \left( \sum_{v=2}^n (\varepsilon_{U0} U_v)^2 + \sum_{v/3=2}^n U_{v/3}^2 + 1 \right) \left( 3 \left( \frac{\varepsilon_{U0} U}{\sqrt{x_0^2 + r_0^2}} \right)^2 (r_0 - r_1) - 0,6 \varepsilon_{U0} \frac{x_1}{x_0} P_{ХХ} \right), \quad (2)$$

где  $U$  – фазное напряжение сети,  $\varepsilon_{U0}$  – коэффициент несимметрии напряжения сети по нулевой последовательности,  $U_v$  – отношение напряжения  $v$ -ой гармоники к номинальному,  $U_{v/3}$  – отношение напряжения  $v$ -ой гармоники кратной 3 к номинальному,  $x_1, x_0$  – индуктивные сопротивления прямой и обратной последовательностей СТ,  $r_1, r_0$  – активные сопротивления прямой и обратной последовательностей СТ;

- получено обобщенное выражение для расчета добавочных потерь в силовых маслонаполненных трансформаторах, учитывающее влияние параметров сети, удобное к использованию эксплуатирующими организациями для расчета технических потерь ЭЭ в сетях:

$$\Delta P_{ТР} = P_{ХХ} \left( \sum_{v=2}^n U_v^2 + \varepsilon_U^2 + 0,7 \left( \frac{f}{f_H} \right)^2 + 0,3 \left( \frac{f}{f_H} \right) - 1 \right) + \frac{P_{КЗ}}{u_{КЗ}^2} \left( 0,607 \sum_{v=2}^n \frac{1 + 0,05v^2}{v\sqrt{v}} U_v^2 + \varepsilon_U^2 \right) + \left( \sum_{v=2}^n (\varepsilon_{U0} U_v)^2 + \sum_{v/3=2}^n U_{v/3}^2 + 1 \right) \left( 3 \left( \frac{\varepsilon_{U0} U}{\sqrt{x_0^2 + r_0^2}} \right)^2 (r_0 - r_1) - 0,6 \varepsilon_{U0} \frac{x_1}{x_0} P_{ХХ} \right), \quad (3)$$

где  $v$  – номер гармоники,  $P_{КЗ}$  – нагрузочные потери СТ,  $u_{КЗ}$  – напряжение короткого замыкания СТ.

*Системно-факторный принцип* методики состоит в выявлении *полного* набора *значимых* факторов сети, обуславливающего значительное изменение температур контролируемого объекта. При этом СТ рассматривается как элемент системы электропривода УЭЦН – «СЕТЬ-СУ-ТМПН-ПЭД». В результате разработки системно-факторного принципа:

- выявлены интегральные параметры сети – факторы сети, и в результате анализа показателей качества ЭЭ на зажимах СУ различных нефтяных скважин определены интервалы их реальных значений для питающей сети 0,4 кВ НГДП в у.е.: фактор несимметрии питающего напряжения по обратной последовательности  $F_{U2}$ : 0÷0.04; фактор несимметрии питающего напряжения по нулевой последовательности  $F_{U0}$ : 0÷0.04; фактор превышения частоты

питающего напряжения  $F_f$ :  $0 \div 2$ ; фактор несинусоидальности напряжения  $F_{SIN\_XX}$  мощности добавочных потерь холостого хода:  $0 \div 0.0227$ ; фактор несинусоидальности питающего напряжения  $F_{SIN\_K}$  мощности добавочных потерь в конструкционных узлах СТ:  $0 \div 0.0226$ ; фактор несинусоидальности питающего напряжения  $F_{SIN\_K3}$  мощности добавочных потерь в токоведущих цепях:  $0 \div 0.0038$ ;

- разработана факторная модель добавочных потерь в масляном СТ:

$$\begin{cases} \Delta P_{OTT} = \frac{P_{K3}}{u_{K3}^2} (F_{SIN\_K3} + F_{U2}^2) \\ \Delta P_{MTP} = P_{XX} (F_{SIN\_XX} + F_{U2}^2 + 0,7(F_f)^2 + 0,3(F_f) - 1) \\ \Delta P_{KTP} = (F_{SIN\_K} + 1) \left( 3 \left( \frac{F_{U0} U}{\sqrt{x_0^2 + r_0^2}} \right)^2 (r_0 - r_1) - 0,6 F_{U0} \frac{x_1}{x_0} P_{XX} \right) \end{cases}, \quad (4)$$

где  $\Delta P_{OTT}$  – добавочные потери в токоведущих цепях СТ;

-рассчитаны значения добавочных потерь в подсистемах трансформатора для предельных значений факторов сети НГДП, в результате установлено, что сильные зависимости имеют: мощность потерь в магнитопроводе ТМПН от фактора превышения частоты питающего напряжения  $-P_{MTP}(F_{fMAX})=2.4$  о.е., мощность потерь в конструкции ТМПН от фактора несимметрии питающего напряжения по обратной последовательности  $-P_{KTP}(F_{U0MAX})=1.38$  о.е., мощность потерь в токоведущих цепях ТМПН от фактора несимметрии питающего напряжения по обратной последовательности  $-P_{OTT}(F_{U2MAX})=0.53$  о.е., мощность потерь в токоведущих цепях ТМПН от фактора несинусоидальности питающего напряжения  $-P_{OTT}(F_{SIN\_K3MAX})=1.28$  о.е.

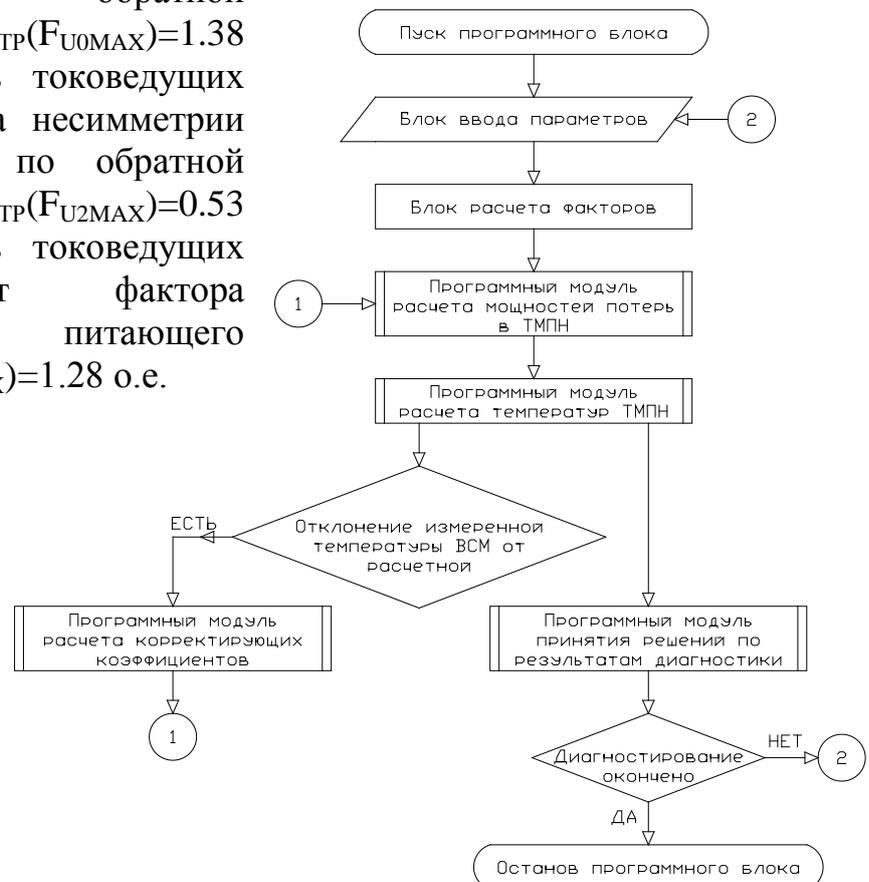


Рисунок 3 – Алгоритм адаптивной многофакторной методики диагностирования

Важно учитывать, что конструктивные особенности СТ различных марок и серий будут иметь различные рецепторные характеристики электромагнитной совместимости. *Принцип адаптивности*, который может быть реализован в алгоритме с циклом уточнения коэффициентов факторной модели добавочных потерь (рисунок 3), способен повысить точность методики.

