ТАВРИЧЕСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

Безменникова Людмила Николаевна

УДК 621.314.222.6:681.518.54

ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ СЕЛЬСКИХ ПОТРЕБИТЕЛЬСКИХ ПОДСТАНЦИЙ

05.09.03 – электротехнологические комплексы и системы

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель
Овчаров Владимир Васильевич,
доктор технических наук,
профессор

Мелитополь – 2007

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 5

РАЗДЕЛ 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ. . . . 11

1.1.Особенности работы силовых трансформаторов в условиях агропромышленного комплекса 11

1.2.Анализ причин повреждения силовых трансформаторов в агропромышленном комплексе 12

1.3.Анализ существующих методов оценки тепловых процессов в силовых трансформаторах 18

1.4.Анализ существующих средств диагностирования силовых трансформаторов. 20

Выводы. 31

РАЗДЕЛ 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАГРЕВА СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА КАК ГЕТЕРОГЕННОЙ СИСТЕМЫ ПРИ СИММЕТРИЧНОЙ ПЕРЕГРУЗКЕ . . . . . .
2.1. Аналитическое исследование процесса нагрева силового трансформатора как гетерогенной системы. 34
2.2. Методика определения эквивалентных тепловых проводимостей в силовом трансформаторе 34
2.3. Экспериментальные исследования эквивалентных тепловых проводимостей в силовом трансформаторе 43
2.3.1. Программа экспериментальных исследований эквивалентных тепловых проводимостей в силовом трансформаторе 49
2.3.2.Опыт холостого хода . . . . . .
2.3.3. Опыт короткого замыкания 49
2.3.4. Определение эквивалентных тепловых проводимостей 52
2.4.Исследование закономерностей процесса нагрева обмоток, 53
магнитопровода и масла силового трансформатора 54
Выводы . . . . . .
56
РАЗДЕЛ 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАГРЕВА СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА КАК ГЕТЕРОГЕННОЙ СИСТЕМЫ ПРИ НЕСИММЕТРИЧНОЙ ПЕРЕГРУЗКЕ 63
3.1. Анализ процесса нагрева силового трансформатора как гетерогенной системы при несимметричной перегрузке 64
3.2. Исследование температуры наиболее нагретой точки в функции температуры масла и кратности силы тока при несимметричных перегрузках. 64
Выводы . . . . . .

РАЗДЕЛ 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАГРЕВА СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА ПОД ДЕЙСТВИЕМ СВЕРХТОКОВ . . . . . .
4.1.Аналитическое исследование процесса нагрева силового трансформатора 85
под воздействием сверхтоков 90
4.2. Анализ процесса износа изоляции после действия сверхтоков. . . . . .
Выводы 92

РАЗДЕЛ 5. РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО 92
ДИАГНОСТИРОВАНИЯ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА 99
5.1.Обоснование параметров функционального диагностирования силового 103
трансформатора . . . . . .
5.1.1. Общая часть . . . . . .
5.1.2.Методика аналитического исследования процесса нагрева силового 104
трансформатора при симметричных перегрузках по температуре масла как диагностическому параметру . . . . . .
5.1.3.Аналитическое исследование дополнительного теплового износа 104
изоляции силового трансформатора при симметричных перегрузках по 104

температуре масла как диагностическому параметру . . . . . .
5.1.4.Методика аналитического исследования процесса нагрева силового 104
трансформатора при симметричных перегрузках по силе электрического тока

как диагностическому параметру 5.1 110
.5.Аналитическое исследование дополнительного теплового износа изоляции
силового трансформатора при симметричных перегрузках по силе элек
трического тока как диагностическому параметру . . . . . .
5.2.Обоснование модели функционального диагностирования силового
трансформатора по температуре масла и силам токов в фазах 114
Выводы . . . . . .

РАЗДЕЛ 6. РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВА ФУНКЦИОНАЛЬНОГО 117
ДИАГНОСТИРОВАНИЯ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА . . . . . .
6.1.Разработка структурной схемы устройства функционального 119
диагностирования силового трансформатора на базе микроконтроллера 131
6.2.Разработка устройства функционального диагностирования . . . . . .
6.2.1. Микроконтроллерный блок. . . . . .
6.2.2.Блок измерения силы тока нагрузки 133
6.2.3.Блок измерения температуры масла . . . . . .
6.2.4.Запоминающее устройство 133
6.2.5. Коммутационный порт. 135
6.2.6. Блок индикации 135
6.2.7. Блок питания 135
6.3. Принцип действия устройства диагностирования. 136
6.4.Оценка надежности устройства функционального диагностирования. . . . 136
6.5.Оценка экономической эффективности 136
Выводы 136
ВЫВОДЫ 137
137
ПРИЛОЖЕНИЯ 141
142
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ 146
ВЫВОДЫ 148
151
200

ВВЕДЕНИЕ

Перед агропромышленным комплексом (АПК) Украины, с учетом его реформирования, согласно Указам Президента и постановлениям Кабинета Министров, стоят серьезные задания к переходу на интенсивные способы получения сельскохозяйственной продукции. Все это требует повышения уровня электрификации сельского хозяйства.

На конференции «Топливно-энергетический комплекс Украины в контексте глобальных энергетических преобразований» отмечалось, что главной задачей является обеспечение надежного и эффективного функционирования электроэнергетической системы государства. В процессе переоснащения и реконструкции электрических сетей необходимо оборудовать их современными устройствами релейной защиты, автоматики, аппаратурой диагностики [1].

В системе АПК электрифицировано большое количество установок водоснабжения и орошения, агрегатов предназначенных для сушки и сортировки зерна, цехов и предприятий по переработке сельскохозяйственной продукции, комплексов для выращивания скота и птицы. Увеличение парка электрооборудования ведет к увеличению потребления электроэнергии. Например, за последние четыре года в Мелитопольском районе годовое потребление электрической энергии увеличилось на 22%.

Как известно, надежность работы предприятий АПК в значительной степени зависит от надежности энергосистемы, которая в свою очередь во многом зависит от стабильной и надежной работы силовых трансформаторов , которые являются связующим звеном между электростанцией и потре бителями. Внезапный выход из строя трансформатора приносит большой ущерб, так как при этом убытки связаны не только с необходимостью восстановления трансформатора, но и с перерывами в технологических процессах, нежелательными перерывами или ограничениями в режимах работы энергосистемы в целом.

При этом следует учесть, что в настоящее время угрожающими темпами растет износ силового оборудования (трансформаторов), так как основная часть его была изготовлена на заводах СССР. Доля трансформаторов, выработавших свой ресурс, составляет от 30% до 70% [1]. Техническое перевооружение трансформаторного парка в силу сложившихся экономических условий идет крайне медленно. Трансформаторы, выработавшие свой ресурс, более чувствительны к факторам износа изоляции. Высокая скорость развития повреждений приводит к повышению риска выхода из строя трансформаторного оборудования, а также к затруднению в прогнозировании продолжительности безаварийной работы энергосистем при существующих формах технического обслуживания, реализованных в виде системы планово-предупредительных ремонтов (ППР).

Актуальность темы

Опыт эксплуатации силового электрооборудования в агропромромышленном комплексе показывает значительную аварийность силовых трансформаторов потребительских подстанций, которая приносит сельскохозяйственному производству дополнительный ущерб из-за остановки целого ряда технологически связанного оборудования, недовыпуска продукции, незапланированных ремонтов и из-за дополнительных затрат на восстановление системы энергоснабжения. Ежегодно в системе энергоснабжения выходит из строя 8 – 10 % трансформаторов потребительских подстанций [2, 3]. По результатам наблюдений за эксплуатацией силовых трансформаторов сельских трансформаторных подстанций выявлено, что рост интенсивности отказов трансформаторов напряжением 10 кВ наблюдается после 15 лет работы. Основной причиной является ухудшение состояния изоляции. При этом речь идет, прежде всего, об из
носе или старении витковой изоляции обмоток, наиболее подверженной температурным, электрическим и механическим воздействиям. Остаточный срок службы трансформаторов чаще всего определяется степенью деградации изоляции, нагрузкой и специфичными условиями работы.

Существующие формы обслуживания силовых трансформаторов в агропромышленном комплексе не обеспечивают достаточную эксплуатационную надежность, потому что не предусматривают анализ текущего технического состояния силовых трансформаторов. Поэтому исследования, направленные на анализ режимов работы силовых трансформаторов в условиях АПК, разработку методов функционального диагностирования, обоснование параметров диагностирования и на основании этого разработку устройства функционального диагностирования эксплуатационных режимов работы силовых трансформаторов, позволят повысить их эксплуатационную надёжность.

Связь работы с научными программами, планами, темами.

Работа выполнена в соответствии с планом научно-исследовательской работы Таврической государственной агротехнической академии на 2002-2007 гг, по научно-технической программе № 1 «Розробка наукових систем, технологій і технічних засобів для забезпечення продовольчої безпеки Пі вденного регіону України» (государственный регистрационный номер 0102U000678). *Подпрограмма 1.10*. «Разработка методов и средств технического сервиса электрооборудования и экономии энергоресурсов». *Направление 1.10.5*. «Диагностирование эксплуатационных режимов работы силових трансформаторов сельских потребительских подстанций».

Цель и задачи исследования

Цель исследования: повышение эксплуатационных показателей роботы силовых трансформаторов сельских потребительских подстанций путем объективного функционального их диагностирования на базе математической модели процессов нагрева трансформаторов.

Задачи исследования:

1. Исследовать процесс нагрева силового трансформатора при симметричной токовой перегрузке.
2. Исследовать процесс нагрева силового трансформатора при несимметричной токовой перегрузке.
3. Исследовать процесс нагрева силового трансформатора под действием сверхтоков.
4. Разработать диагностическую модель функционального диагностирования силового трансформатора.
5. Разработать устройство функционального диагностирования силового трансформатора.

Объект исследования – процессы нагрева и теплового расхода ресурса изоляции силового трансформатора в эксплуатационных условиях.

Предмет исследования – закономерности процессов нагрева и теплового расхода ресурса изоляции силового трансформатора под действием эксплуатационных факторов.

Методы исследования

Процессы нагрева силового трансформатора исследовались с применением тепловых схем замещения, операторного метода решения дифференциальных уравнений, матричного расчета. Определение температур обмоток в экспериментальных исследованиях проводились косвенным методом, путем измерения их активных сопротивлений. Вычисления теоретических зависимостей и обработка экспериментальных данных проводились математично-статистическими методом с применением пакета программ «Microsoft Office» и программного обеспечения «Maple 9,5».

Научная новизна полученных результатов:

1. Получила дальнейшее развитие теория нагрева силового трансформатора как гетерогенной системы в сравнении с номинальным режимом работы при симметричных и несимметричных перегрузках и действии сверхтоков, характерных для специфических условий агропромышленного комплекса.
2. Разработана методология определения параметров тепловой схемы замещения силового трансформатора с использованием опытов холостого хода и короткого замыкания.
3. Разработана модель функционального диагностирования эксплуатационных режимов работы силового трансформатора с учетом эксплуатационных воздействий, характерных для специфических условий агропромышленного комплекса.

Практическое значение полученных результатов

1. Разработана микропроцессорная система функционального диагностирования силового трансформатора потребительских подстанций.

2. Разработано устройство функционального диагностирования силового трансформатора в эксплуатационных условиях.
3. Разработана методологика практического определения параметров диагностической модели.

Личный вклад соискателя.

В работе «Теоретичне обґрунтування визначення теплових провідностей у силових трансформаторах» выполненной в соавторстве с Овчаровым В.В. непосредственно соискателем разработана методика определения тепловых проводимостей по результатам опытов холостого хода и короткого замыкания.

В работе «Аналітичне дослідження залежності температури обмоток силового трансформатора у функції температури масла і кратності сили струму» выполненной в соавторстве с Овчаровым В.В. непосредственно соискателем проведен анализ тепловых процессов в силовом трансформаторе и выведена зависимость температуры обмоток в функции температуры масла и кратности силы тока.

В работе «Исследование теплових переходных процессов в силових трансформаторах при воздействии сверхтоков» выполненной в соавторстве с Овчаровым В.В. непосредственно соискателем разработана математическая модель процесса теплового износа изоляции после действия сверхтоков.

Апробация результатов диссертации. Основные положения и результаты диссертационной работы заслушивались и обсуждались на научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава , аспирантов и студентов Таврической государственной агротехнической академии (г. Мелитополь, 2003 – 2007 г.), международной научно-практической конференции «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України» (г. Харьков, 2006 г.), научно-технической конференции «Проблеми енерго - ресурсозбереження в технологічних процесах АПК» (г. Мелитополь, 2007 г.), международной научно-практической конференции «Проблемы автоматизированного электропривода» (АР Крым, п.г.т. Николаевка, 2007 г.).

Публикации. Основные положения и результаты диссертационной работы опубликованы в 8 статьях за период с 2004 года по 2007 год .

РАЗДЕЛ 1
СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1. Особенности работы силовых трансформаторов в условиях агропромышленного комплекса

В распределительных сетях агропромышленного комплекса эксплуатируются силовые понижающие трансформаторы мощностью 25 - 630 *кВА* с классом напряжения – 10 кВ [2, 3].

Силовые трансформаторы при работе в условиях агропромышленного комплекса испытывают специфические эксплуатационные воздействия:

- *колебания температуры окружающей среды*; трансформатор испытывает воздействие, как суточных, так и сезонных колебаний температуры, которая может изменяться от минус 20 ^oC до плюс 50 ^oC; периодические изменения температуры приводят к механическим и электрическим повреждениям элементов конструкции трансформатора, ускорению теплового износа изоляции [2, 4, 5];
- *повышенной влажности*; повышенная влажность ускоряет коррозию металлических элементов и ухудшает электрические характеристики изоляционных материалов [2, 4, 5, 6];
- *неравномерного суточного графика токовых нагрузок*; график токовой нагрузки характеризуется резкими перепадами - кратковременные максимумы (2 – 4 ч/сут.) чередуются с длительными провалами (8 - 12 ч/сут.); средняя суточная загрузка трансформатора составляет 43%, а число часов использования установленной мощности потребительских трансформаторов - 1000 ч/год при запланированных 3000-4000 ч/год [2, 5, 7];
- *неравномерной токовой нагрузки фаз*; по данным исследований [2, 8, 9, 10] 40% трансформаторов потребительских подстанций работают с недопустимой асимметрией токовой нагрузки фаз (35 – 50%), что приводит к изменению картины температурного поля внутри трансформатора, повышению потерь мощности, искажению величины напряжения на низкой стороне;
- *пусковых токов*; мощность отдельных потребителей электрической энергии соизмерима с мощностью питающих трансформаторов, пусковые токи, таких потребителей, приводят к дополнительному нагреву обмоток трансформатора [7 , 9, 11].