В третьей главе разрабатываются цепные математические модели для расчетов тепловых процессов в ТМПН. В результате анализа известных подходов к исследованию тепловых процессов в масляных СТ выявлено, что наиболее распространенной тепловой моделью, использующейся в качестве базовой, является математическая двухмассовая модель по стандарту нагрузки силовых масляных трансформаторов (ГОСТ 14209-97). Однако такая модель не учитывает добавочные потери, вызываемые действием факторов сети и может давать ошибочные расчеты при моделировании режимов работы ТМПН. Для исследования тепловых процессов в ТМПН была разработана уточненная тепловая модель (5), (6), учитывающая добавочные потери в различных узлах СТ. Режим нагрева описывается выражениями (5), режим охлаждения выражениями (6).

$$\begin{aligned} \Theta_{\text{нтт.тн+1}} &= \Delta\Theta_{\text{охл}\Delta t} + (\Theta_{\text{м.тн+1}} + \Theta_{\text{нтт.м.тн+1}}), \\ \Theta_{\text{м.тн+1}} &= \Theta_{\text{м.кп}} + \left( \Theta_{\text{м.ном}} \cdot \left( \frac{1+d \cdot k_{C_{n+1}} \cdot K_{n+1}^2}{1+d} \right)^x - \Theta_{\text{м.кп}} \right) \cdot \left( 1 - e^{-\frac{\Delta t}{\tau}} \right), \\ \Theta_{\text{нтт.м.тн+1}} &= \Theta_{\text{нтт.м.кп}} + \left( \Theta_{\text{нтт.м.ном}} \cdot (\sqrt{k_{C_{n+1}}} \cdot K_{n+1})^y - \Theta_{\text{нтт.м.кп}} \right) \cdot \left( 1 - e^{-\frac{\Delta t}{\tau_{\text{об}}}} \right), \end{aligned} \quad (5)$$

$$k_{C_{n+1}} = 1 + P_{O_{n+1}}^* + P_{C_{n+1}}^* + P_{\text{КОНСТР}_{n+1}}^*,$$

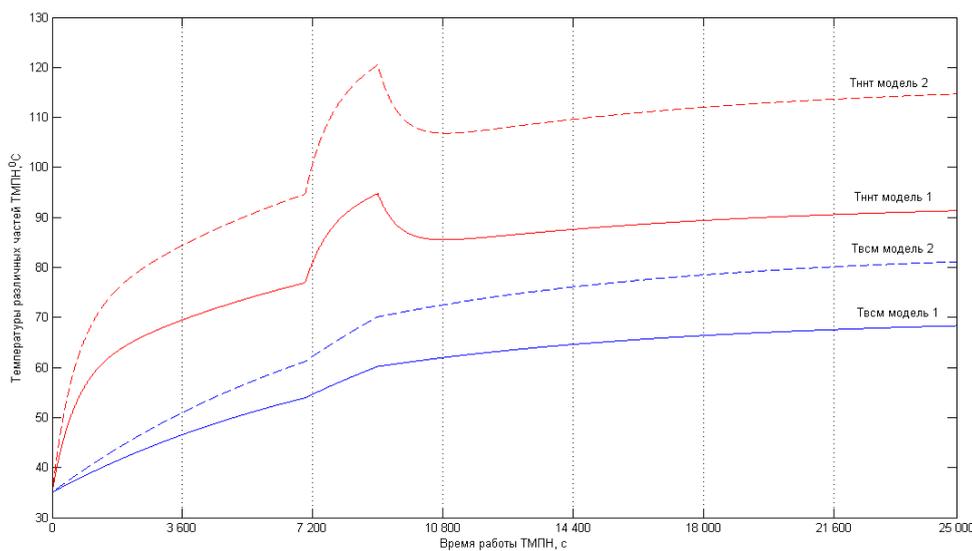
где  $\Delta\Theta_{\text{охл}\Delta t}$  - средняя температура окружающей среды за период  $\Delta t$ ,  $\Theta_{\text{м.тн+1}}$  - превышение температуры масла в верхних слоях над температурой окружающей среды к концу расчетного интервала времени;  $\Theta_{\text{м.кп}}$  - установившееся превышение температуры масла в верхних слоях над температурой окружающей среды в предшествующем расчетном интервале времени;  $\Theta_{\text{м.ном}}$  - номинальное значение превышения температуры масла в верхних слоях над температурой окружающей среды;  $K_{n+1}$  - эквивалентное значение коэффициента нагрузки в расчетном периоде;  $d$  - отношение потерь короткого замыкания к потерям холостого хода трансформатора;  $x$  - показатель степени масла;  $k_{C_{n+1}}$  - коэффициент, характеризующий добавочные потери на расчетном интервале времени, вызванные действием факторов питающей сети;  $P_{O_{n+1}}^*$ ,  $P_{C_{n+1}}^*$ ,  $P_{\text{КОНСТР}_{n+1}}^*$  - значения добавочных потерь в обмотках, магнитопроводе и конструктивных элементах трансформатора, приведенные к номинальному значению мощности нагрузочных потерь;  $\tau$  - тепловая постоянная времени трансформатора;  $\tau_{\text{об}}$  - тепловая постоянная времени обмотки трансформатора;  $\Theta_{\text{нтт.м.тн+1}}$  - превышение температуры наиболее нагретой точки обмотки над температурой масла в верхних слоях к концу текущего расчетного интервала времени;  $\Theta_{\text{нтт.м.кп}}$  - установившееся значение превышения температуры наиболее нагретой точки

обмотки над температурой масла в верхних слоях в предшествующем расчетном интервале времени;  $\Theta_{\text{ннт.м.ном}}$  - номинальное значение превышения температуры наиболее нагретой точки обмотки над температурой масла в верхних слоях;  $y$  – показатель степени обмотки.

$$\Theta_{\text{м.тn+1}} = \Theta_{\text{м.кп}} + \left( \Theta_{\text{м.ном}} \cdot \left( \frac{1 + d \cdot k_{\text{с}_n+1} \cdot K_{n+1}^2}{1 + d} \right)^x - \Theta_{\text{м.кп}} \right) \cdot \left( e^{-\frac{\Delta t}{\tau}} \right), \quad (6)$$

$$\Theta_{\text{ннт.м.тn+1}} = \Theta_{\text{ннт.м.кп}} + \left( \Theta_{\text{ннт.м.ном}} \cdot (\sqrt{k_{\text{с}_n+1}} \cdot K_{n+1})^y - \Theta_{\text{ннт.м.кп}} \right) \cdot \left( e^{-\frac{\Delta t}{\tau_{\text{об}}}} \right).$$

На рисунке 4 представим результаты расчета температур в ТМПН с использованием модели по стандарту нагрузки масляных СТ до и после уточнения. Изменение температур рассмотрено на интервале времени продолжительностью 7 ч., температура окружающей среды неизменна на всем интервале времени и равна +35 °С, добавочные потери приняты постоянными и рассчитанными для предельных значений факторов сети. Для сравнения динамики температур произведена имитация допустимой кратковременной перегрузки ТМПН на 30 % в течение 30 мин., остальное время имитируется режим с коэффициентом загрузки  $K=1$ .