Кроме того, *отсутствие постоянного обслуживания* силовых трансформаторов приводит к развитию скрытых дефектов в нем и как следствие, аварийным отключениям трансформаторов [11, 14].

Большая протяженность воздушных линий и удаленность потребительских подстанций от диспетчерских пунктов, в среднем протяженность линии может достигать 120 – 180 км, приводит к низкой эффективности системы защиты [2].

Перечисленные выше эксплуатационные особенности работы силовых трансформаторов в агропромышленном комплексе приводят к повышению риска выхода из строя трансформаторов, к затруднениям по обслуживанию, выбору устройств защиты и диагностирования.

1.2. Анализ причин повреждения силовых трансформаторов в АПК

При организации эксплуатации силовых трансформаторов стремятся обеспечить расчетную долговечность, защиту от аварийных режимов, а также экономичность работы и максимально возможное использование установленной мощности трансформаторов в соответствии с правилами и стандартами [7, 11, 12]. Срок службы трансформатора составляет 25 лет при условии работы с номинальной мощностью и предельно допустимыми значениями температур обмотки, магнитопровода и масла [7, 12, 13].

В результате снижения темпов ввода в эксплуатацию нового электрооборудования, сокращения объемов финансирования текущих и капитальных ремонтов произошел рост количества морально и физически устаревшего силового оборудования [1, 14, 15, 16].

Например, в Мелитопольском районе техническое перевооружение трансформаторов, в силу сложившихся экономических условий, идет крайне медленно. Так в 2003 году оно составляло 0,5%; в 2004 – 1,1%; а в 2005 – 1,3% . При этом, почти 70 % трансформаторного парка выработало свой ресурс [15]. На рисунке 1.1 показано распределение количества силового оборудования по срокам эксплуатации в Мелитопольских районных электрических сетях (РЭС).

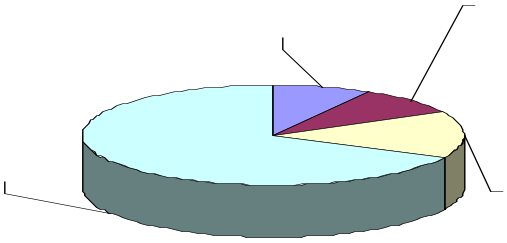


Рисунок 1.1. Распределение силовых трансформаторов по срокам эксплуатации в Мелитопольских РЭС (на 2006 год).

С каждым годом возрастает риск технических отказов и аварий, так как трансформаторы, выработавшие свой ресурс, более чувствительны к специфическим условиям работы в АПК.

Согласно приведенной в [15] статистике, за период с 2003 по 2006 г. в Мелитопольском районе было зафиксировано 113 отказов и технических нарушений в работе силовых трансформаторов напряжением 10 кВ. В таблице 1.1 приведены данные распределения технических повреждений силовых трансформаторов по узлам с учетом продолжительности эксплуатации. Как следует из таблицы 1.1, наибольшую повреждаемость имеют обмотки – 60%, высоковольтные вводы – 22%, значительная доля отказов приходится на течь масла – 9%. Повреждения обмоток имеют место у трансформаторов с любыми сро ками эксплуатации, для регуляторов напряжения эти сроки составляют 10 – 20 лет, для высоковольтных вводов повреждения наблюдаются после 10 лет эксплуатации трансформатора.

Таблица 1.1

Распределение повреждений силовых трансформаторов по узлам с учетом продолжительности эксплуатации за период 2003 – 2006 г.

Узел	Число повреждений по продолжительности эксплуатации			Всего
	до 10 лет	до 20 лет	более 25 лет	
Обмотки	15	25	28	68
Магнито-провод	1	2	2	5
Регуляторы напряжения	-	1	4	5
Вводы	7	9	9	25
Течь масла	2	5	3	10
Итого	25	42	46	113

Проведенный анализ показал, что 60% отказов и технических нарушений в работе силовых трансформаторов напряжением 10 кВ сопровождалось внутренними короткими замыканиями (КЗ). Основными причинами КЗ являлись - износ изоляции обмоток, пробой изоляции и вводов.

Известно, что состояние обмоток силового трансформатора зависит от целого ряда факторов: состояния электрической изоляции, перепадов температуры внутри трансформатора, механических воздействий, влажности, загрязнения масла и других. Определяющим является состояние изоляции под воздействием эксплуатационных факторов.

На рисунке 1.3 представлена структурная схема повреждений изоляции силовых трансформаторов [17], которая позволяет раскрыть механизм развития повреждений изоляции и выявить основные и косвенные причины этих повреждений.

Перегрузки, колебания температуры окружающей среды, высокая влажность, сверхтоки, возникающие при пусковых режимах электродвигателей и при коротких замыканиях в питаемых сетях приводят к перегреву изоляции, в результате чего ускоряется ее тепловой износ. Под действием температурных режимов электрическая изоляция химически разлагается, теряет эластичность, становится хрупкой. Механические воздействия приводят к появлению трещин , электрическое сопротивление изоляции уменьшается и затем наступает электрический пробой [4, 5, 9, 14, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24]. Также на износ

изоляции влияет температура масла, увлажнение масла, окисление масла и другие причины, снижающие механическую прочность изоляции [25,26].

Остаточный срок службы трансформатора определяется степенью износа изоляции. Определяющим параметром состояния изоляции обмоток является скорость теплового износа изоляции, зависящая от температуры обмоток.

Из выше сказанного следует, что повреждение изоляции является одной из основных причин выхода из строя трансформаторов сельских потребительских подстанции. Поэтому возникает необходимость выявления развивающихся дефектов или опасных режимов работы трансформаторов до того, как они вызовут его повреждение. Средством достижения этой цели является непрерывный контроль режимов работы силового трансформатора по температуре обмоток и остаточному ресурсу изоляции [14, 16, 17, 24, 27, 28, 29].

Рисунок 1.3. Структурная схема повреждений изоляции силовых трансформаторов

В общем случае силовые трансформаторы в условиях АПК работают с неравномерной токовой нагрузкой фаз, что характеризуется неодинаковыми тепловыми процессами в отдельных фазах. Возникающие при этом системати ческие перегрузки одной из фаз способствуют увеличению скорости износа изоляции этой фазы, что приводит к аварийному отключению всего трансформатора. В связи с этим, необходимо контролировать тепловые состояния каждой фазы трансформатора в эксплуатации при неравномерной токовой нагрузке.

Непрерывный контроль температуры обмоток можно осуществлять температурными первичными преобразователями, которые устанавливаются непосредственно в обмотку силового трансформатора, что вызывает затруднение для реализации такого контроля в условиях эксплуатации трансформаторов сельских потребительских подстанций.

Так как в процессе эксплуатации температура активных частей (обмоток, магнитопровода и масла) трансформатора постоянно меняется, что связано с изменениями графика нагрузки, и их тепловое состояние определяется потерями активной мощности в обмотках и магнитопроводе (источниках тепла), то температуру обмоток можно определять по эквивалентным суточным графикам нагрузки или по температуре верхних слоев масла. Полученные значения сравниваются с нормированными значениями температур обмоток, масла в верхних слоях [12].

При неравномерной токовой нагрузке фаз силового трансформатора для анализа его теплового состояния, следует учитывать не только температурный режим каждой фазы, но и динамику тепловых процессов в них, которая характеризуется конструктивными параметрами силового трансформатора [30, 31, 32, 33]. Такой анализ может базироваться на результатах тепловых расчётов и экспериментальных исследований тепловых процессов в элементах конструкции силового трансформатора. На сегодняшний день существуют многочисленные теоретические разработки, применяемые при анализе тепловых процессов в электрических машинах и в элементах их конструкции.

1.3. Анализ существующих методов оценки тепловых процессов в силовых трансформаторах

Методам тепловых расчетов посвящены работы Л. М. Шницера, Р. Зодерберга, А.Е. Алексеева, М.П. Костенко, И.Ф. Филиппова, А.М. Залесского, Г.А. Кукенкова, Н.И. Булгакова, В.В. Боднара. Теория тепловых процессов в электрических машинах рассмотрена в работах украинских ученых: Г.М. Федоренко, В.Г. Данько, М. М. Федорова, В. И. Выговского, П.Г. Кохана, А.Н. Кравченко, А.И. Титко и др.

В классической теории тепловых расчетов температура в любой точке тела определяется дифференциальным уравнением, которое устанавливает

связь между изменениями температуры в пространстве и во времени и описы вает процесс переноса тепла внутри тела с учетом начальных и граничных условий [30, 37, 39]. При расчетах делают ряд допущений [22, 37, 38]:

- электрическая машина (или ее конструктивная часть) является единым телом, которое обладает неограниченной теплопроводностью;
- температура окружающей среды неизменна, теплоемкость окружающей среды бесконечна;
- тепловые проводимости между телами машины не зависят от температуры.

Большое количество переменных, входящих в дифференциальные уравнения, сложность начальных и граничных условий вызывают затруднения при решении. Данный метод более приемлем при конструкторских расчетах и анализах тепловых процессов в отдельных элементах конструкции электрических машин. Для анализа тепловых процессов в эксплуатационных условиях применяют упрощенные методы с использованием эквивалентных тепловых схем.

В работах [40 - 47] тепловые процессы рассматриваются на примере эквивалентных аналоговых схем. При составлении схем применяют следующую систему аналогов: теплоёмкостям отдельных тел соответствуют электрические ёмкости; тепловым проводимостям – электрические сопротивления; превышениям температур отдельных тел соответствуют электрические напряжения; потерям активной мощности в телах – источники тока. Для эквивалентной тепловой схемы записывается система уравнений по законам Кирхгофа. Решив полученную систему уравнений относительно напряжений, используя масштабы моделирования, можно определить значения превышений температуры элементов устройства над температурой окружающей среды. Данная схема позволяет проследить динамику теплового процесса в активных частях электрической машины. Основным недостатком является трудность в определении количественных характеристик элементов эквивалентной аналоговой схемы.

В работах [9, 22, 48, 49, 50, 51] электрическая машина рассматривается как система однородных, в тепловом отношении, тел. Каждое тело характеризуется теплоёмкостями, потерями активной мощности, а между телами происходит теплообмен посредством тепловых проводимостей. Также происходит теплообмен между телами и окружающей средой. При этом считают, что тепловые проводимости и теплоёмкости не зависят от температуры, а теплоёмкость окружающей среды равна бесконечности и ее температура постоянна. Анализ тепловых процессов осуществляется путем решения системы дифференциальных уравнений теплового баланса, составленного для каждого тела. В тепловых схемах замещения, представленных в работах [9, 22], обмотки фаз силового трансформатора рассматриваются как однородное тело, при анализе процессов нагрева

учитывается среднее значение потерь активной мощности, считая, что обмотки фаз нагреваются одинаково. При несимметричной токовой нагрузке потери активных мощностей в фазах разные, тогда и тепловые процессы в фазах будут протекать неодинаково.

Для исследования процессов нагрева силового трансформатора необходимо рассмотреть тепловую схему замещения с учётом несимметричной токовой нагрузки, которая в последствии будет учитываться при разработке метода и устройства функционального диагностирования эксплуатационных режимов его работы.

1.4. Анализ существующих средств диагностирования силовых трансформаторов

Для повышения эксплуатационной надежности силовых трансформаторов, которые эксплуатируются в сельскохозяйственном производстве, необходимо усовершенствование средств диагностирования, что позволит эксплуатационному персоналу располагать точными данными о режимах работы электрооборудования, состоянии активных частей, безошибочно определять время отключения его от сети для проведения текущего ремонта.

Вопросы диагностирования силовых трансформаторов отражены в работах Овчарова В.В., Клюева В.В., Пархоменко П.П., Абрамчука В.Е., Дробышевского А.А., Левицкой Е.И., Андреева Д.В., Бельцера В.Р., Руссова В .А., Береговского А.В., Сулеймановой Л.М., Алексеева Б.А., Хренникова А.Ю., Шлегеля О.А., Соболева Н.Н., Колесова М.М., Лежнюка П.Д., Рубананко А.Э., Будадина О.Н., Бажкова С.А. и др. Проблемы теплового старения изоляции, повреждения силовых трансформаторов и их диагностирование рассмотрены в работах австралийских и американских ученых [52 - 60].

В последнее время во многих странах разрабатываются и внедряются системы контроля состояния силовых трансформаторов. Наибольший опыт эксплуатации имеют системы TRAS (США), Siemens (ФРГ), ABB Secheron (Швейцария), система Smart Substations компании General Electric (США). Разработки методов и систем непрерывного контроля силовых трансформаторов проводятся также в России и Белоруссии.

Существующие методы технического диагностирования силового электрооборудования по способу воздействия на объект можно разделить на три группы. Классификация методов технического диагностирования представлена на рисунке 1.4 [27].

К первой группе относятся методы тестового диагностирования. Исследования объекта этими методами осуществляется только после вывода его из эксплуатации (например, во время плановых ремонтов). Такие методы диагностирования являются в настоящее время основными источниками информации о состоянии силовых

трансформаторов любого класса напряжения и любой мощности [61,62].

К данной группе относятся:

- метод хроматографического анализа трансформаторного масла;
- измерение сопротивления изоляции;
- измерение внутреннего сопротивления изоляции и др.

Метод хроматографического анализа трансформаторного масла позволяет выявлять незначительные изменения в изоляции и эффективно оценивать развитие в ней тепловых и электрических процессов, сопровождаемых химическими процессами [63 - 68]. Регулярная проверка масла способствует снижению вероятности повреждения изоляции обмоток силового трансформатора.

В последнее время, наряду с традиционными методами, широкое распространение получают новые методы тестового диагностирования, например метод низковольтных импульсов [69- 72]. Суть его заключается в том, что при подаче на одну из обмоток силового трансформатора прямоугольного импульса напряжением 100 – 500 В переходные импульсы тока других обмоток регистрируются осциллографом. По изменениям в осциллограммах, судят об

Функциональное

Метод электрических параметров

Рисунок 1. 4. Классификация методов технического диагностирования силовых трансформаторов.

изменениях механического состояния обмоток трансформатора. Сейчас данный метод применяется только для трансформаторов большой мощности.

Другим, сравнительно новым, методом исследования является метод измерения напряжения, наведенного в обмотках трансформатора при механическом воздействии на его бак (ООО «Снежинсктехсервис», г. Снежинск). Этот метод основан на использовании обратного магнитострикционного эффекта, имеющего место в магнитопроводе трансформатора. При изменении линейных размеров сердечника трансформатора происходит изменение его магнитного поля, результатом чего является наведение электродвижущей силы в обмотках, которая регистрируется прибором. Предложенный метод представляет информацию о состоянии только магнитопровода.

Методы тестового диагностирования во многих случаях позволяют успешно проводить диагностирование силовых трансформаторов. К общим недостаткам этих методов можно отнести низкую информативность и необходимость вывода трансформаторов из работы.