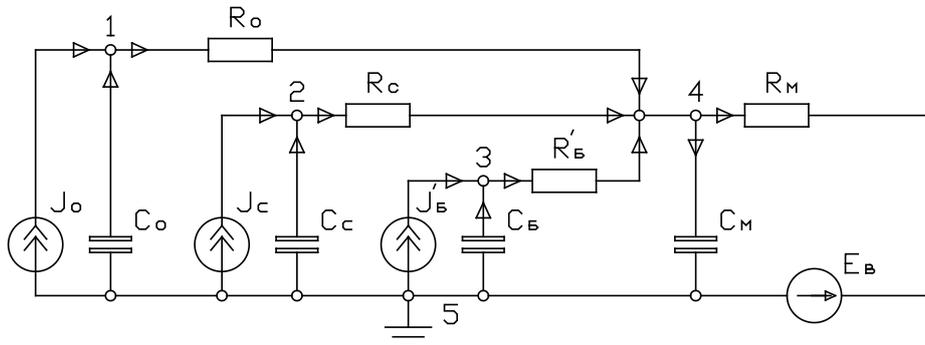
Модель 1 – модель по стандарту нагрузки силовых масляных трансформаторов (ГОСТ 14209-97).  
 Модель 2 – уточненная модель по стандарту нагрузки силовых трансформаторов (ГОСТ 14209-97).  
 $T_{\text{всм}}$  – температура верхних слоев масла трансформатора.  
 $T_{\text{ннт}}$  – температура наиболее нагретой точки трансформатора.

Рисунок 4 - Моделирование температур различных частей ТМПН

Как видно из графиков, опущение влияния факторов сети на потери может привести к значительной, до 27%, ошибке при расчетах тепловых режимов ТМПН.

Недостаток разработанной уточненной модели по ГОСТ 14209-97 в том, что она не достаточно детально учитывает теплоинерционные параметры подсистем СТ, использует обобщенный источник теплоты. Такое упрощение оказывает влияние на характеристику моделируемых переходных процессов и при исследовании динамических режимов может приводить к ошибкам. Известные трехмассовые модели повышают точность моделирования динамических режимов, но учитывают значимый источник тепла – макровихревые токи в металлических элементах конструкции СТ ( $1,38 \cdot P_{\text{XX}}$ ). С

целью повышения точности моделирования тепловых процессов СТ для режимов несимметрии напряжения по нулевой последовательности на основании теории электротепловых аналогий была разработана четырехмассовая планарная тепловая модель. На рисунке 5 представим тепловую четырехмассовую схему замещения ТМПН.



$J_o$  – эквивалент потерь в обмотках ТМПН;  $J_c$  – эквивалент потерь в магнитопроводе ТМПН;  $J'_б$  – эквивалент потерь в конструктивных элементах ТМПН;  $R_o$  – тепловое сопротивление «обмотка-масло»;  $R_c$  – тепловое сопротивление «магнитопровода-масло»;  $R'_б$  – эквивалентное тепловое сопротивление «бак-масло»;  $R_м$  – тепловое сопротивление «масло/бак-ОС»;  $E_в$  – эквивалент температуры ОС;  $C_o$  – эквивалент теплоемкости обмотки;  $C_c$  – эквивалент теплоемкости магнитопровода;  $C'_б$  – эквивалент теплоемкости бака и прочих конструктивных элементов ТМПН;  $C_м$  – эквивалент теплоемкости масла.

Рисунок 5–Тепловая четырехмассовая схема замещения трансформатора ТМПН

Тепловая схема замещения на рисунке 5 описывается следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} J_o + C_o \frac{d\varphi_1}{dt} - \frac{\varphi_1 - \varphi_4}{R_o} = 0 \\ J_c + C_c \frac{d\varphi_2}{dt} - \frac{\varphi_2 - \varphi_4}{R_c} = 0 \\ J'_б + C'_б \frac{d\varphi_3}{dt} - \frac{\varphi_3 - \varphi_4}{R'_б} = 0 \\ \frac{\varphi_1 - \varphi_4}{R_o} + \frac{\varphi_2 - \varphi_4}{R_c} + \frac{\varphi_3 - \varphi_4}{R'_б} - C_м \frac{d\varphi_4}{dt} - \frac{\varphi_4 - \varphi_в}{R_м} = 0 \end{cases}, \quad (7)$$

где  $\varphi_1 \div \varphi_4$  – потенциалы соответствующих узлов схемы замещения,  $\varphi_в$  – потенциал источника-эквивалента температуры ОС.

На рисунке 6 представим алгоритм расчета температур по разработанной тепловой модели. Программный модуль расчета мощностей потерь и теплопроводностей алгоритма представляет собой подпрограмму, реализующую факторную модель (4) с надстройкой расчета основных потерь и теплопроводностей масла в зависимости от действующих температур. Расчеты эквивалентной теплопроводности масла СТ можно производить по выражению:

$$\lambda_{МЭКВ} = 0,105 \lambda_M \left[ \frac{g \beta_M \rho_M^2 L_O^3 \Delta t}{\mu_M^2} \cdot \frac{\mu_M c_{PM}}{\lambda_M} \right]^{0,3}, \quad (8)$$

где  $\lambda_M$  – коэффициент теплопроводности трансформаторного масла,  $g$  – ускорение свободного падения;  $\beta_M$  – температурный коэффициент объемного расширения масла,  $\rho_M$  – плотность жидкости,  $\mu_M$  – динамическая вязкость,  $L_O$  – характерный размер обмотки (высота),  $c_{PM}$  – удельная изобарная теплоемкость масла,  $\Delta t$  – разность температур обмотки и жидкости. Значения динамическая вязкость и удельной изобарной теплоемкости масла, имеющие сильные

зависимости от температуры, берутся из справочных таблиц. Возможна аппроксимация зависимостей  $c_{PM}(t)$ ,  $\mu_M(t)$  и включение в выражение (7) функций.

Программный модуль расчета температур ТМПН представляет подпрограмму, реализующую используемую тепловую модель.

На рисунке 7 представим результаты расчета температур уточненной модели по стандарту нагрузки силовых масляных трансформаторов (двухмассовая, по ГОСТ 14209-97) и четырехмассовой для режима, при котором значения факторов сети нулевые. Расчетный режим принят продолжительностью 4,5 ч., температура ОС постоянной и равной +35 °С. Для сравнения динамики температур произведена имитация допустимой кратковременной перегрузки ТМПН на 100 % в течение 15 мин., остальное время имитируется режим с коэффициентом загрузки  $K=1$ . Для четырехмассовой модели дополнительно задается режим 5%-го колебания нагрузки. Как видно из графиков, разработанная модель более чувствительная при моделировании температур в динамических режимах работы трансформатора.