Ко второй группе относятся ***методы функционального диагностирования***. Они позволяют исследовать техническое состояние силовых трансформаторов в процессе эксплуатации, а также дают возможность проводить дистанционное диагностирование (что является положительным с точки зрения технической безопасности) и осуществлять оперативный контроль состояния трансформатора.

В настоящее время нашли применение следующие методы функционального диагностирования:

- метод обнаружения источника внутреннего газовыделения с помощью акустических датчиков;
- тепловизионный метод, основанный на применении современных тепловизорных систем, позволяющих получить тепловой обзор объекта исследования;
- метод выявления деформации и смещения обмоток силового трансформатора по параметрам нулевой последовательности нормального режима на основе измерения действующих значений и фаз тока в нейтрали, фазных токов и напряжений нулевой последовательности;
- метод диагностирования по вибропараметрам, основанный на качественной и количественной интерпретации вибрации поверхности бака как функции механического состояния обмоток и магнитопровода;
- метод определения остаточного ресурса изоляции;
- оптический метод, основанный на спектральном анализе твердой и жидкой изоляции.

В работах [73, 74] рассмотрен акустический метод, который позволяет обнаружить источник внутреннего газовыделения, обрыв шин заземления

активной части трансформатора с помощью акустических датчиков. Достоинством данного метода являются простота, а следовательно, и невысокая стоимость оборудования для диагностирования. К недостаткам можно отнести зависимость точности результатов исследования от внешних помех (шума). Кроме того, при использовании акустических датчиков можно определить лишь примерное местоположение дефекта. Судить о других дефектах силового трансформатора, не являющихся источником интенсивного звука, не представляется возможным.

Тепловой метод диагностирования, рассмотрен в работах Лапонова С. Н., Шишминцева В.В., Журавлева А.Н., Попова Г.В. и др. Суть теплового (тепловизионного) метода диагностирования заключается в дистанционной регистрации температурного поля на поверхности контролируемого оборудования измерительной аппаратурой, построении и анализе термограмм для обнаружения, классификации дефектов и принятия решения о дальнейшей эксплуатации оборудования. Наличие дефекта при таком диагностировании характеризуется анормальным изменением (как правило, повышением) температуры в дефектной зоне. В качестве средства измерения поверхностной температуры предусматривается использование тепловизора или инфракрасного сканера, регистрирующего инфракрасное излучение вдоль линии сканирования, положение которой контролируется на мониторе по видимому изображению объекта [74 - 80]. Существенным недостатком, накладывающим ограничения на использование этого метода для сельских трансформаторов, являются значительные финансовые затраты. При этом данный метод дает косвенное представление о состоянии активных частей трансформатора, так как они скрыты под толщей стенок бака и большим объемом трансформаторного масла.

В [81] рассматривается метод оценки состояния силового трансформатора по состоянию обмоток. Предлагается определять состояние обмоток по изменению их индуктивности, как наиболее чувствительного параметра к появлению деформаций обмоток в результате короткого замыкания . Информационно-измерительная система (ИИС) непрерывно контролирует состояние обмоток по отклонению индуктивности от базового значения. Программное обеспечение ИИС позволяет отключить трансформатор на четвертом периоде тока короткого замыкания, что позволяет уменьшить масштабы повреждения. Данный метод дает только количественную оценку состояния обмоток, а вся система имеет высокую стоимость и в условиях АПК экономически не выгодна.

Метод диагностирования по параметрам нулевой последовательности, рассмотренный в работах [82, 83], заключается в контроле состояния обмоток силового трансформатора путем проведения электрических измерений. Досто инство – оперативный контроль электрических параметров. К недостаткам относится низкая информативность, так как при определенных обстоятельствах

, деформации обмоток трансформатора могут не вызвать изменения параметров контроля.

В патенте [84] предлагается устройство контроля технического состоя ния силовых трансформаторов по току нагрузки в одной фазе, напряжению, температуре верхних слоёв масла и температуре окружающей среды. Данные с измерительных блоков поступают в блок обработки данных. Программное обеспечение позволяет оценить техническое состояние силового трансформатора в реальном времени путём сравнения полученных данных с номинальными значениями. На мониторе диспетчера появляются значения контролируемых параметров. В случае аварийных ситуаций с блока обработки данных поступает сигнал на отключение трансформатора. Но предложенное устройство не адаптировано для трансформаторов сельских потребительских подстанции, потому что в условиях неравномерной загрузки фаз трансформатора измерение силы тока нагрузки в одной фазе не дает полной информации о тепловом состоянии трансформатора.

Параметром диагностирования в устройстве, предложенном в [85], является скорость теплового износа изоляции трансформатора. Сигнал от измерительных преобразователей силы тока в фазах и температуры масла поступает в блок управления, где формируется выходной сигнал, пропорциональный скорости износа изоляции. Формирование сигнала базируется на усредненных значениях для данного класса трансформаторов. В устройстве не учтена реальная тепловая схема замещения силового трансформатора, что не дает точного представления о состоянии изоляции при неравномерной токовой нагрузке фаз.

В Таврической государственной агротехнической академии разработано устройство, учитывающее тепловой износ изоляции силовых трансформаторов [86, 87]. Оно содержит первичный измерительный преобразователь (ПИП) тем пературы, который преобразовывает температуру в напряжение по «восьмиградусному» правилу и счетчик импульсов, пропорциональных величине напряжения на выходе преобразователя. Для реализации данного устройства была применена математическая тепловая схема замещения трансформатора, что дает реальную картину состояния изоляции. К недостаткам данного устройства можно отнести то, что ПИП температуры устанавливается в обмотку, что вызывает затруднение с точки зрения технической безопасности. Предложенный счетчик импульсов реагирует только на повышение температуры обмоток, при ее снижении расход ресурса изоляции определяется как номинальный. Аналогичный способ контроля состояния силового трансформатора предложен в [88, 89].

Во Франции зарегистрирован патент устройства для непрерывного контроля состояния трансформатора по температуре обмотки фазы «В» [90]. Достоинством данного устройства является то, что оно позволяет кон тролировать состояние силового трансформатора в любой текущий момент

времени, а также воспроизвести параметры его состояния в любой момент, предшествовавший эксплуатации. Кроме того, оно может сигнализировать об аварийном состоянии трансформатора и принимать технические меры для его защиты. Для измерения температуры в обмотку устанавливаются оптоволоконные преобразователи, что вызывает затруднения для реализации данной системы в условиях АПК.

Метод диагностирования трансформаторов по вибропараметрам, предложенный в [91, 92], предназначен для определения распрессовки обмоток и магнитопровода силовых трансформаторов. Данный метод позволяет анализировать виброакустические колебания в узком диапазоне частот от 100 до 700 Гц. В результате анализа дискретные составляющие колебаний выбранного диапазона на частотах 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700 Гц принимаются как классификационные. Однако эти гармоники не всегда могут являться признаками различия состояния силового оборудования, так как они кратны частоте основной гармоники переменного тока промышленной сети 50 Гц. Так же для определения состояния трансформатора требуется сформировать паспорт признаков его состояния.

Предложенная в [92] система позволяет определять состояние масляной и бумажной изоляции силовых трансформаторов по оптическим излучениям. Излучения от места контроля передаются на спектрометр по световодному ка белю, который с одной стороны крепится в корпусе трансформатора. Анализ базовых спектрограмм позволяет определить природу излучения и его источник. Исследования проводят в области излучения с длинами волн 350 – 1200 *нм*, в этой области излучения слой трансформаторного масла на точность показаний прибора не влияет.

К третьей группе относятся методы ***комбинированного диагностирования***, которые позволяют осуществлять оперативный анализ текущего состояния силовых трансформаторов, производить обслуживание в тот момент, когда технические параметры или характеристики выходят за пределы заданных значений [28].

Производственно-внедренческая фирма «Вибро-Центр» [93] разработала систему TDM (Transformer Diagnostics Monitor), которая предназначена для мониторинга технического состояния силовых трансформаторов, диагностического контроля, поиска дефектов, планирования ремонтных и сервисных работ. Эта система позволяет анализировать параметры состояния основных подсистем трансформатора, оперативно создавать комплексное заключение о техническом состоянии трансформатора. Все технические средства системы TDM реализованы в виде единой интегрированной конструкции с использованием модульной системы. Всего в систему мониторинга входит семь модулей: модуль блока питания, основной модуль мониторинга, модуль контроля температур и управления системой охлаждения, модуль регистратора аварийных режимов, модуль контроля вводов и

сопротивления обмоток короткому замыканию; модуль регистрации частичных разрядов, модуль контроля и управления регулятором напряжения. Система TDM контролирует:

- температуру масла в верхней точке бака трансформатора;
- уровень масла в баке трансформатора;
- температуру и влажность окружающей среды;
- состояние элементов системы охлаждения (включение - отключение насосов и вентиляторов);
- режим работы системы охлаждения (ручной - автоматический);
- максимальную расчетную температуру обмотки трансформатора;
- наличие изменений формы обмоток после электродинамических воздействий;
- токи трех фаз трансформатора;
- напряжения трех фаз, которые определяются по токам проводимости вводов;
- контроль тангенса угла потерь вводов и величины емкости;
- давление на вводах (высокий - низкий порог);
- состояние газового реле;
- давление в баке трансформатора.

Данная система дает полную и точную картину технического состояния трансформатора.

В работах [94 - 96] разработана экспертная система диагностирования и мониторинга состояния силового трансформатора, которая осуществляет интеллектуальную поддержку мониторинга и сигнализацию предельных состоя ний и режимов трансформатора. Экспертная система позволяет осуществлять сбор информации на работающем трансформаторе, выдавать результаты ее об работки в удобной форме, передавать эту информацию в базу данных, ставить предварительный диагноз, принимать решения о дальнейших диагностических и технических операциях. В аппаратурную основу комплекса входят: инфракрасный термограф «ИРТИС-200», ультразвуковой дефектоскоп «ULTRA Probe 2000», хромотографический комплекс «МХ-ТМ», виброметр «Каркас +», персональный IBM-совместимый компьютер.

Использование системы мониторинга «Диагностика+», как отмечается в работах [97-100], позволяет применить новый подход к обслуживанию трансформаторов. Данная система производит непрерывный анализ текущего состояния оборудования, позволяет осуществить обслуживание при отклонении технических параметров или характеристик оборудования от заданных значений. Это полностью соответствует мировым тенденциям

перехода от плановой системы обслуживания к предупредительной системе [1, 16] . Этот принцип позволяет исключить аварийные ситуации и повысить надежность работы, реально увеличить срок службы оборудования и снизить текущие и эксплуатационные расходы. Система «Диагностика +» позволяет получать информацию, как о текущих состояниях, так и о динамике изменения эксплуатационных характеристик (температуры различных частей трансформатора, перегрузки отдельных устройств и механизмов). Получая эту информацию в режиме реального времени, можно правильно оценить техническое состояние трансформатора и провести своевременные профилактические действия. Система «Диагностика +» представляет собой пакет программ для мониторинга и диагностики силовых трансформаторов в реальном времени. Основные направления её применения:

- осуществление контроля и регистрации текущих и предельных значений температур верхних слоев масла и окружающего воздуха, рабочих токов трансформатора, частичных разрядов, давления во вводах;
- регистрация информации о нормальной, предаварийной и аварийной работе;
- накопление данных о параметрах работы силовых трансформаторов для дальнейшего анализа;
- выдача рекомендаций оперативному персоналу;
- оптимизация режима работы трансформатора и на этой основе повышение надежности его работы и срока службы.

Система мониторинга и диагностики построена как единая интегрированная иерархическая (состоящая из верхнего и нижнего уровней) система, работающая в режиме реального времени, оснащенная средствами сбора, обработки, отображения, регистрации, анализа, хранения и передачи информации. В данной системе контролируется 84 параметра, которые характеризуют техническое состояние трансформатора и на основании ряда частных диагнозов позволяет оценить состояние силового трансформатора, прогнозировать развития дефектов и остаточный срок службы. Большое количество параметров, которые контролируются данной системой, экономически не обоснованы применительно к трансформаторам сельских потребительских подстанций.

Преимуществом комбинированного диагностирования является возможность выбора таких контролируемых параметров, которые позволяют разработать недорогостоящее и надежное устройство, выполнить его в виде отдельных модулей (блоков) и в конкретных случаях применять те из них, которые реагируют на типичные для данного силового трансформатора аварийные ситуации [101].

Для силовых трансформаторов, работающих в сложных условиях сельскохозяйственного производства, наиболее приемлемо комбинированное

диагностирующее устройство, включающее в себя температурные блоки, блоки для измерения токов в фазах трансформатора, блок формирования выходного сигнала. Для эффективной работы системы непрерывного контроля потребительских трансформаторов необходимо предусмотреть способ передачи данных на диспетчерский пункт районных электрических сетей.

Выводы

1. Анализ устройств и технических средств функционального диагностирования показал, что тепловые модели, на базе которых спроектированы эти устройства, не предусматривают контроль температуры в каждой фазе трансформатора, что снижает эффективность диагностирования при эксплуатации потребительских трансформаторов в условиях АПК.
2. Существующие методы и технические средства комплексного диагностирования рассчитаны для применения в трансформаторах мощностью 200 МВА и выше, поэтому их техническая реализация в силовых трансформаторах сельских потребительских подстанций затруднена по причине значительных капитальных вложений и низкой экономической эффективности.
3. Технические средства непосредственного контроля температуры обмоток силовых трансформаторов, эксплуатируемых в сельских потребительских подстанциях, требуют для их монтажа (установки) вывода трансформатора из работы, нарушения и последующего восстановления изоляционной конструкции, что приводит к сокращению её ресурса и снижению ресурса трансформатора в целом.

Основываясь на материале, изложенном выше, сформулированы гипотеза, цель и задачи исследований.

Гипотеза: если в качестве параметров функционального диагностирования принять температуру верхних слоев трансформаторного масла и кратности сил токов по фазам, то можно получить объективную информацию о наиболее нагретой точке обмоток силового трансформатора

Цель исследования: повышение эксплуатационных показателей роботы силовых трансформаторов сельских потребительских подстанций путем объективного функционального их диагностирования на базе математической модели процессов нагрева трансформаторов.

Задачи исследования:

1. Исследовать процесс нагрева силового трансформатора при симметричной токовой перегрузке.
2. Исследовать процесс нагрева силового трансформатора при несимметричной токовой перегрузке.

3. Исследовать процесс нагрева силового трансформатора под действием сверхтоков.
4. Разработать диагностическую модель функционального диагностирования силового трансформатора.
5. Разработать устройство функционального диагностирования силового трансформатора.

Объект исследования – процессы нагрева и теплового расхода ресурса изоляции силового трансформатора в эксплуатационных условиях.

Предмет исследования – закономерности процессов нагрева и теплового расхода ресурса изоляции силового трансформатора под действием эксплуатационных факторов.

Результаты исследований, которые приведены в данном разделе, опубликованы в статье [15].

Р А З Д Е Л 2
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАГРЕВА СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА КАК ГЕТЕРОГЕННОЙ СИСТЕМЫ ПРИ СИММЕТРИЧНОЙ ПЕРЕГРУЗКЕ

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРАХ В ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ УСЛОВИЯХ

2.1.1 Аналитическое исследование процесса нагрева силового трансформатора как гетерогенной системы

Проведем аналитическое исследование процесса нагрева силового трансформатора.

Во время работы силового трансформатора в его обмотках и магнитопроводе возникают потери энергии, связанные с прохождением токов по обмоткам и магнитного потока по магнитопроводу. Эти потери энергии выделяются в ви де тепла и нагревают обмотки и магнитопровод трансформатора. Масло является охлаждающей средой для обмоток и магнитопровода. Между магнитопроводом и обмотками, а также между этими элементами и воздухом происходит постоянный теплообмен посредством масла. Температура масла в процессе нагревания изменяется.

Таким образом, трансформатор в тепловом отношении можно рассматривать как гетерогенную систему, состоящую из трех гомогенных (однородных) тел [9, 21Бод]:

1) *обмоток*;

2) *магнитопровода*;

3) *масла*.

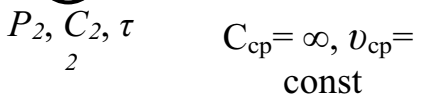
Для дальнейшего аналитического исследования принимаем, что теплоёмкости обмоток, магнитопровода и масла неизменны (не зависят от изменения температуры данного тела), теплоемкость охлаждающей среды бесконечно большая, температура окружающей среды постоянная величина, эквивалентные тепловые проводимости между телами не изменяются при изменении температуры тела.

Анализ тепловых процессов проводим по средним значениям превыше ний температур соответствующих тел над температурой окружающей среды, под которыми понимается превышения температур над температурой окружающей среды в средних по высоте горизонтальных сечениях обмоток, магнитопровода и масла.

Тепловая схема замещения силового трансформатора для указанного варианта представлена на рис.2.1.

На тепловой схеме замещения приведены условные обозначения:

- потери активной мощности в обмотках, в магнитопроводе, *Вт*;



- теплоемкости обмоток, магнитопровода, масла, *Дж/ °С*;

- превышения температур обмоток, магнитопровода, масла над температурой окружающей среды, *°С*;

- тепловые проводимости между обмотками и маслом, между магнитопроводом и маслом, *Вт/ °С*;

- теплоемкость окружающей среды, *Дж/ °С;*

- температура окружающей среды, *°С*;

-тепловая проводимость между маслом и окружающей средой, В *т/ °С*.

Рисунок 2.1. Тепловая схема замещения силового трансформатора как гетерогенной системы.

На тепловой схеме замещения приведены условные обозначения:

- потери активной мощности соответственно в обмотках, в магнитопроводе силового трансформатора, Вт;

- теплоемкости соответственно обмоток, магнитопровода, масла силового трансформатора, Дж/ оС;

- средние значения превышений температур соответственно обмоток, магнитопровода, масла над температурой окружающей среды, оС;

- эквивалентная тепловая проводимость между обмотками и магнитопроводом силового трансформатора, Вт/ оС;

- эквивалентная тепловая проводимость между обмотками и маслом силового трансформатора, Вт/ оС;

- эквивалентная тепловая проводимость между магнитопроводом и маслом силового трансформатора, Вт/ оС;
- эквивалентная тепловая проводимость между маслом и окружающей средой, Вт/ оС;
- теплоемкость окружающей среды, Дж/ оС;
- температура окружающей среды, оС.

Потери активной мощности в обмотках трансформатора при симметричной перегрузке и температуре, равной температуре окружающей среды, определяются по формуле:

, (2.1)

где r0 - эквивалентное активное сопротивление фазы трансформатора при температуре окружающей среды, Ом;
I - сила тока, А.

Кратность силы тока в фазе равна:

, (2.2)

где I - сила тока в фазе силового трансформатора, А;
IН - номинальная сила тока в фазе силового трансформатора, А.

С учетом вышесказанного составляем систему дифференциальных уравнений теплового баланса трансформатора для каждого тела – обмотки (тело 1), магнитопровода (тело 2) и масла (тело 3):

.3

.3

(2.3)

.3

,

где , - энергии, расходуемые на нагрев соответственно обмоток, магнитопровода, масла, Дж;

- энергия, которая выделяется в обмотках, Дж;

- энергия, которая выделяется в магнитопроводе, Дж;

- энергия, которая передается от тела 1 к телу 2, Дж;

- энергия, которая передается от тела 1 к телу 3, Дж;

- энергия, которая передается от тела 2 к телу 3, Дж;

- энергия, которая передается от тела 3 окружающей среде, Дж.

Преобразуем систему уравнений (2.3) к следующему виду:

EMBED Equation.3 ;

(2.4)

.

Исследование тепловых процессов в силовом трансформаторе выполним методом операторного решения дифференциальных уравнений. Перепишем дифференциальные уравнения системы (2.4) в операторной форме:

; (2.5)

.

Решим систему дифференциальных уравнений (2.5) относительно

, в матричной форме. Определим превышение температуры обмотки над температурой окружающей среды:

. (2.6)

Для дальнейшего решения (2.6) введем обозначения:

;

(2.7)

L =

; (2.8)

EMBED Equation.3

; (2.9)

; (2.10)

; (2.11)

; (2.12)

+

+ . (2.13)

В результате получим:

. (2.14)

Определим превышение температуры магнитопровода над температурой окружающей среды в операторной форме:

. (2.15)

Для дальнейшего решения (2.15) введем обозначения:

.3 ;
(2.16)

.3

; (2.17)

+

+ .3

.3 .
(2.18)

Применив введенные обозначения (2.7 – 2.10) и (2.16 – 2.18) получим:

. (2.
191)

Определим превышение температуры масла над температурой окружающей среды в операторной форме:

. (2.20)

Для дальнейшего решения (2.20) введем обозначения:

; (2.21)

EMBED Equation.3

. (2.22)

Применив введенные обозначения (2.7 – 2.10) и (2.21 – 2.22) получим:

Составим дифференциальные уравнения теплового баланса для каждого тела – обмотки (тело1), магнитопровода (тело 2) и масла (тело 3):

$$\left.\begin{array}{l} dt = \quad .3 \\ .3 \qquad\qquad .3 \\ (1) \qquad\qquad\qquad .3 \end{array}\right\}$$

где , - энергии, расходуемые на нагрев обмотки, магнитопровода, масла, *Дж*;

- энергии, которые выделяются в обмотке, магнитопроводе, *Дж*;

- энергия, которая передается от тела 1 к телу 3, *Дж*;

- энергия, которая передается от тела 2 к телу 3, *Дж*;

- энергия, которая передается от тела 3 окружающей среде, *Дж*.

Преобразуем систему уравнений (1) к следующему виду:

(2)

;

;

;

Перепишем дифференциальные уравнения системы (2) в операторной форме:

(3)

;

;

;

Решаем систему уравнений (3) относительно , .

Найдем общий определитель :

=

= ,

(4)

где K, L, T, R - коэффициенты.

$K=C_1C_2C_3$;

(5)

$L=$;

(6)

+ ;

(7)

(8)

Найдем определитель :

= ,

(9)

где L_1, T_1, R_1 - коэффициенты.

;

(10)

;

(11)

+ ;

(12)

Найдем определитель :

=

= ,

(13)

где L_2, T_2, R_2 - коэффициенты.

.3 ;

(14)

.3

; (15

)

+ .3

.3 ; (16)

Найдем определитель :

= ,

(17)

где T_3, R_3 - коэффициенты.

;

(18)

;

(19)

. (2.232)

Для дальнейшего решения Ввведем дополнительные обозначения:

; (2.24)

; (2.2425)

; (2.2526)

. (2.276)

Перепишем уравнения (2.14), (2.19), (2.23) с учетом введенных дополнительных обозначений:

; (2.2728)

; (2.2829)

. (2.2930)

По теореме разложения для случая, когда уравнение F(p) = 0 имеет три различных и не равных нулю корня p1, p2, p3 получим уравнения превышения температур обмоток , магнитопровода и масла над температурой окружающей среды [105]:

; (2.301)

; (2.321)

, (2.323)

где (2.34)

Перепишем уравнения (2.301), (2.312), (2.323) с учетом дополнительных обозначений (2.234), (2.2425), (2.2625), (2.276) в следующем виде:

+ ; (2.3335)

+ ; (2.3634)

+ . (2.37)

Превышения температур тел 1, 2 и 3 над температурой окружающей среды, корни характеристического уравнения зависят от коэффициентов K, L , T, R, L1, T1, R1, L2, T2, R2, L3, T3, R3. Эти коэффициенты определяются конструктивными постоянными параметрами силового трансформатора (теплоемкостями активных частей и тепловыми проводимостями между этими активными частями) и переменными параметрами (величиной активных потерь в обмотках и магнитопроводе), которые зависят от кратности силы тока.

При аналитическом исследовании процесса нагрева силового трансформатора вызывает затруднение определение эквивалентных тепловых проводимостей между обмотками и магнитопроводом ( ), обмотками и маслом ( ), магнитопроводом и маслом ( ), маслом и окружающей средой ( ). Поэтому разработаем методику их определения.

2.2. Методика определения эквивалентных тепловых проводимостей в силовом трансформаторе

Тепловые проводимости зависят от геометрических размеров активных частей трансформатора, удельных теплопроводностей материалов, из которых изготовлены эти части, от температур граничных поверхностей, условий теплообмена между активными частями трансформатора и температуры окружающей среды [31, 32, 37, 38]. Все это приводит к затруднению в их определении для трансформаторов, находящихся в эксплуатации.

Ввиду относительно малого изменения удельной теплопроводности электротехнических проводниковых и конструктивных материалов, из которых изготовлены активные части трансформатора, с изменением температуры в заданных пределах, можно принять усредненные постоянные значения эквивалентных тепловых проводимостей между активными частями силового трансформатора при номинальных значениях их температур [37, 38].

С целью определения эквивалентных тепловых проводимостей ,

(рис. 2.1) проанализируем систему уравнений (2.3).

При установившемся номинальном режиме работы трансформатора и симметричной нагрузке потери активной мощности в обмотках и магнитопроводе равны соответственно значениям и , кратность силы тока . Превышение температуры обмоток над температурой окружающей среды равно значению , превышение температуры магнитопровода над

температурой окружающей среды равно значению , превышение температуры масла над температурой окружающей среды тоже равно

значению , а , = 0.

Система дифференциальных уравнений (2.3) примет вид:

(2.38)

где - потери активной мощности соответственно в обмотках, маг- нитопроводе в установившемся режиме работы трансформатора, Вт;

- превышение температуры обмоток в установившемся режиме работы трансформатора, оС;

- превышение температуры магнитопровода в установившемся режиме работы трансформатора, оС ;

- превышение температуры масла в установившемся режиме работы трансформатора, оС.

Для составления уравнений с целью определения эквивалентных

тепловых проводимостей , рассмотрим опыты холостого хода и короткого замыкания.

Рассмотрим опыт холостого хода: к обмоткам низшего напряжения при разомкнутых обмотках высшего напряжения подводят номинальное симметричное напряжение при номинальной частоте. При этом потери активной мощности в обмотках очень малы, принято считать что , тогда мощность холостого хода определяется номинальными потерями активной мощности в магнитопроводе ( ).

Система уравнений теплового баланса (2.3) в установившемся режиме примет вид:

(2.39)

где - потери активной мощности в магнитопроводе в опыте

холостого хода, Вт;

- превышение температуры обмоток в опыте холостого хода, оС;
- превышение температуры магнитопровода в опыте холостого хода, оС;
- превышение температуры масла в опыте холостого хода, оС.

Рассмотрим опыт короткого замыкания: обмотки низшего напряжения замкнуты накоротко, а к зажимам высокой стороны подведено напряжение равное 5-10% от номинального значения, силы токов в обмотках равны номинальным значениям. При этом потери активной мощности в магнитопроводе очень малы, принимаем, что , тогда активная мощность короткого замыкания определяется номинальными потерями активной мощности в обмотках трансформатора ( ).

В результате система уравнений теплового баланса (2.3) в установившемся режиме примет вид:

EMBED Equation.3 (2.40)

где - потери активной мощности в обмотках в опыте короткого замыкания, Вт;

- превышение температуры обмоток в опыте короткого замыкания, оС;
- превышение температуры магнитопровода в опыте короткого замыкания, оС;
- превышение температуры масла в опыте короткого замыкания, оС.

Для определения эквивалентных тепловых проводимостей

составим систему четырех уравнений, используя уравнения теплового баланса для опыта холостого хода и опыта короткого замыкания (2.39), (2.40). Система будет иметь вид:

(2.41)

Решим полученную систему уравнений относительно

в матричной форме. Определим эквивалентную тепловую проводимость между обмотками и магнитопроводом ( ):

(2.42)

Определим эквивалентную тепловую проводимость между обмотками и маслом ( ):

(2.43)

Определим эквивалентную тепловую проводимость между магнитопроводом и маслом ( ):

(2.44)

Определим эквивалентную тепловую проводимость между маслом и окружающей средой ( ):

EMBED

Equation.3 (2.45)

Следовательно, эквивалентные тепловые проводимости между обмотками и магнитопроводом ( ), обмотками и маслом ( ), магнитопроводом и маслом ( ), маслом и окружающей средой ( ) можно определить, зная номинальные значения потерь активных мощностей в обмотках и магнитопроводе, значения превышений температур обмоток,

магнитопровода и масла над температурой окружающей среды в опытах холостого хода и короткого замыкания.

2.3. Экспериментальные исследования эквивалентных тепловых проводимостей в силовом трансформаторе

2.3.1. Программа экспериментальных исследований эквивалентных тепловых проводимостей в силовом трансформаторе

Задача экспериментальных исследований заключалась в определении установившихся превышений температур обмоток ( ), магнитопровода ( ), масла ( ) над температурой окружающей среды, а также потерь активных мощностей в обмотках и магнитопроводе в опытах холостого хода и короткого замыкания.

Экспериментальное исследование эквивалентных тепловых проводимостей проводилось по следующей программе:

1. Опыт холостого хода.
2. Опыт короткого замыкания.
3. Определение эквивалентных тепловых проводимостей по экспериментальным данным.

Для исследования был выбран силовой трансформатор типа ТМ-160/10, имеющий следующие паспортные и каталожные данные:

- номинальное напряжение высокой стороны U1H 10 кВ;
- номинальное напряжение низкой стороны U2H
- полная номинальная мощность SH 160 кВА;
- номинальный ток ;
- ток холостого хода ;
- напряжение короткого замыкания ;
- масса обмотки m1111 кг;
- масса магнитопровода m2530 кг;
- масса масла m3330 кг.