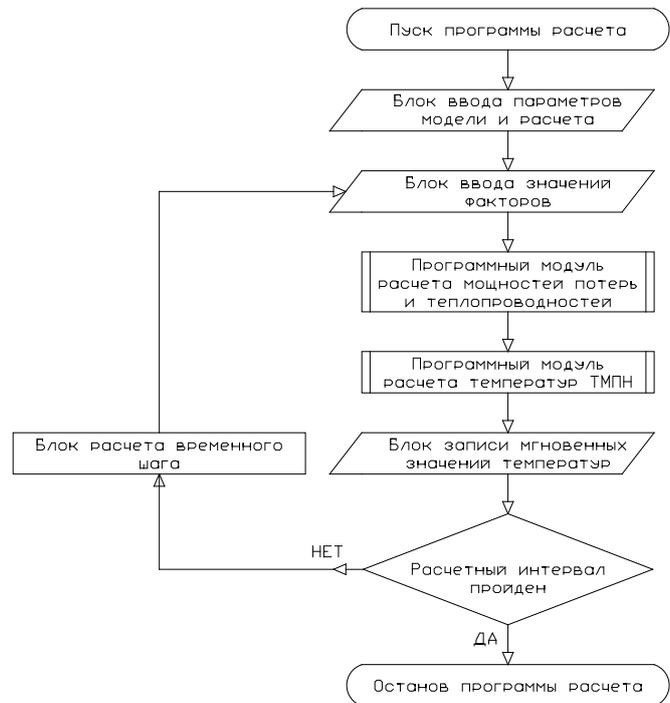
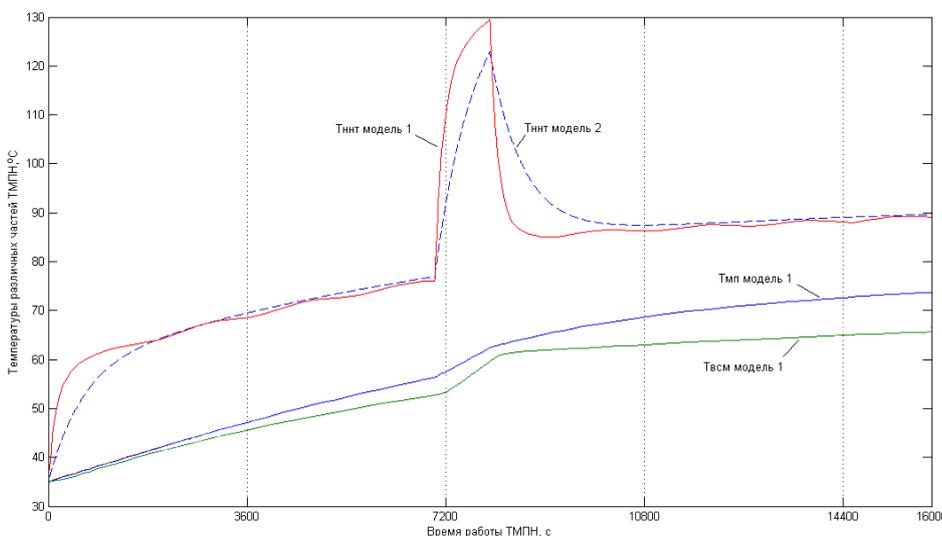


Рисунок 6 – Алгоритм расчета температур СТ

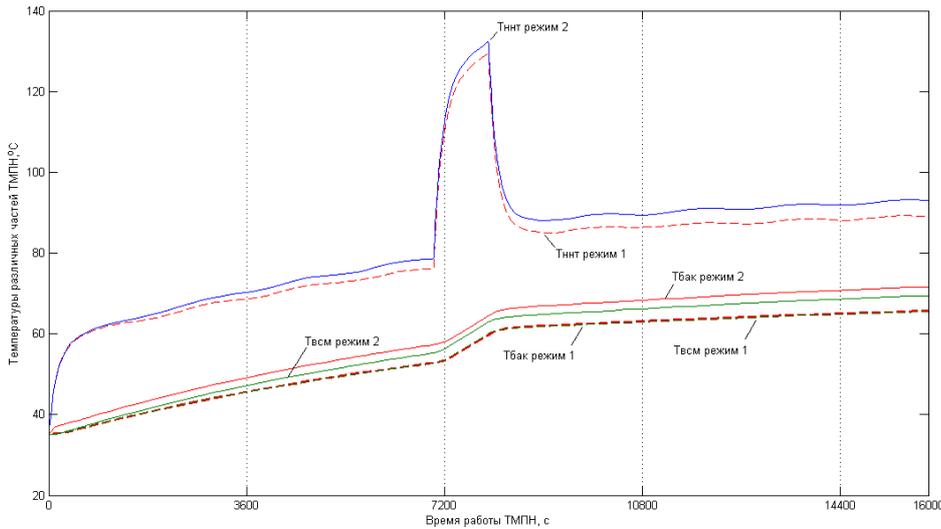


Модель 1 – планарная четырехмассовая.  
 Модель 2 – уточненная модель по стандарту нагрузки силовых масляных трансформаторов (ГОСТ 14209-97).  
 $T_{всм}$  – температура верхних слоев масла трансформатора.  
 $T_{ннт}$  – температура наиболее нагретой точки трансформатора.  
 $T_{мп}$  – температура магнитопровода трансформатора.

Рисунок 7 - Моделирование температур различных частей ТМПН

На рисунке 8 проиллюстрирована степень влияния мощности добавочных потерь в конструкционных узлах ТМПН на температуры его различных узлов – произведено моделирование двух режимов на одной сетке графика: без учета

конструкционных потерь и с учетом конструкционных потерь для предельных значений влияющих на данные потери факторов.



Режим 1 – без учета потерь в конструкционных узлах ТМПН  
 Режим 2 – с учетом предельных потерь в конструкционных узлах ТМПН  
 $T_{всм}$  – температура верхних слоев масла трансформатора.  
 $T_{ннт}$  – температура наиболее нагретой точки трансформатора.  
 $T_{мп}$  – температура магнитопровода трансформатора.

Рисунок 8 - Моделирование температур ТМПН для различных режимов работы

Как видно из графиков, влияние мощности добавочных потерь в конструкционных узлах ТМПН для предельных значений факторов значительно и достигает 5%.

Планарная четырехмассовая тепловая модель ТМПН не учитывает распределение тепла в пространстве, что может быть полезным при решении задач проектирования, прогнозирования остаточного ресурса и диагностирования СТ методом количественной термографии. Скорость термического износа изоляции обмоток СТ имеет нелинейную связь с температурой. При несимметричных динамических режимах работы СТ температуры обмоток могут значительно отличаться и приводить к различным скоростям термического старения изоляции. Для повышения точности решения вышеперечисленных задач разработана пространственная многомассовая модель нестационарных процессов в ТМПН.

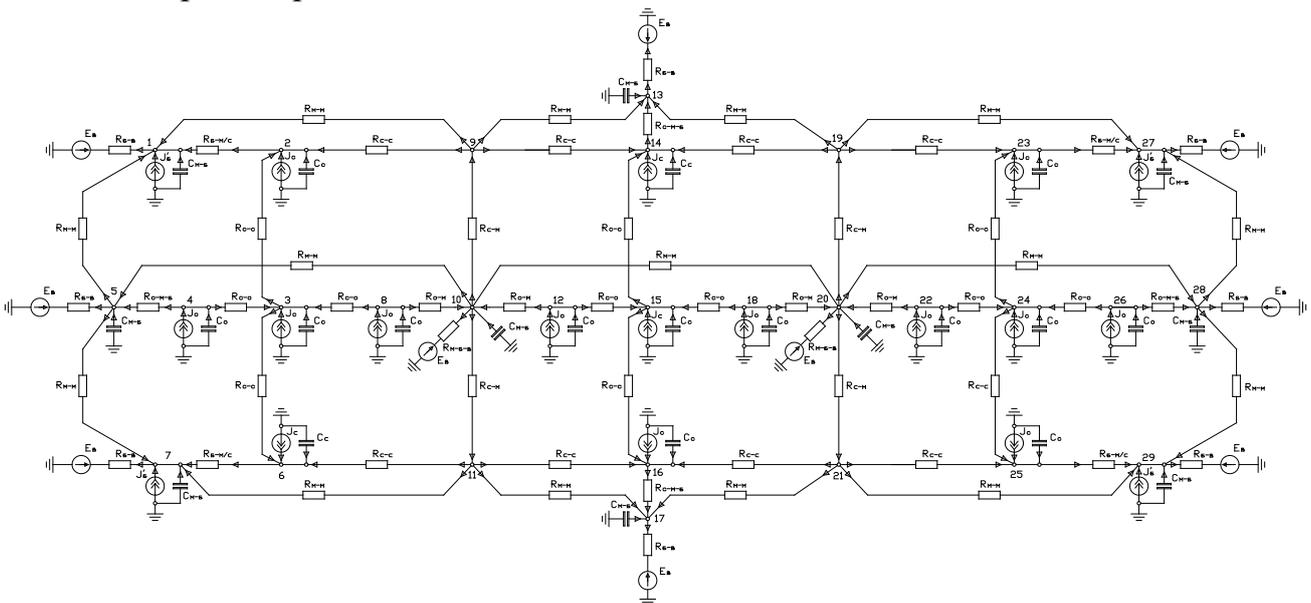


Рисунок 9 – Пространственная тепловая схема замещения ТМПН

На рисунке 9 представлена пространственная тепловая схема замещения ТМПН состоящая из 29 узлов. Математическое описание схемы представляет собой 25 дифференциальных и 4 алгебраических уравнения:

$$\begin{cases}
 J'_B + C_{M-B} \frac{d\varphi_1}{dt} + \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{R_{B-M/C}} + \frac{\varphi_{13} - \varphi_1}{R_{M-M}} - \frac{\varphi_1 - \varphi_5}{R_{M-M}} - \frac{\varphi_1 - \varphi_B}{R_{B-B}} = 0 \\
 J_C + C_C \frac{d\varphi_2}{dt} + \frac{\varphi_3 - \varphi_2}{R_{C-C}} + \frac{\varphi_9 - \varphi_2}{R_{C-C/M}} - \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{R_{B-M/C}} = 0 \\
 J_C + C_C \frac{d\varphi_3}{dt} + \frac{\varphi_8 - \varphi_3}{R_{C-O}} + \frac{\varphi_4 - \varphi_3}{R_{C-O}} - \frac{\varphi_3 - \varphi_2}{R_{C-C}} - \frac{\varphi_3 - \varphi_5}{R_{C-C}} = 0 \\
 J_O + C_O \frac{d\varphi_4}{dt} - \frac{\varphi_4 - \varphi_5}{R_{O-M-B}} - \frac{\varphi_4 - \varphi_3}{R_{C-O}} = 0 \\
 C_{M-B} \frac{d\varphi_5}{dt} + \frac{\varphi_4 - \varphi_5}{R_{O-M-B}} + \frac{\varphi_{10} - \varphi_5}{R_{M-M}} + \frac{\varphi_1 - \varphi_5}{R_{M-M}} - \frac{\varphi_5 - \varphi_7}{R_{M-M}} - \frac{\varphi_5 - \varphi_B}{R_{B-B}} = 0 \\
 J_C + C_C \frac{d\varphi_6}{dt} + \frac{\varphi_2 - \varphi_6}{R_{C-C}} + \frac{\varphi_{11} - \varphi_6}{R_{C-C/M}} - \frac{\varphi_6 - \varphi_7}{R_{B-M/C}} = 0 \\
 J'_B + C_{M-B} \frac{d\varphi_7}{dt} + \frac{\varphi_6 - \varphi_7}{R_{B-M/C}} + \frac{\varphi_5 - \varphi_7}{R_{M-M}} - \frac{\varphi_7 - \varphi_{17}}{R_{M-M}} - \frac{\varphi_7 - \varphi_B}{R_{B-B}} = 0 \\
 J_O + C_O \frac{d\varphi_8}{dt} - \frac{\varphi_8 - \varphi_3}{R_{C-O}} - \frac{\varphi_8 - \varphi_{10}}{R_{O-M}} = 0 \\
 \frac{\varphi_{14} - \varphi_9}{R_{C-C/M}} + \frac{\varphi_{10} - \varphi_9}{R_{C-M}} - \frac{\varphi_9 - \varphi_2}{R_{C-C/M}} = 0 \\
 C_{M-B} \frac{d\varphi_{10}}{dt} + \frac{\varphi_8 - \varphi_{10}}{R_{O-M}} + \frac{\varphi_{12} - \varphi_{10}}{R_{O-M}} - \frac{\varphi_{10} - \varphi_{11}}{R_{C-M}} - \frac{\varphi_{10} - \varphi_9}{R_{C-M}} - \frac{\varphi_{10} - \varphi_5}{R_{M-M}} - \frac{\varphi_{10} - \varphi_B}{R_{M-B-B}} = 0 \\
 \frac{\varphi_{16} - \varphi_{11}}{R_{C-C/M}} + \frac{\varphi_{10} - \varphi_{11}}{R_{C-M}} - \frac{\varphi_{11} - \varphi_6}{R_{C-C/M}} = 0 \\
 J_O + C_O \frac{d\varphi_{12}}{dt} - \frac{\varphi_{12} - \varphi_{15}}{R_{C-O}} - \frac{\varphi_{12} - \varphi_{10}}{R_{O-M}} = 0 \\
 C_{M-B} \frac{d\varphi_{13}}{dt} + \frac{\varphi_4 - \varphi_{13}}{R_{C-M-B}} - \frac{\varphi_{13} - \varphi_1}{R_{M-M}} - \frac{\varphi_{13} - \varphi_{27}}{R_{M-M}} - \frac{\varphi_{13} - \varphi_B}{R_{B-B}} = 0 \\
 J_C + C_C \frac{d\varphi_{14}}{dt} + \frac{\varphi_{15} - \varphi_{14}}{R_{C-C}} - \frac{\varphi_{14} - \varphi_9}{R_{C-C/M}} - \frac{\varphi_{14} - \varphi_{13}}{R_{C-M-B}} - \frac{\varphi_{14} - \varphi_{19}}{R_{C-C/M}} = 0 \\
 J_C + C_C \frac{d\varphi_{15}}{dt} + \frac{\varphi_{12} - \varphi_{15}}{R_{C-O}} + \frac{\varphi_{18} - \varphi_{15}}{R_{C-O}} - \frac{\varphi_{15} - \varphi_{14}}{R_{C-C}} - \frac{\varphi_{15} - \varphi_{16}}{R_{C-C}} = 0 \\
 J_C + C_C \frac{d\varphi_{16}}{dt} + \frac{\varphi_{13} - \varphi_{16}}{R_{C-C}} + \frac{\varphi_{16} - \varphi_{11}}{R_{C-C/M}} - \frac{\varphi_{16} - \varphi_{21}}{R_{C-C/M}} - \frac{\varphi_{16} - \varphi_{17}}{R_{C-M-B}} = 0 \\
 C_{M-B} \frac{d\varphi_{17}}{dt} + \frac{\varphi_{16} - \varphi_{17}}{R_{C-M-B}} + \frac{\varphi_7 - \varphi_{17}}{R_{M-M}} + \frac{\varphi_{29} - \varphi_{17}}{R_{M-M}} - \frac{\varphi_{17} - \varphi_B}{R_{B-B}} = 0 \\
 J_O + C_O \frac{d\varphi_{18}}{dt} - \frac{\varphi_{18} - \varphi_{15}}{R_{C-O}} - \frac{\varphi_{18} - \varphi_{20}}{R_{O-M}} = 0 \\
 \frac{\varphi_{14} - \varphi_{19}}{R_{C-C/M}} + \frac{\varphi_{20} - \varphi_{19}}{R_{C-M}} - \frac{\varphi_{19} - \varphi_{23}}{R_{C-C/M}} = 0 \\
 C_{M-B} \frac{d\varphi_{20}}{dt} + \frac{\varphi_{18} - \varphi_{20}}{R_{O-M}} + \frac{\varphi_{22} - \varphi_{20}}{R_{O-M}} - \frac{\varphi_{20} - \varphi_{21}}{R_{C-M}} - \frac{\varphi_{20} - \varphi_{19}}{R_{C-M}} - \frac{\varphi_{20} - \varphi_{28}}{R_{M-M}} - \frac{\varphi_{20} - \varphi_B}{R_{M-B-B}} = 0 \\
 \frac{\varphi_{16} - \varphi_{21}}{R_{C-C/M}} + \frac{\varphi_{20} - \varphi_{21}}{R_{C-M}} - \frac{\varphi_{21} - \varphi_{25}}{R_{C-C/M}} = 0 \\
 J_O + C_O \frac{d\varphi_{22}}{dt} - \frac{\varphi_{22} - \varphi_{20}}{R_{C-O}} - \frac{\varphi_{22} - \varphi_{24}}{R_{C-O}} = 0 \\
 J_C + C_C \frac{d\varphi_{23}}{dt} + \frac{\varphi_{24} - \varphi_{23}}{R_{C-C}} + \frac{\varphi_{19} - \varphi_{23}}{R_{C-C/M}} - \frac{\varphi_{23} - \varphi_{27}}{R_{B-M/C}} = 0 \\
 J_C + C_C \frac{d\varphi_{24}}{dt} + \frac{\varphi_{26} - \varphi_{24}}{R_{C-O}} + \frac{\varphi_{22} - \varphi_{24}}{R_{C-O}} - \frac{\varphi_{24} - \varphi_{25}}{R_{C-C}} - \frac{\varphi_{24} - \varphi_{23}}{R_{C-C}} = 0 \\
 J_C + C_C \frac{d\varphi_{25}}{dt} + \frac{\varphi_{24} - \varphi_{25}}{R_{C-C}} + \frac{\varphi_{21} - \varphi_{25}}{R_{C-C/M}} - \frac{\varphi_{25} - \varphi_{29}}{R_{B-M/C}} = 0 \\
 J_O + C_O \frac{d\varphi_{26}}{dt} - \frac{\varphi_{26} - \varphi_{28}}{R_{O-M-B}} - \frac{\varphi_{26} - \varphi_{24}}{R_{C-O}} = 0 \\
 J'_B + C_{M-B} \frac{d\varphi_{27}}{dt} + \frac{\varphi_{13} - \varphi_{27}}{R_{M-M}} + \frac{\varphi_{23} - \varphi_{27}}{R_{B-M/C}} - \frac{\varphi_{27} - \varphi_{28}}{R_{M-M}} - \frac{\varphi_{27} - \varphi_B}{R_{B-B}} = 0 \\
 C_{M-B} \frac{d\varphi_{28}}{dt} + \frac{\varphi_{27} - \varphi_{28}}{R_{M-M}} + \frac{\varphi_{20} - \varphi_{28}}{R_{M-M}} + \frac{\varphi_{26} - \varphi_{28}}{R_{O-M-B}} - \frac{\varphi_{28} - \varphi_{29}}{R_{M-M}} - \frac{\varphi_{28} - \varphi_B}{R_{B-B}} = 0 \\
 J'_B + C_{M-B} \frac{d\varphi_{29}}{dt} + \frac{\varphi_{28} - \varphi_{29}}{R_{M-M}} + \frac{\varphi_{25} - \varphi_{29}}{R_{B-M/C}} - \frac{\varphi_{29} - \varphi_{17}}{R_{M-M}} - \frac{\varphi_{29} - \varphi_B}{R_{B-B}} = 0
 \end{cases} \quad (9)$$