Принципиальные электрические схемы для проведения экспериментального исследования представлены на рис.2.2 и на рис.2.3, общий вид установки показан на рис.2.4.

Экспериментальная установка состоит из силового трансформатора TV1, индукционного регулятора напряжения TV2, комплекта электроизмерительных приборов P, многоканального первичного преобразователя температуры (для измерения температур обмоток и магнитопровода) и двух термометров (для измерения температур масла и окружающей среды).

В процессе исследований проводили измерения следующих величин:

- линейных напряжений на зажимах трансформатора в опытах холостого хода и короткого замыкания - вольтметром прибора К505 (класс точности 0, 5);

- активных мощностей в фазах трансформатора в опытах холостого хода и короткого замыкания – ваттметром прибора К505 (класс точности 0,5);
- фазных токов в опыте короткого замыкания - амперметром прибора К505 (класс точности 0,5);
- температуры окружающей среды - термометром ТУЭ – 48, который располагался на высоте 1,5 м и на расстоянии от трансформатора 3 м;
- температур обмоток, магнитопровода в опытах холостого хода и короткого замыкания – первичным преобразователем температуры ТМ–12 (погрешность 0,1 при измерении температуры в диапазоне от 0 оС до 100 оС), чувствительные элементы преобразователя устанавливались в соответствии с требованиями [106];
- температуры верхних слоев масла в опытах холостого хода и короткого замыкания – термометром ТУЭ – 48, который устанавливался в соответствии с требованиями [106].

Рисунок 2.2. Схема электрическая принципиальная для проведения опыта холостого хода.

Рисунок 2.3. Схема электрическая принципиальная для проведения опыта короткого замыкания.

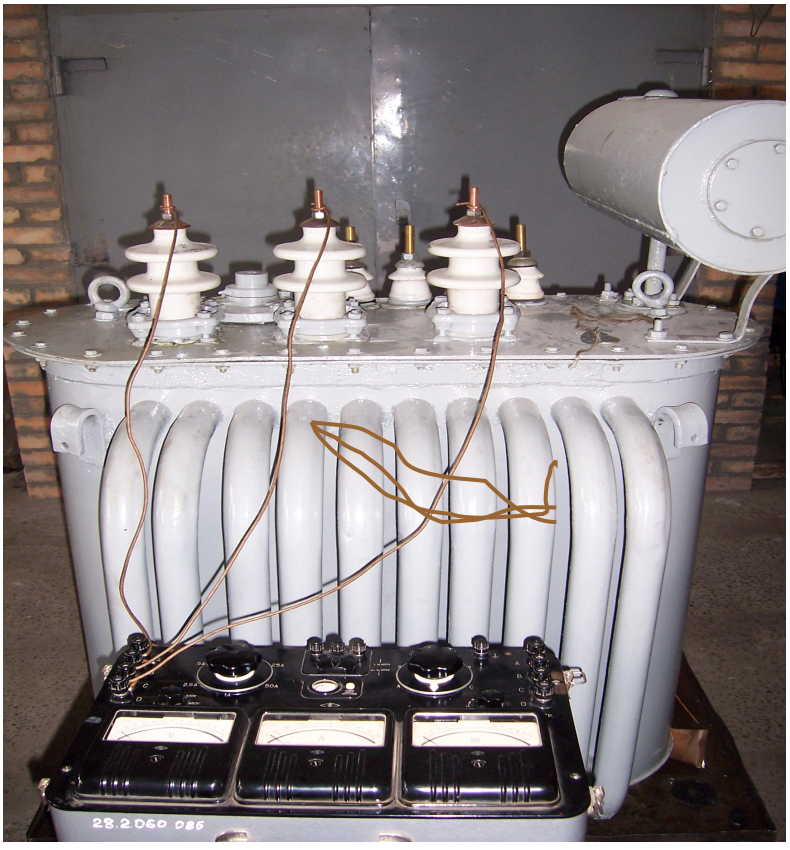


Рисунок 2.4. Общий вид экспериментальной установки для опытов холостого хода и короткого замыкания.

2.3.2 Опыт холостого хода

Опыт холостого хода проводился по стандартной методике, приведенной в [106]. Принципиальная электрическая схема установки для опыта холостого хода представлена на (рис.2.2.). Опыт проводился при номинальном симметричном напряжении номинальной частоты. Испытания продолжались до достижения установившейся температуры верхних слоев масла. Измерялись следующие величины: активная мощность в фазах трансформатора (РХХ), температура верхних слоев масла ( ), установившиеся температуры обмоток ( ) и магнитопровода ( ), температура окружающей среды ( ). Для уменьшения влияния случайных помех выполнялось пять независимых измерений. Результаты опытов холостого хода приведены в таблице А.1 приложения А. Статистическая обработка результатов измерений (которая выполнялась по методике, изложенной в [107 – 111]) осуществлялась с помощью табличного редактора «Microsoft Excel», входящего в пакет прикладных программ «Microsoft Office». Итоговые результаты приведены в таблице 2.1. В таблице обозначено следующее:

- среднее арифметическое значение величины (Аср);
- абсолютная погрешность измерения величины ( ), равная трёхкратному среднеквадратическому отклонению ( );
- минимальное значение величины (Amin);
- максимальное значение величины (Amax);
- относительная погрешность измерения величины ( ).

Таблица 2.1.

Результаты опыта холостого хода

Величина	Аср		Amin	Amax	, %
Р.хх, Вт	565	0,1581	564,8419	565,1581	0,046
, оС	27,26	0,0032	27,2568	27,2632	0,146
, оС	32,49	0,0132	32,4768	32,5032	0,062
, оС	25,64	0,0451	25,5950	25,6851	0,234
, оС	20	0,0211	19,9791	20,0211	0,2

2.3.3 Опыт короткого замыкания

Опыт короткого замыкания проводился по стандартной методике, приведенной в [106]. Принципиальная электрическая схема установки для опыта короткого замыкания представлена на (рис.2.3). Опыт проводился при номинальном токе (ІК31Н). Испытания продолжались до достижения устано вившейся температуры верхних слоев масла. Измерялись следующие

величины: активная мощность потребляемая трансформатором (РКЗ), температура верхних слоев масла ( ), установившиеся температуры обмоток ( ) и магнитопровода ( ), температура окружающей среды ( ). Для уменьшения влияния случайных помех выполнялось пять независимых измерений. Результаты опытов короткого замыкания приведены в таблице А.1 приложения А.

Статистическая обработка результатов измерений (которая выполнялась по методике, изложенной в [107 – 111]) осуществлялась с помощью табличного редактора «Microsoft Excel», входящего в пакет прикладных программ «Microsoft Office». Итоговые результаты приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2

Результаты опыта короткого замыкания

Величина	Аср		Amin	Amax	, %
Р.кз, Вт	2650	0,2898	2649,6102	2650,2898	0,016
, оС	68,86	0,0211	68,8391	68,8812	0,058
, оС	59,06	0,0662	58,9942	59,1261	0,203
, оС	51,5	0,0640	51,4361	51,5642	0,233
, оС	25	0,0209	24,9791	25,0209	0,16

2.3.4 Определение эквивалентных тепловых проводимостей

По экспериментальным данным определим установившиеся превышения температур обмотки, магнитопровода и масла над температурой окружающей среды ( ) в опытах холостого хода и короткого замыкания по формуле:

, (2.46)

где - превышение температуры тела над температурой окружающей среды в соответствующем опыте, оС;

- установившаяся температура тела, измеренная в соответствующем опыте, оС;

- температура окружающей среды в соответствующем опыте, оС.

Подставив полученные значения превышений температур обмоток, магнитопровода и масла, для соответствующих опытов, в формулы (2.42), (2.43), (2.44) и (2.45) получим значения эквивалентных тепловых проводимостей.

Результаты расчетов шести независимых наблюдений в каждом опыте приведены в таблице А.2, приложения А. Статистическая обработка результатов расчета эквивалентных тепловых проводимостей для каждого опыта выполнялась по методике, изложенной в [107 - 111], с помощью

табличного редактора «Microsoft Excel», входящего в пакет прикладных программ «Microsoft Office». Итоговые результаты приведены в таблице 2.3 .

Таблица 2.3

Результаты расчетов превышений температур тел над температурой окружающей среды и эквивалентных тепловых проводимостей по опытам холостого хода и короткого замыкания для трансформатора ТМ-160/10

Величина	Acp		Amin	Amax	, %
, oC	7,26	0,0093	7,2507	7,2693	0,275
, oC	12,49	0,0093	12,4807	12,4993	0,16
, oC	5,64	0,0579	5,5821	5,6979	1,95
, oC	43,86	0,0093	43,8507	43,8693	0,045
, oC	34,06	0,051	34,009	34,111	0,293
, oC	26,5	0,0483	26,4517	26,5483	0,452
, Вт/ oC	40,1	1,248	38,853	41,348	5,81
, Вт/ oC	130	0,636	129,364	130,636	0,876
, Вт/ oC	51,99	1,3053	50,6847	53,2953	4,81
, Вт/ oC	100	0,9435	99,0565	100,9435	0,91

Можно сделать вывод, что зная номинальные потери активной мощности и установившиеся значения превышений температур обмоток, магнитопровода и масла над температурой окружающей среды в опытах холостого хода и короткого замыкания, можно рассчитать эквивалентные теп ловые проводимости между активными частями силового трансформатора. Справедливость данного метода проверим при исследовании закономерностей процесса нагрева обмоток, магнитопровода и масла при симметричной перегрузке силового трансформатора.

(35)

Превышения температур тел 1, 2 и 3 над температурой окружающей среды зависят от коэффициентов K, L, T, R, L_1,T_1, R_1, L_2, T_2 , R_2, L_3, T_3, R3, которые остаются постоянными в процессе эксплуатации . Эти коэффициенты определяются конструкцией трансформатора (теплоемкостями и тепловыми проводимостями тел) и величиной активных потерь в нем.

Из уравнений (33),(34),(35) следует, что кривая нагрева отдельного тела системы трех тел состоит из сложения трех экспонент. Экспоненты

– слагаемые для каждого из тел – имеют одни и те же постоянные времени. Все тела системы достигают установившихся превышений температуры за одинаковое время.

Постоянные времени системы, состоящей из трех тел, определяются как корни уравнения :

.

(36)

Введем дополнительные обозначения:

; ; .

Тогда уравнение (36) имеет вид:

.

(37)

Сделав замену , получим приведенное уравнение:

.

(38)

После преобразования получим уравнение вида:

.

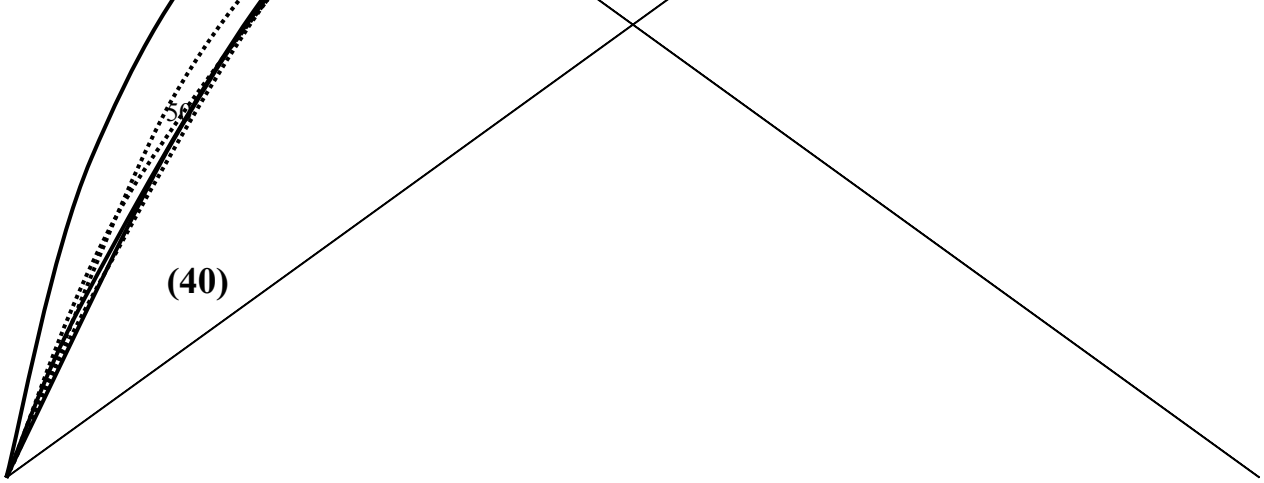
Введем дополнительные обозначения:

; .3 .

.

(39)

Корни уравнения (39) определяются в зависимости от знака *m* и *D*. В случае если и корни определяются по формулам:



(41) 2.4 Исследование закономерностей процесса нагрева обмоток, магнитопровода и масла силового трансформатора

Рассмотрим процесс нагрева обмоток, магнитопровода и масла при симметричной перегрузке силового трансформатора, начиная с холодного состояния. Принимаем, что в начальный момент времени (при t = 0) температура всех тел равна температуре окружающей среды, фазы трансформатора подключены на номинальное напряжение с номинальной частотой. Исследование кривых нагрева обмоток, магнитопровода и масла проведем на примере силового трансформатора типа ТМ –160/10.

Алгоритм расчета кривых нагрева для данного трансформатора при кратности силы тока нагрузки kложении А.3, данные расчета в таблице А.3.