В четвертой главе разработано устройство прогнозирования теплового состояния трансформаторов ТМПН, предназначенное для сигнализации и ограничения недопустимых тепловых перегрузок ТМПН, не оснащенных защитой по температуре. Устройство предупреждает аварии, продлевает срок службы трансформаторов, сокращает расходы на ремонт и эксплуатацию. В отличие от известных, разработанное устройство учитывает добавочные потери в конструкционных узлах объекта, адаптируется к конструкционным особенностям объекта, влияющим на рецепторную электромагнитную характеристику. Структурная схема устройства представлена на рисунке 10.

Потери в трансформаторе имеют сложноформализуемые связи со значениями факторов сети и конструктивными особенностями трансформатора. Для подобных трансформаторов разных производителей влияния факторов сети могут быть различными. Результаты опроса специалистов эксплуатирующих организаций подтверждают различную «уязвимость» трансформаторов разных марок к отклонениям номинальных параметров сети. Решение проблемы, лежащей в сложности формализации зависимостей потерь от факторов сети и особенностей трансформатора, осуществляется за счет применения в устройстве блока знаний (БЗ) и оснащения устройств на серийных объектах датчиками температуры ВСМ трансформатора. В режиме слежения устройство проводит сопоставление ретроспективных данных о значениях факторов со значениями температуры ВСМ трансформатора, измеренных при помощи соответствующего

датчика, производит пересчет коэффициентов, уточняющих мощности добавочные потери и записывает информацию в БЗ. После накопления необходимого объема знаний, информацию можно обобщать и переносить на серийные устройства. При этом применение датчика температуры трансформатора не требуется.

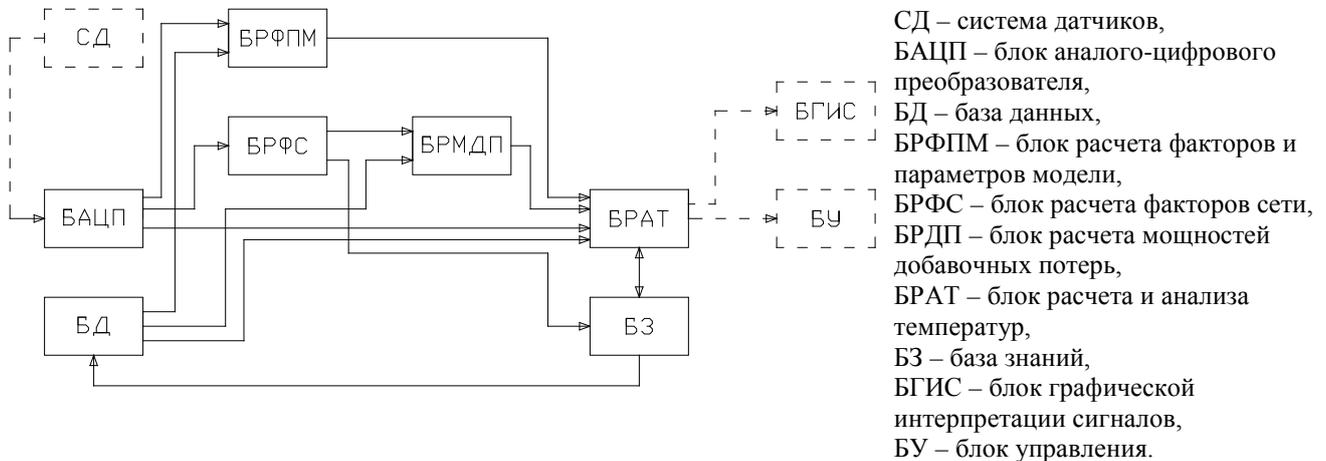


Рисунок 10 – Структурная схема устройства контроля температуры ТМПН

При разработке специальных трансформаторов, для которых динамические режимы работы является определяющими, оптимизационное проектирование необходимо производить с учетом таких режимов.