В результате получили уравнения нагрева обмоток ( ), магнитопровода ( ), масла ( ):

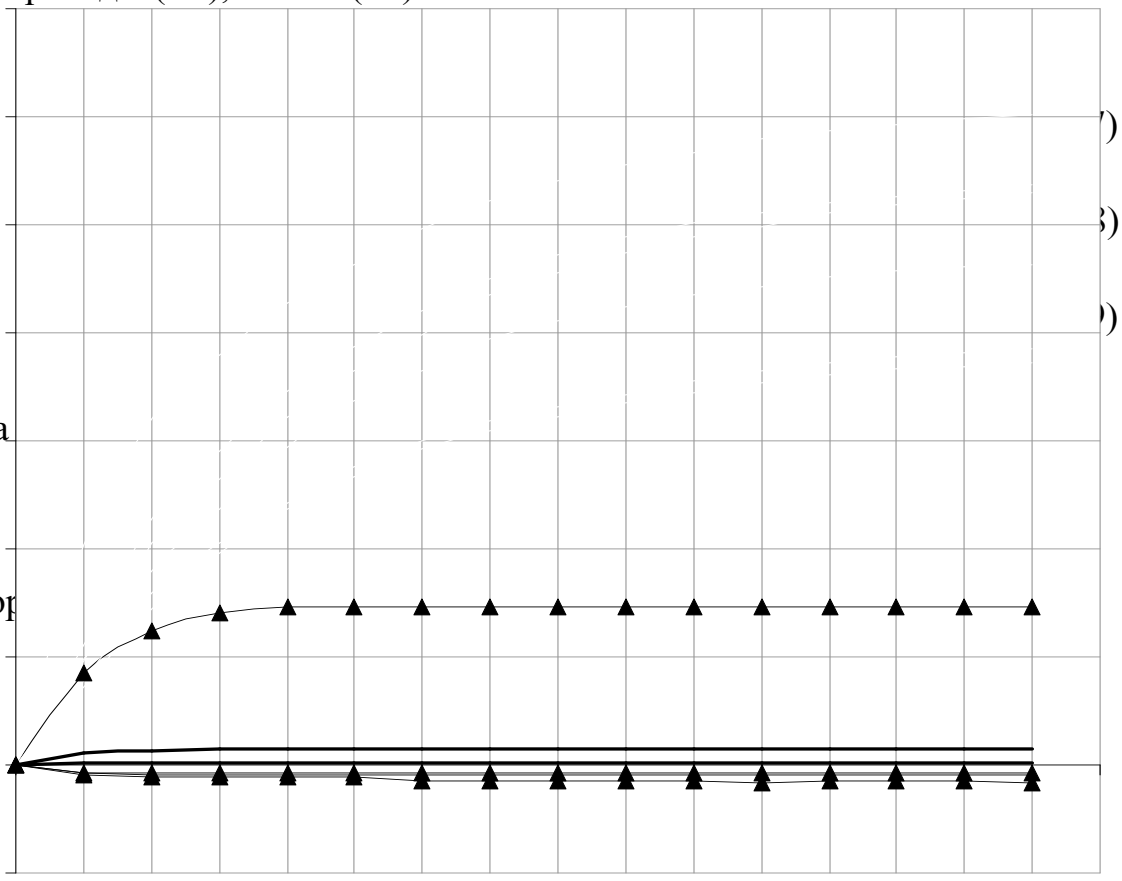


Рисунок 2.5. Зависимости , ,

, и

для исследуемого трансформатора при k

Из анализа уравнений (2.35), (2.36), (2.37), (2.47), (2.48), (2.49) следует, что кривые нагрева обмоток, магнитопровода и масла получаются в результате сложения трех экспонент, каждая парциальная составляющая характеризуется установившимся значением и постоянной времени нагрева. Парциальные составляющие с «большими» постоянными времени нагрева ( ) определяют продолжительность теплового процесса. Экспоненты с «малыми» постоянными времени нагрева ( ) влияют на форму кривых нагрева тел только на начальном этапе нагрева.

Перепишем уравнения нагрева для обмоток, магнитопровода и масла в следующем виде:

, (2 .50)

где - установившиеся значения парциальных превышений температуры обмоток над температурой окружающей среды, оС;

- парциальные постоянные времени нагрева обмоток, с;

t - текущее время, с.

, (2.51)

где - установившиеся значения парциальных превышений температуры магнитопровода над температурой окружающей среды, оС.

- парциальные постоянные времени нагрева магнитопровода, с.

, (2.52)

где - установившиеся значения парциальных составляющих превышений температуры масла над температурой окружающей среды, оС.

- парциальные постоянные времени нагрева масла, с.

Применительно к нашему примеру, уравнения (2.50), (2.51), (2.52) можно записать в следующем виде:

(2.53)

(2.54)

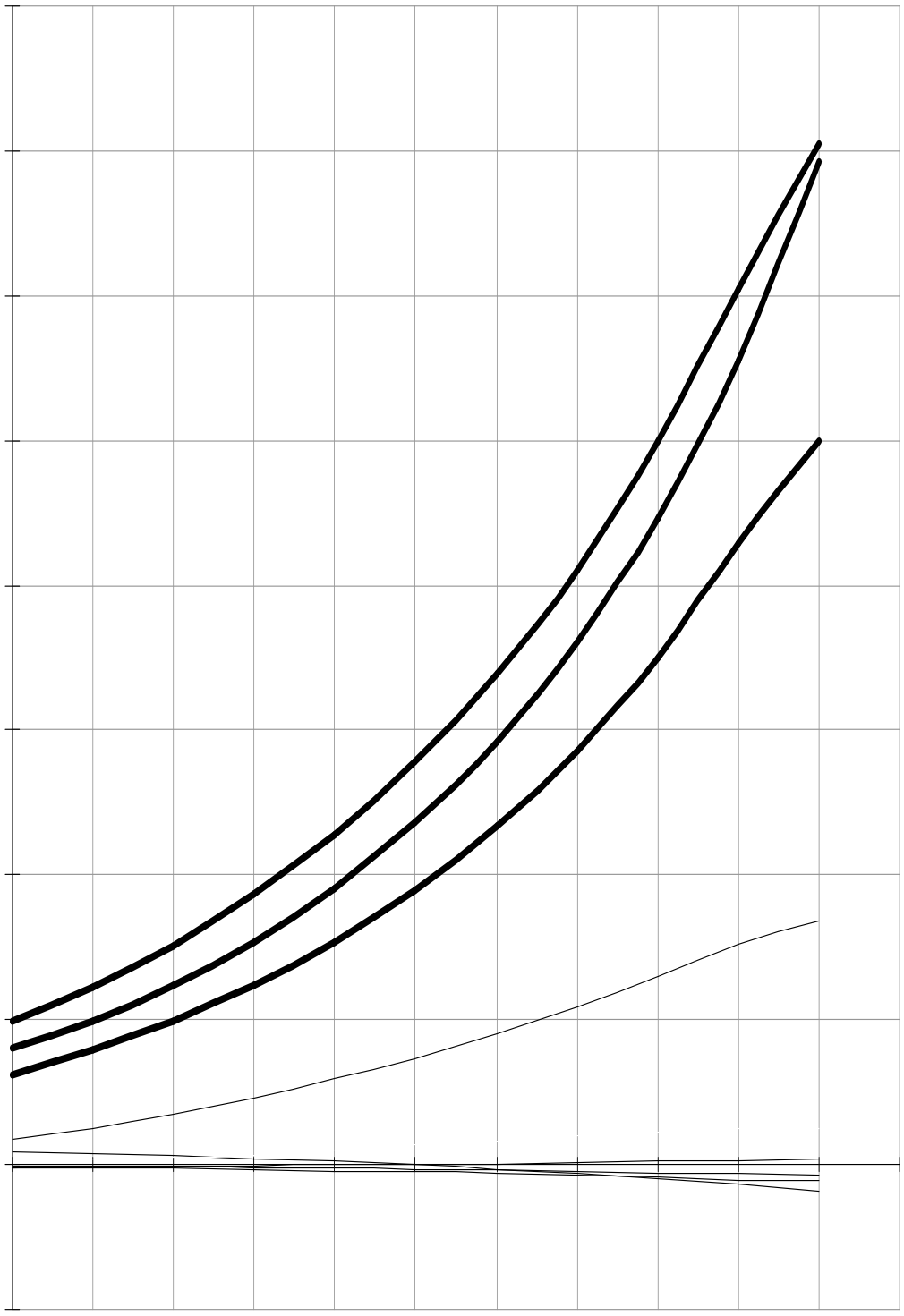
. (2.55)

Парциальные составляющие установившихся превышений температур зависят от теплоемкостей активных частей силового трансформатора (С1, С2, С3) , тепловых проводимостей ( ), номинальных значений потерь активной мощности в обмотках и магнитопроводе ( ), которые являются постоянными величинами для конкретного типа трансформатора. Переменной величиной, от которой зависят парциальные составляющие превышений температуры обмоток, магнитопровода, масла и парциальные постоянные времени нагрева этих тел, является кратность силы тока (k).

Проведем исследование изменения парциальных составляющих установившихся превышений температур обмоток, магнитопровода и масла при различных значениях кратности силы тока.

Алгоритм расчета приведен в приложении А.4, результаты расчетов в таблице А.4. На рисунке 2.6 представлены кривые изменения установившихся парциальных составляющих превышений температур обмоток, магнитопровода и масла при различных значениях кратности силы тока (k0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0; 1,1; 1,2; 1,3; 1,4; 1,5).

Анализируя графические зависимости (рис.2.6.), можно сделать вывод, что значения установившихся парциальных составляющих превышений температур , очень малы по величине (меньше одного градуса) и с



увеличением кратности силы тока изменяются незначительно,

установившиеся значения парциальных составляющих ,

наступают достаточно быстро поэтому, уравнения нагрева обмоток, магнитопровода и масла можно представить в следующем виде:

; (2.56)

; (2.57)

. (2.58)

После преобразования получим

; (2.59)

; (2.60)

. (2.61)

Для проверки справедливости полученных уравнений рассмотрим процесс нагрева обмоток, магнитопровода и масла при перегрузке (kового трансформатора ТМ - 160 /10. Для данного режима рассчитаем значения превышений температур обмоток, магнитопровода и масла над темпера турой окружающей среды по уравнениям (2.59), (2.60), (2.61) и сравним их с данными (, ,) полученными при расчете по уравнениям (2.35), (2.36), (2.37). Результаты расчетов представлены в таблице 2.4.

Для нашего примера уравнения (2.59), (2.60), (2.61) имеют вид:

; (2.62)

; (2.63)

. (2.64)

Таблица 2.4

Результаты расчетов превышений температур обмоток, магнитопровода и масла для силового трансформатора ТМ – 160/10 при k

t									
c	oC	oC	%	oC	oC	%	oC	oC	%
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1108	25,92	26,09	0,65	6,49	6,65	2,46	4,94	5,19	3,84
2216	31,96	31,93	0,094	13,13	13,21	0,61	9,83	10,16	3,28
3324	36,17	36,16	0,027	18,16	17,97	1,04	13,31	13,55	1,81
4432	40,92	40,91	0,024	23,38	23,31	0,29	17,23	17,36	0,75
5540	45,29	45,28	0,022	28,29	28,22	0,24	20,79	20,85	0,28
6648	49,22	49,22	0	32,64	32,63	0,043	23,97	23,99	0,089
7756	52,12	52,12	0	35,89	35,88	0,023	26,31	26,32	0,037
8864	55,32	55,32	0	39,50	39,50	0	28,88	28,88	0
9972	58,25	58,25	0	42,79	42,79	0	31,22	31,22	0
11080	60,91	60,91	0	45,78	45,78	0	33,35	33,35	0

В результате исследований получили упрощенные уравнения нагрева обмоток, магнитопровода и масла, которые с максимальной погрешностью 3, 84 % описывают процесс нагрева при симметричной перегрузке. Следует отметить, что с увеличением времени нагрева погрешность уменьшается.

В ы в о д ы

1. При симметричных перегрузках для аналитического исследования процесса нагрева предлагается рассматривать силовой трансформатор как гетерогенную систему, состоящую из трех тел.
2. Разработана методология определения эквивалентных тепловых проводимостей, как параметров тепловой схемы замещения силового трансформатора, которая позволяет определять значения эквивалентных тепловых проводимостей по превышениям температур обмоток, магнитопровода и масла над температурой окружающей среды, потерям активных мощностей в обмотках и магнитопроводе в опытах холостого хода и короткого замыкания
3. Обосновано, что для анализа процесса нагрева силового трансформатора можно использовать упрощенные уравнения нагрева обмоток, магнитопровода и масла, включающие установившиеся значения и первые парциальные составляющие превышений температур данных тел над температурой окружающей среды, при этом для k1,15 максимальная относительная погрешность составляет 3,84 %.

2.5

2.6

(42)

2.7 **где**

.

2.8

2.9 **С**

учетом дополнительных обозначений получаем уравнения для определения корней уравнения (36):

2.10

(43)

2.11

2.12

2.13

(44)

2.14

2.15

(45)

2.16

2.17

2.18

2.19

2.20

2.21

2.22

2.23

2.24

2.25

2.26

2.27

2.28

2.29

2.30

2.31

2.32

2.33

2.34

2.35

2.36

2.37

2.38

2.39

2.40

2.41

2.42

2.43

2.44

2.45 2.2. Анализ тепловых проводимостей в трансформаторе

2.46

2.47 В практике инженерных расчетов нагрева электрических аппаратов вызывает затруднение определение тепловых проводимостей между телами, так как процесс распределения тепла описывается нелинейными уравнениями.

2.48 Ввиду относительно малого изменения удельной теплопроводности электротехнических проводниковых и конструкционных материалов с изменением температуры (в заданных пределах), можно принять усредненные постоянные значения теплопроводности.

2.49 С целью определения тепловых проводимостей

проанализируем систему уравнений (1) для номинального установившегося эксплуатационного режима работы трансформатора.

2.50 Для номинального режима работы трансформатора система уравнений (1) примет вид:

2.51

2.52

(46)

2.53

2.54 где - потери активной мощности в обмотке и магнито-

2.55 проводе в номинальном режиме, *Вт;*

2.56 - превышение температуры обмотки в номиналь-

2.57 ном режиме, C^o;

2.58 - превышение температуры магнитопровода в но-

2.59 минальном режиме, C^o ;

2.60 - превышение температуры масла в номинальном

2.61 **режиме, C^o.**

2.62

2.63

2.64

2.65 Для решения полученной системы уравнений (46) найдем общий определитель

2.66

2.67

(47)

2.68

2.69 Найдем определитель

2.70

2.71

(48)

2.72

2.73

2.74 Найдем определитель

2.75

2.76

(49)

2.77

2.78 Найдем определитель

2.79

2.80

(50)

2.81

2.82

2.83

2.84 Определяем тепловую проводимость :

2.85

2.86

(51)

2.87

2.88 Определяем тепловую проводимость

2.89

2.90

(52)

2.91

2.92 Определяем тепловую проводимость

2.93

2.94

(53)

2.95

2.96 Следовательно, определить тепловые проводимости между обмоткой, магнитопроводом и маслом можно зная номинальные значения потерь мощности и превышения температур.

2.97

2.98

2.99

2.100

2.101

2.102

2.103

2.104

2.105

2.106 Проведем анализ процесса нагрева обмотки, магнитопровода и масла трансформатора, на примере масленого трансформатора ТМ-63/10, имеющий следующие данные:

2.107 следование кривых нагрева обмоток, магнитопровода **2.107.1** и масла силового трансс	Обмотка трансформатора (тело1)	Магнитопровод трансформатора (тело2)	Масло (тело3)

форматора 2.108 Для наглядности, проведем исследование кривых нагрева обмоток, магнитопровода и масла на примере силового трансформатора типа ТМ – 63/10. 2.109 Уравнения превышения температуры обмоток, магнитопровода и масла над температурой окружающей среды имеют			

вид: 2.110 EMBED Equation.3 2.111 + ; (62) 2.112 2.113 + ; (63) 2.114 2.115 + , (64) где - постоянные времени нагрева, с. 2.116 Алгоритм расчета кривых			

нагрева обмоток, магнитопровода и масла для силового трансформатора типа ТМ – 63/10 приведен в приложении А.			
2.117 В результате получаем:			
2.118			
2.119			
2.120			.
2.121 Из анализа уравнений (62), (63), (64), (65), (66), (67) следует, что кривые нагрева обмоток, магнитопровода и масла получаю			

тся в результате сложения трех простых экспонент. Для дальнейшего исследования рассматриваем кривые нагрева обмоток и масла. 2.122 Перепишем уравнения нагрева для обмоток и масла в следующем виде: 2.123 *3* где - парциальные составляющие установившихся превышений температуры обмотки, оС.		,	

3.5 *4* где - парциальные составляющие установившихся превышений температуры масла, оС. *4.* 4.6 Уравнения (60), (61) применительно к нашему примеру имеют следующий вид: 4.7 4.8 4.9 Анализируя уравнения (70), (71) можно	*5.1.1* t - время, с.	,	

сделать вывод, что кривые превышения температуры этих тел над температурой окружающей среды могут быть представлены с допустимой погрешностью следующими эквивалентными уравнениями:

4.10

;

(72)

4.11

,

(73)

5 где

- установившиеся превышения температур обмотки, масла

, oC. *5.* 5.12 - эквивалентные постоянные времени нагрева, с. 5.13 При неоднородной структуре трансформатора невозможно непосредственно определить значение эквивалентной постоянной времени нагрева. 5.14 Применительно к нашему примеру уравнени	*11.1.1* t - текущее время, с.		

я (64), (65) имеют вид: 5.15 (66) 5.16 (67) 5.17 Результаты расчета эквивалентных кривых нагрева обмоток и масла во времени приведены в таблицах А.1 и А.2 приложения А. 5.18 Анализ результатов расчета показывает, что максимальное расхождение между	; .		

истинными значениями температуры нагрева и полученными по эквивалентной кривой нагрева составляют не более 5 %, что является допустимым. Исследование температуры обмоток в функции температуры масла, кратности силы тока в фазах трансформатора			
5.19 Одним из параметров функционального диагностирования силового трансформатора являются: превышение температуры			

обмоток над температурой окружающей среды [Овчаров]. Трудность непрерывного контроля температуры обмоток связана со сложностью установки измерительных преобразователей в обмотки трансформатора. Так как температура масла зависит от нагрева обмоток, а температура нагрева обмоток зависит от			

	нагрузки по фазам, которая характеризуется кратностью силы тока и коэффициентом неравномерности загрузки. Контроль температуры масла не вызывает затруднений. Поэтому необходимо установить зависимость температуры обмоток силового трансформатора в функции температуры масла и кратности силы тока. Для этого рассмотрим уравнения нагрева обмоток			

и масла (66), (67):			
5.20			
	.		
5.21			
	.		
5.22 Запишем формулы установившихся превышений температуры обмоток и температуры масла. Из уравнений (33), (35) при			
получаем :			
5.23			
.			
(68)			
5.24			
.			
(69)			
5.25 Подставив значения R1 , R3 , R согласно			

формулам (8), (12), (19) и преобразовав, получим 5.26 5.27 5.28 Перепишем уравнения нагрева обмотки и масла (66), (67) с учетом полученных уравнений установившихся превышений температур этих тел (70), (71) 5.29			. (70) .
			. (

5.30 (73) 5.31 Выразив температуру нагрева обмотки ( ) через температуру нагрева масла ( ) и преобразовав, получим уравнение: 5.32 5.33 Следовательно, превышение температуры обмотки	.	(74)	

	зависит от превышения температуры масла, кратности силы тока, коэффициента загрузки, потерь активной мощности в магнитопроводе и обмотке, температурного коэффициента сопротивления материала проводников обмотки и тепловых проводимостей .			
5.34	Алгоритм расчета температуры обмоток в функции			

	температуры масла при различных значениях кратности силы тока по фазам приведен в приложения А.2. В таблице А.2 приведены данные расчета температуры обмоток силового трансформатора ТМ-63/10 при различных значениях кратности силы тока по фазам.			
5.35	Графические зависимости температуры обмоток			

силового трансформатора ТМ-63/10 при изменении кратности силы тока, представлены на рис.2.2.			
5.	**35.1.1**		
Выводы			
1. Разработана математическая модель тепловых процессов в силовом трансформаторе с учетом кратности силы тока в фазах трансформатора.			
2. Функциональное состояние силового трансформатора предлагается			

контролировать по следующим показателям: температуре обмоток, скорости расхода ресурса изоляции обмоток и расходу ресурса изоляции. 3. Расход ресурса изоляции и скорость расхода ресурса являются функцией температуры обмоток. Увеличение скорости расхода ресурса изоляции верх номинального значения указывает на состояние силового трансформатора отличного от функцион			

ального. 4. Установлена зависимость температуры обмоток от температуры масла, кратности силы тока в фазах силового трансформатора. 5. Температура обмоток зависит от температуры масла, кратности силы тока в фазах трансформатора, потерь активной мощности в магнитопроводе и обмотке, температурного коэффициента сопротивления материала проводников			

обмотки и тепловых проводимостей . 6. Установлена зависимость для определения тепловых проводимостей между телами. 7. Тепловые проводимости между телами можно определить, зная номинальные значения потерь мощности и номинальные значения превышений температур над температурой окружающей среды.			

Потери активной мощности, *Вт*.	1300	320	-
Теплоемкости тел, *Дж/С*^{0}.	42669,6	78170,4	342000
Номинал. превышение температуры тел над температурой окруж. среды, *С*^{0}	65	75	55

Результаты исследований, которые приведены в данном разделе, опубликованы в статьях [112, 113].

(42)

где .

С учетом дополнительных обозначений получаем уравнения для определения корней уравнения (36):

(43)

(44)

(45)

2.2. Анализ тепловых проводимостей в трансформаторе

В практике инженерных расчетов нагрева электрических аппаратов вызывает затруднение определение тепловых проводимостей между телами, так как процесс распределения тепла описывается нелинейными уравнениями.

Ввиду относительно малого изменения удельной теплопроводности электротехнических проводниковых и конструкционных материалов с изменением температуры (в заданных пределах), можно принять усредненные постоянные значения теплопроводности.

С целью определения тепловых проводимостей проанализируем систему уравнений (1) для номинального установившегося эксплуатационного режима работы трансформатора.

Для номинального режима работы трансформатора система уравнений (1) примет вид:

(46)

где - потери активной мощности в обмотке и магнитопроводе в номинальном режиме, *Вт;*

- превышение температуры обмотки в номинальном режиме, C^{o};

- превышение температуры магнитопровода в номинальном режиме, C^{o} ;

- превышение температуры масла в номинальном режиме, C^{o}.

Для решения полученной системы уравнений (46) найдем общий определитель

(47)

Найдем определитель

(48)

Найдем определитель

(49)

Найдем определитель

(50)

Определяем тепловую проводимость :

(51)

Определяем тепловую проводимость

(52)

Определяем тепловую проводимость

(53)

Следовательно, определить тепловые проводимости между обмоткой, магнитопроводом и маслом можно зная номинальные значения потерь мощности и превышения температур.

Проведем анализ процесса нагрева обмотки, магнитопровода и масла трансформатора, на примере масленого трансформатора ТМ-63/10, имеющий следующие данные:

ток, магнитопровода и масла силового трансформатора Для наглядности, проведем исследование кривых нагрева обмоток, магнитопровода и масла на примере силового трансформатора типа ТМ – 63/10. Уравнения превышения температуры обмоток, магнитопровода и масла над температурой окружающей среды	Обмотка трансформатора (тело1)	Магнитопровод трансформатора (тело2)	Масло (тело3)

имеют вид: EMBED Equation.3 + ; (62) + ; (63) + , (64) где - постоянные времени нагрева, с. Алгоритм расчета кривых нагрева обмоток, магнитопровода и масла для силового трансформатора типа ТМ – 63/10 приведен в			

приложении А.

В результате получаем:

(65)

(66)

. (67)

Из анализа уравнений (62), (63), (64), (65), (66), (67) следует, что кривые нагрева обмоток, магнитопровода и масла получаются в результате сложения трех простых экспонент. Для дальнейшего исследования рассматриваем кривые нагрева обмоток и масла.

Перепишем уравнения нагрева для обмоток и масла в следующем виде:

, (68)

где

- парциальные со

	ставляющие установившихся превышений температуры обмотки, о С.	,	(69)
где	- пар		

	циальные составляющие установившихся превышений температуры масла, оС. t - время, с.		
Уравнения (60), (61) применительно к нашему примеру имеют следующий вид:			(70) (71)
Анализируя уравнения (70), (71)			

можно сделать вывод, что кривые превышения температуры этих тел над температурой окружающей среды могут быть представлены с допустимой погрешностью следующими эквивалентными уравнениями: ; (72) , (73) где - установившиеся превышения температур обмотки, масла, оС. t - эквивалентные постоянные времени нагрева, с. При неоднородной структуре трансформатора невозможно	- текущее время, с .		

непосредственно определить значение эквивалентной постоянной времени нагрева. Поэтому принимаем значение эквивалентной постоянной времени нагрева тел равное наибольшему значению постоянной времени составляющих в уравнении нагрева [Бодн]: Применительно к нашему примеру уравнения (64), (65) имеют вид: (66) (67) Результаты расчета эквивалентных кривых нагрева обмоток и масла во времени приведены в таблицахА.1 и А. 2 приложения А.	; .		

Анализ результатов расчета показывает, что максимальное расхождение между истинными значениями температуры нагрева и полученными по эквивалентной кривой нагрева составляют не более 5 %, что является допустимым. 2.5. Исследование температуры обмоток в функции температуры масла, кратности силы тока в фазах трансформатора Одним из параметров функционального диагностирования силового трансформатора являются: превышение температуры обмоток над температурой			

окружающей среды [Овчаров]. Трудность непрерывного контроля температуры обмоток связана со сложностью установки измерительных преобразователей в обмотки трансформатора. Так как температура масла зависит от нагрева обмоток, а температура нагрева обмоток зависит от нагрузки по фазам, которая характеризуется кратностью силы тока и коэффициентом неравномерности загрузки. Контроль температуры масла не вызывает затруднений. Поэтому необходимо установить зависимость температуры обмоток силового трансформатора в функции температуры масла и кратности силы тока. Для этого рассмотрим уравнения нагрева обмоток и масла (66), (67):			

.

.

Запишем формулы установившихся превышений температуры обмоток и температуры масла. Из уравнений (33), (35) при получаем:

.

(68)

.

(69)

Подставив значения R1 , R3 , R согласно формулам (8), (12), (19) и преобразовав , получим

. (70)

. (71)

Перепишем уравнения нагрева обмотки и масла (66), (67) с учетом полученных уравнений установившихся превышений температур этих тел (70), (71)

. (72)

. (73)

Выразив температуру нагрева обмотки ( ) через температуру нагрева масла ( ) и преобразовав, получим уравнение:

(74)

Следовательно, превышение

температуры обмотки зависит от превышения температуры масла, кратности силы тока, коэффициента загрузки, потерь активной мощности в магнитопроводе и обмотке, температурного коэффициента сопротивления материала проводников обмотки и тепловых проводимостей . Алгоритм расчета температуры обмоток в функции температуры масла при различных значениях кратности силы тока по фазам приведен в приложения А.2. В таблице А.2 приведены данные расчета температуры обмоток силового трансформатора ТМ-63/10 при различных значениях кратности силы тока по фазам. Графические			

зависимости температуры обмоток силового трансформатора ТМ-63/10 при изменении кратности силы тока, представлены на рис.2.2. В ы в о д ы 1. Разработана математическая модель тепловых процессов в силовом трансформаторе с учетом кратности силы тока в фазах трансформатора. 2. Функциональное состояние силового трансформатора предлагается контролировать по следующим показателям: температуре			

обмоток, скорости расхода ресурса изоляции обмоток и расходу ресурса изоляции. 3. Расход ресурса изоляции и скорость расхода ресурса являются функцией температуры обмоток. Увеличение скорости расхода ресурса изоляции верх номинального значения указывает на состояние силового трансформатора отличного от функционального. 4. Установлена зависимость температуры обмоток			

от температуры масла, кратности силы тока в фазах силового трансформатора. 5. Температура обмоток зависит от температуры масла, кратности силы тока в фазах трансформатора, потерь активной мощности в магнитопроводе и обмотке, температурного коэффициента сопротивления материала проводников обмотки и тепловых проводимостей . 6. Установлена зависимость для			

определения тепловых проводимостей между телами. 7. Тепловые проводимости между телами можно определить, зная номинальные значения потерь мощности и номинальные значения превышений температур над температурой окружающей среды.			
Потери активной мощности, *Вт*.	1300	320	-
Теплоемкости тел, *Дж/С⁰*.	42669,6	78170,4	342000
Номинал. превышение температуры тел над температурой окруж. среды, *С⁰*	65	75	55

ДЕЛ 3
ИССЛЕДОВАНИЕ ПР ЦЕССА НАГРЕВА СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА КАК ГЕТЕРОГЕННОЙ СИСТЕМЫ ПРИ НЕСИММЕТРИЧНОЙ ПЕРЕГРУЗКЕ

3.1. Анализ процесса нагрева силового трансформатора как гетерогенной системы при несимметричной перегрузке.

Силовые трансформаторы сельских потребительских подстанций, как правило, работают с неодинаковой токовой загрузкой фаз. Несимметричная токовая нагрузка фаз приводит к неодинаковому нагреву обмоток, дополнительному нагреву стержней магнитопровода и других элементов вследствие появления магнитного потока нулевой последовательности, что резко сказывается на температурных перепадах внутри силового трансформатора. В работах [4, 37, 38] отмечалось, что при несимметрии нагрузки происходит искажение температурного поля внутри трансформатора. Наиболее загруженные током обмотки будут иметь температуру выше, чем менее загруженные, нагрев обмоток высокого напряжения и низкого напряжения неодинаков, между обмотками разных фаз возникает температурный перепад и благодаря теплопроводности наблюдается процесс защитного саморегулирования, что приводит к смещению наиболее нагретой точки [103, 104]. Скорость теплового износа изоляции в более загруженной фазе будет выше. В связи с этим необходимо провести анализ процесса нагрева силового трансформатора при несимметричной токовой нагрузке фаз в сравнении с номинальным режимом.

Рассмотрим силовой трансформатор в тепловом отношении как гетерогенную систему, состоящую из пяти тел: тело 1 - обмотка фазы «А», тело 2 - обмотка фазы «В», тело 3 - обмотка фазы «С», тело 4 - магнитопровод, тело 5 – масло. Тепловая схема замещения силового трансформатора для указанного варианта представлена на рис. 3.1.

Рисунок 3.1. Тепловая схема замещения силового трансформатора как системы пяти тел.