Для автоматизации процессов решения поверочных задач разработан блок тепловой динамики, использующий разработанные тепловые модели трансформатора. Алгоритм блока тепловой динамики системы автоматизированного проектирования силовых трансформаторов (САПР СТ) представлен на рисунке 11.

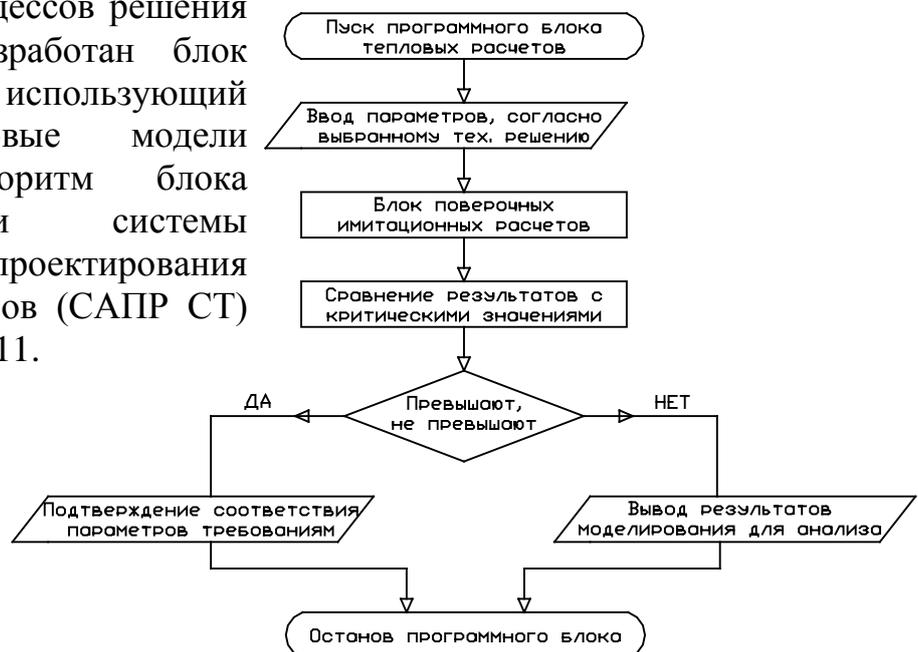


Рисунок 11 – Алгоритм блока тепловой динамики САПР СТ

Для инженерных расчетов тепловых динамических режимов ТМПН и других силовых маслонаполненных трансформаторов разработана программа, интерфейс которой представлен на рисунке 12. Специалист, используя первичную информацию об электротехническом комплексе «СЕТЬ-ТМПН-УЭЦН», может производить расчеты возможных тепловых режимов ТМПН.

Электрические параметры силового трансформатора		Массо-тепловые параметры силового трансформатора	
100	Номинальная мощность, кВА	40	Эквивалентная масса обмоток, кг
310	Мощность потерь холостого хода, Вт	180	Эквивалентная масса магнитопровода, кг
2400	Мощность нагрузочных потерь, ВА	190	Эквивалентная масса металлоконструкции, кг
5,5	Напряжение короткого замыкания, %	170	Масса масла, кг
50	Номинальная частота рабочего напряжения, Гц	390	Эквивалентная удельная теплоемкость обмоток, Дж/(кг*К)^-1
0,254	Активное сопротивление нулевой последовательности, Ом	470	Эквивалентная удельная теплоемкость магнитопровода, Дж/(кг*К)^-1
0,548	Индуктивное сопротивление нулевой последовательности, Ом	420	Эквивалентная удельная теплоемкость металлоконструкции, Дж/(кг*К)^-1
0,031	Активное сопротивление прямой последовательности, Ом	2014	Удельная теплоемкость масла, Дж/(кг*К)^-1
0,065	Индуктивное сопротивление прямой последовательности, Ом	0,00958	Тепловое сопротивление "обмотка-масло", К/Вт
		0,0322	Тепловое сопротивление "магнитопровод-масло", К/Вт
		0,000369	Тепловое сопротивление "конструкционные узлы-масло", К/Вт
		0,0121	Тепловое сопротивление "масло/бак- окружающая среда", К/Вт

Рисунок 12 - Скриншот вкладки ввода параметров программы инженерных расчетов тепловых процессов в силовых маслонаполненных трансформаторах

Анализ возможных тепловых режимов трансформатора с учетом переходных процессов может быть востребован на различных этапах решения задач электроснабжения: изысканий – предпроектная проработка, синтеза – разработка новых проектов, анализа – исследование существующих решений на необходимость и эффективность модернизации, экспертизы – оценка готовых инвестиционных проектов.

### Основные выводы и результаты

1. Получены распределения дефектов по частоте их возникновения в подсистемах трансформаторов ТМПН, эксплуатирующихся в НГДП ХМАО-Югры.

2. Разработана методика оценки факторов сети, оказывающих влияние на тепловые процессы в ТМПН, разработана математическая факторная модель расчета добавочных потерь в ТМПН. В результате анализа мощностей добавочных потерь в ТМПН выявлено, что сильные зависимости имеют: мощность потерь в магнитопроводе ТМПН от фактора превышения частоты питающего напряжения -  $P_{МТР}(F_{fMAX})=2.4$  о.е.; мощность потерь в конструкции ТМПН от фактора несимметрии питающего напряжения по обратной последовательности -  $P_{КТР}(F_{U0MAX})=1.38$  о.е. (приведенная к  $P_{XX}$ ); мощность потерь в токоведущих цепях ТМПН от фактора несимметрии питающего напряжения по обратной последовательности -  $P_{ОТР}(F_{U2MAX})=0.53$  о.е.; мощность потерь в токоведущих цепях ТМПН от фактора несинусоидальности питающего напряжения -  $P_{ОТР}(F_{SIN K3MAX})=1.28$  о.е.

3. Разработана методика многофакторного адаптивного диагностирования и прогнозирования тепловых процессов в трансформаторах ТМПН, производящая уточнение коэффициентов диагностической модели в результате ретроспективного анализа стохастических зависимостей температуры верхних слоев масла (ВСМ) от факторов питающей сети.

4. Разработаны планарная и пространственная математические модели тепловых процессов в ТМПН, учитывающие влияние факторов сети, добавочные потери в конструкционных узлах, зависимость теплопроводности трансформаторного масла от температуры.

5. Разработан блок тепловой динамики для применения в системах автоматизированного проектирования специальных силовых масляных трансформаторов.

6. Разработана программа инженерных расчетов тепловых процессов в трансформаторах ТМПН для различных режимов работы, с учетом воздействия на них факторов сети и окружающей среды.

7. Разработано устройство тепловой диагностики и защиты трансформаторов ТМПН, не оснащенных защитой по температуре.

#### **Список работ, опубликованных по теме диссертации:**

##### ***Статьи в периодических научных изданиях по перечню ВАК***

1. Архипов, А.В. Децентрализованное энергоснабжение в Ханты-Мансийском автономном округе – Югре/ А. В. Архипов, А.А. Зябкин, П.Н. Ремизов// Омский научный вестник. - 2010. - № 3(93). - С. 188-190.

2. Зябкин, А.А. Система непрерывного контроля параметров обмоток силовых трансформаторов на основе имитации динамических режимов работы / А. А. Зябкин, В.З Ковалев, Н.Г. Ровкина// Омский научный вестник. - 2011. - № 3(103). - С. 191-193.

3. Зябкин, А.А. Исследование причин возникновения дефектов силовых трансформаторов, питающих установки погружных электроцентробежных насосов нефтяных скважин / А. А. Зябкин, В.В. Сушков // Омский научный вестник. - 2012. - № 3(113). - С. 231-235.

4. Зябкин, А.А. Моделирование тепловых процессов и диагностирование силовых трансформаторов систем электроснабжения нефтяных месторождений / А. А. Зябкин, В.В. Сушков // Промышленная энергетика.- 2013. - № 2. - С. 39-42.

##### ***Статьи в научных изданиях, материалы региональных и международных конференций***

5. Архипов, А. В. Информационная система «Динамические режимы работы трансформаторов» / А.В. Архипов, А. А. Зябкин // Сб. мат. конф. междунар. IT-Форума. – Ханты-Мансийск : «Полиграфист», 2010.– С. 157-162.

6. Архипов, А. В. Математическое моделирование трансформатора в информационной системе «динамические режимы работы трансформаторов» / А.В. Архипов, А. А. Зябкин, П.Н. Ремизов // Инфокоммуникационные и вычислительные технологии и системы : сб. мат. сем. молодых уч. в рамках III междунар. конф. – Улан-Удэ : Изд.-полигр. комплекс ВСГАКИ. - 2010. - С. 3-6.

7. Архипов, А. В. Моделирование электромагнитных процессов в системах мониторинга силовых трансформаторов / А.В. Архипов, А. А. Зябкин, П.Н. Ремизов // Информационные системы и модели в научных исследованиях, промышленности, образовании и экологии : сб. докл. VII Всерос. науч.-техн. конф. – Тула: Изд. «Инновационные технологии» . – 2010.– С. 10-14.

8. Архипов, А. В. Энергетическая структурная модель дизельной когенерационной установки / А.В. Архипов, А. А. Зябкин, П.Н. Ремизов // Сб. науч.-исслед. работ финалистов конкурса аспирантов и молодых ученых в обл. энергосбережения в пром.-обл. – Новочеркасск: Лик. – 2010.– С.9-13.

9. Архипов, А. В. Анализ одношаговых численных методов применимых к решению задач динамики силовых трансформаторов / А.В. Архипов, А. А. Зябкин, П.Н. Ремизов // Сб. науч. труд. по мат. междунар. научн-практ. конф. «Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании ‘2010». – Одесса: Черноморье. – 2010.– С. 46-52.

10. Архипов, А. В. Исследование тепловых процессов в многооболочечной модели / А.В. Архипов, А. А. Зябкин, П.Н. Ремизов // Развитие автотранспортного комплекса Ханты-Мансийского автономного округа – Югры: Сб. мат. второй рег. науч.-техн. конф.. – Ханты-Мансийск: ЮГУ. – 2011.– С. 99-104.

11. Зябкин, А.А. Блок динамики в системах многоаспектного мониторинга состояний трансформаторного оборудования под нагрузкой /А. А. Зябкин, В.В. Сушков // Новые технологии – нефтегазовому региону: мат. гор. науч.-практ. конф. студ., аспирантов и молодых ученых.-Нижневартовск: изд-во Нижневарт. гуманит. ун-та.–2011.– С.90-94.

12. Зябкин, А.А. Оценка добавочных потерь в трансформаторах для установок погружных электрических центробежных насосов /А. А. Зябкин, В.В. Сушков // Инновационные подходы в организации и обеспечении учебного процесса ФГОС: Мат. рег. метод. сем.-конф.– Нижневартовск : издательство НГГУ.–2012.–С.156-160.

13. Вейнблат, А.В. Функциональный способ диагностирования теплового состояния трансформаторов ТМПН на основе on-line контроля электромагнитной обстановки питающей сети/А.В. Вейнблат, А. А. Зябкин, В.В. Сушков // Энергоэффективность и экономика: темат. сб. науч. тр.. – Омск. : Полиграфический центр КАН. – 2011. – С. 172-176.

14. Вейнблат, А.В. Зависимость добавочных потерь в трансформаторах ТМПН от частоты и несинусоидальности питающего напряжения/А.В. Вейнблат, А. А. Зябкин// Культура, наука, образование: проблемы и перспективы: Мат.

Пвсерос. научно-практ. конф.– Нижневартовск : издательство НвГУ.–2013.–С.80-82.

15. Сушков, В.В. Диагностика и управление электротехническими комплексами погружных установок электроцентробежных насосов: Монография / В.В. Сушков, Г.В. Мальгин, Т.Д. Гладких, А.А. Зябкин. – Нижневартовск: Изд-во Нижневарт. гос. ун-та. – 2013. – 112 с.

#### ***Патенты и свидетельства регистрации программ***

16. Зябкин, А.А. Устройство контроля добавочных потерь электроэнергии в трансформаторах/А. А. Зябкин, В.В. Сушков // пат. 131198, Рос. Федерация N 2012121508/28; заявл. 24.05.2012; опубл. 10.08.2013, Бюл. N22.

17. Зябкин, А.А. Расчет динамических тепловых процессов в силовых масляных трансформаторах при помощи пространственной многомассовой модели / А.А. Зябкин, В.В. Сушков // свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ N 2013619322; зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 01.10.2013 г. Федеральной службой по интеллектуальной собственности.

18. Зябкин, А.А. Расчет динамических тепловых процессов в силовых масляных трансформаторах при помощи цепной четырехмассовой модели / А.А. Зябкин, В.В. Сушков // свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ N 2013619588; зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 10.10.2013 г. Федеральной службой по интеллектуальной собственности.

**Личный вклад автора в совместных публикациях:** в работах [1, 3, 15] произведен анализ парка трансформаторного оборудования типового НГДП, выполнено распределение дефектов по подсистемам ТМПН; в работах [8, 12, 14, 15] разработана факторная модель добавочных потерь в трансформаторах ТМПН, произведена оценка влияния факторов сети на добавочные потери трансформаторов; в работах [4, 9, 10, 15, 17, 18] разрабатываются тепловые модели силовых маслонаполненных трансформаторов, производится моделирование тепловых процессов в трансформаторах ТМПН; в работах [2, 5, 6, 7, 11, 13, 15, 16] разрабатывается методика многофакторного адаптивного диагностирования и прогнозирования тепловых процессов в трансформаторах ТМПН.

Подписано в печать 20.11.2013  
Формат 60x84/16. Бумага писчая.  
Оперативный способ печати.  
Усл. печ. л. 1,5. Тираж 100 экз. Заказ № 665

Отпечатано в «Полиграфическом центре КАН»  
тел. (3812) 24-70-79, 8-904-585-98-84.  
E-mail: [pc\\_kan@mail.ru](mailto:pc_kan@mail.ru)  
644050, г. Омск, ул. Красный Путь, 30  
Лицензия ПЛД № 58-47 от 21.04.97