На тепловой схеме замещения приведены следующие условные обозначения:

- потери активной мощности соответственно в обмотках фаз «А», «В», «С», в магнитопроводе, Вт;

-теплоемкости соответственно обмоток фаз «А», «В», «С», магнитопровода, масла, Дж/ оС;

- значения средних превышений температур соответственно обмоток фаз «А», «В», «С», магнитопровода, масла над температурой окружающей среды, оС;

- эквивалентные тепловые проводимости соответственно между обмотками фаз «А», «В», «С» и магнитопроводом, Вт/ оС;

- эквивалентные тепловые проводимости соответственно между обмотками фаз «А», «В», «С» и маслом, Вт/ оС;

- эквивалентная тепловая проводимость между магнитопроводом и маслом, Вт/ оС;

- эквивалентная тепловая проводимость между маслом и окружающей средой, Вт/ оС;

- теплоемкость окружающей среды, Дж/ оС;

- температура окружающей среды, оС.

Принимаем, что теплоемкости обмоток фаз ( ), магнитопровода ( ) и масла ( ), эквивалентные тепловые проводимости между телами (EMBED Equation.3) не зависят от изменения температуры, теплоёмкость окружающей среды ( ) равна бесконечности, температура окружающей среды ( ) постоянна. Анализ тепловых процессов проводим по средним значениям превышений температур соответствующих тел над температурой окружающей среды.

Составим дифференциальные уравнения теплового баланса для каждого тела:

(3.1)

где - энергия, расходуемая на нагрев обмотки фазы «А», Дж;

- энергия, расходуемая на нагрев обмотки фазы «В», Дж;

- энергия, расходуемая на нагрев обмотки фазы «С», Дж;

- энергия, расходуемая на нагрев магнитопровода, Дж;

- энергия, расходуемая на нагрев масла, Дж;

- энергия, которая выделяется в обмотке фазы «А», Дж;

- энергия, которая выделяется в обмотке фазы «В», Дж;

- энергия, которая выделяется в обмотке фазы «С», Дж;

- энергия, которая выделяется в магнитопроводе, Дж;

- энергия, которая передается от тела 1 к телу 4, Дж;

- энергия, которая передается от тела 2 к телу 4, Дж;

- энергия, которая передается от тела 3 к телу 4, Дж;

- энергия, которая передается от тела 1 к телу 5, Дж;

- энергия, которая передается от тела 2 к телу 5, Дж;

- энергия, которая передается от тела 3 к телу 5, Дж;

- энергия, которая передается от тела 4 к телу 5, Дж;

- энергия, которая передается от тела 5 окружающей среде, Дж.

Учитывая, что обмотки фаз конструктивно одинаковые, а также уравнения (2.1), (2.48), (2.49), (2.50), (2.51) можно записать:

; (3.2)

; (3.3)

; (3.4)

; (3.5)

; (3.6)

. (3.7)

С учетом вышесказанного и после преобразования системы уравнений (3.1) запишем:

(3.8)

где - кратности сил токов соответственно в фазах «А», «В», «С», силового трансформатора.

Исследование тепловых процессов в силовом трансформаторе при несимметричной перегрузке выполним методом операторного решения дифференциальных уравнений. Перепишем дифференциальные уравнения системы (3.8) в операторной форме:

Решим систему уравнений (3.9) относительно
в матричной форме:

, (3.10)

где ; (3.11)

.3 ;
(3.12)

.3 ;
(3.13)

.3 ;
(3.14)

.3 ;
(3.15)

; (3.16)

; (3.17)

. (3.18)

Для исследуемого трансформатора подставим значения P10, P2,

, , C1, C2, C3 в уравнения (3.10), (3.16), (3.17), (3.18) и применив программное обеспечение «Maple 9,5», получим уравнения превышения температур обмоток и масла над температурой окружающей среды в операторной форме в функции кратностей сил токов по фазам.

В результате расчета матриц (3.10), (3.16), (3.17), (3.18) получим:

.

3

.

3

3

.3

Введем дополнительные обозначения в знаменатели уравнений (3.19), (3.20), (3.21), (3.22):

; (3.23)

; (3.24)

; (3.25)

; (3.26)

; (3.27)

; (3.28)

Введем дополнительные обозначения в числитель уравнения (3.19):

; (3.29)

; (3.30)

; (3.31)

; (3.32)

; (3.33)

Введем дополнительные обозначения в числитель уравнения (3.20):

. (3.34)

; (3.35)

; (3.36)

; (3.37)

; (3.38)

Введем дополнительные обозначения в числитель уравнения (3.21):

. (3.39)

; (3.40)

; (3.41)

; (3.42)

; (3.43)

Введем дополнительные обозначения в числитель уравнения (3.22):

; (3.44)

; (3.45)

; (3.46)

. (3.47)

В результате получим уравнения превышений температур обмоток над температурой окружающей среды в каждой фазе и превышение температуры масла над температурой окружающей среды в операторной форме

.3

(3.48)

.3

(3.49)

.3

(3.50)

.3

. (3.51)

По теореме разложения для случая, когда характеристическое уравнение имеет пять различных и не равных нулю корней, получим уравнения превышений температур обмоток над температурой окружающей среды для каждой фазы , , и уравнение превышения температуры масла над температурой окружающей среды :

.3

.3

.3

.3

.3

.3

где p_1, p_2, p_3, p_4, p_5 - корни характеристического уравнения, 1/с.

Для проверки справедливости полученных уравнений (3.52), (3.53), (3.54), (3.55) зададимся кратностью силы тока $k_A = k_B = k_C = 1$, рассчитаем превышения температур обмоток и масла над температурой окружающей среды и сравним их с уравнениями (2.53), (2.55). Расчет выполнялся с применением программного обеспечения «Maple 9,5», результаты представлены в приложении Б.1.

Для нашего примера уравнения (3.52), (3.53), (3.54), (3.55) имеют вид:

EMBED Equation.3 ;
(3.56)

. (3.57)

Из проверки видно, что полученные уравнения позволяют определить превышения температур обмоток в фазах и масла над температурой окружающей среды при симметричной нагрузке, как частного случая несимметричной токовой нагрузки.

В общем виде уравнения нагрева обмоток фаз «А», «В», «С» и масла можно записать как сумму пяти экспонент, каждая из которых характеризуется установившимся значением и постоянной времени нагрева:

+ , (3.58)

где - установившиеся значения парциальных превышений температуры обмотки фазы «А» над температурой окружающей среды, оС;

- парциальные постоянные времени нагрева, с.

+ , (3.59)

где - установившиеся значения парциальных превышений температуры обмотки фазы «В» над температурой окружающей среды, оС.

+ , (3.60)

где - установившиеся значения парциальных превышений температуры обмотки фазы «С» над температурой окружающей среды, оС.

+ , (3.61)

где - установившиеся значения парциальных превышений температуры масла над температурой окружающей среды, оС.

Проведем исследование изменения установившихся парциальных превышений температур обмоток фаз и масла при изменении кратности силы тока в фазе «А», приняв кратности сил токов в фазах «В» и «С» равными единице. Расчет выполнялся с применением программного обеспечения «Maple 9,5», алгоритм расчета приведен в приложении Б.2, результаты в таблице Б.1.

На рисунке 3.2 представлены кривые установившихся парциальных превышений температур обмотки фазы «А» и масла над температурой окружающей среды.

Рисунок 3.2. Зависимости установившихся парциальных составляющих превышений температур обмотки фазы «А» и масла для исследуемого трансформатора при изменении кратности силы тока в фазе «А» и при

.

Анализ кривых нагрева показал, что установившиеся значения парциальных превышений температуры обмотки и масла над температурой окружающей среды относительно малы и наступают сравнительно быстро, поэтому уравнения нагрева обмоток фаз и масла можно представить в следующем виде:

EMBED Equation.3

; (3.62)

EMBED Equation.3

; (3.63)

EMBED Equation.3

; (3.64)

+ . (3.65)

Или

; (3.66)

; (3.67)

; (3.68)

. (3.69)

Проверим справедливость полученных уравнений, рассмотрев процесс нагрева обмоток фаз и масла при перегрузке силового трансформатора ТМ – 160/10. Примем kA1,4; kB0,8; kC1,15 и для данного режима рассчитаем значения превышений температур обмоток каждой фазы и превышение температуры масла над температурой окружающей среды по уравнениям (3.66), (3.67), (3.68), (3.69) и сравним их с данными (, , ,), полученными при расчете по уравнениям (3.58), (3.59), (3.60), (3.61).

Результаты расчетов представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1

Результаты расчета превышений температур обмоток фаз «А», «В», «С» при перегрузках kAkB kC

t												
c	oC	oC	%	oC	oC	%	oC	oC	%	oC	oC	%
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2638	46,26	46,19	0,15	20,98	20,89	0,4	33,49	33,5	0,02	10,52	10,26	2,4
5923	60,15	60,11	0,08	33,66	33,59	0,2	46,77	46,71	0,12	21,48	21,14	1,6
9239	70,56	70,51	0,08	43,16	43,14	0,05	56,72	56,71	0,02	29,69	29,36	1,1
12474	78,12	78,09	0,03	50,05	50,01	0,08	63,94	63,92	0,02	35,65	35,29	1,02
15772	83,86	83,81	0,06	55,29	55,21	0,14	69,43	69,41	0,02	40,1	39,77	0,8
19066	88,12	88,09	0,02	59,18	59,12	0,1	73,5	73,48	0,02	43,54	43,61	0,6
22354	91,28	91,21	0,08	62,06	62,01	0,08	75,52	76,50	0,02	46,03	45,69	0,7
25659	93,64	93,59	0,04	64,22	64,19	0,04	78,77	78,71	0,07	47,81	47,54	0,5
28957	95,39	95,35	0,04	65,81	65,80	0,01	80,44	80,41	0,03	49,01	48,89	0,2
31575	96,46	96,46	0	66,78	66,78	0	81,46	81,45	0,01	50,10	49,99	0,1

Результаты расчетов показывают, что упрощенные уравнения нагрева обмоток фаз трансформатора и масла при заданных несимметричных перегрузках с максимальной погрешностью 2,4 % для масла и максимальной погрешностью 0,4 % для обмоток описывают процессы нагрева данных тел.

Согласно [13] скорость теплового износа изоляции определяется температурой наиболее нагретой точки. Установим зависимость температуры наиболее нагретой точки в функции температуры масла и кратностей сил токов в фазах при несимметричных перегрузках.

3.2. Исследование температуры наиболее нагретой точки в функции температуры масла и кратностей сил токов в фазах при несимметричных перегрузках

Температура наиболее нагретой точки при любой нагрузке определяется как сумма температуры окружающей среды, превышения температуры масла в верхних слоях над температурой окружающей среды и разности температур наиболее нагретой точки и масла в верхних слоях [13].

Следовательно, при несимметричных перегрузках температуры наиболее нагретых точек обмоток фаз силового трансформатора можно определить следующим образом:

; (3.70)

; (3.71)

, (3.72)

где - температура масла в верхних слоях, оС;

- соответственно превышения температур наиболее нагретых точек обмоток фаз «А», «В», «С» над температурой масла в верхних слоях (перепад температур), оС.

Превышения температур наиболее нагретых точек обмоток фаз «А», «В», «С» над температурой окружающей среды по рекомендации [13] на 13 оС больше, чем средние значения превышений температур обмоток фаз над температурой окружающей среды, тогда перепады температур в обмот ках определяем по уравнениям:

; (3.73)

; (3.74)

. (3.75)

С учетом уравнений (3.66), (3.67), (3.68), (3.69) получим

; (3.76)

; (3.77)

. (3.78)

Введём дополнительные обозначения:

; (3.79)

; (3.80)

; (3.81)

; (3.82)

; (3.83)

. (3.84)

Подставив их в уравнения (3.76), (3.77), (3.78), получим:

; (3.85)

; (3.86)

, (3.87)

Установившиеся значения перепадов температур в фазах силового трансформатора определяем по уравнениям:

; (3.88)

; (3.89)

. (3.90)

Установившиеся значения первых парциальных перепадов температур в фазах определяем по уравнениям:

.3

.3

(3.91)

.3

.3

(3.92)

.3

.3

(3.93)

Для получения выражений перепадов температур в фазах трансформатора и первой парциальной времени нагрева в функции кратностей сил токов воспользуемся методом наименьших квадратов [114, 115].

Проведем расчет установившихся значений перепадов температур в фазах, их первых парциальных составляющих и первой парциальной времени нагрева при варьировании кратностей сил токов в фазах от 0,8 до 1,2 для исследуемого трансформатора.

Данные расчетов представлены в таблицах Б.2 - Б.8 приложения Б.

В результате проведенных расчетов и после преобразования для частного случая уравнения (3.79) – (3.84) имеют вид:

; (3.94)

; (3.95)

; (3.96)

; (3.97)

; (3.98)

; (3.99)

. (3.100)

В общем виде можно записать:

; (3.101)

; (3.102)

; (3.103)

; (3.104)

; (3.105)

; (3.106)

. (3.107)

где A1, A2, A3, A4, A5, A6 – коэффициенты, оС;
D1, D2 – коэффициенты, с.

Тогда уравнения для определения температур наиболее нагретых точек обмоток фаз силового трансформатора в общем виде можно записать следующим образом:

(3.108)

(3.109)

(3.110)

В ы в о д ы

1. При несимметричных перегрузках для аналитического исследования процесса нагрева предлагается рассматривать силовой трансформатор, как гетерогенную систему, состоящую из пяти однородных тел.
2. Обосновано, что процессы нагрева обмоток фаз можно описать упрощенными уравнениями, включающие установившиеся значения и первые парциальные составляющие превышений температур обмоток соответствующих фаз над температурой окружающей среды, при этом максимальная погрешность составляет 0,4 % при kA 1,4; kB 0,8; kC 1,15.

3. Обосновано, что процесс нагрева масла можно описать упрощенным уравнением, при этом максимальная погрешность составляет 2,4 % при kA1,4; kB0,8; kC1,15. Уравнение нагрева масла состоит из устано вившегося значения и первой парциальной составляющей превышения температуры масла над температурой окружающей среды.
4. Установлена зависимость температуры наиболее нагретой точки обмоток для каждой фазы силового трансформатора, которая определяется как сумма текущей температуры верхних слоев масла и перепада температуры обмотки фазы с учетом кратностей сил токов в фазах трансформатора.

Результаты исследований, которые приведены в данном разделе, опубликованы в статье [116].

РАЗДЕЛ 4
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАГРЕВА СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА ПОД ДЕЙСТВИЕМ СВЕРХТОКОВ

4.1. Аналитическое исследование процесса нагрева силового трансформатора под воздействием сверхтоков

Под воздействием сверхтоков, вызванных короткими замыканиями в питаемых сетях или пусками электродвигателей в условиях соизмеримой мощности, происходит дополнительный нагрев обмотки силового трансформатора.

Рассмотрим тепловые переходные процессы в силовом трансформаторе при сверхтоках, начиная от горячего состояния. Пусть до действия сверхтоков трансформатор работал при номинальной нагрузке и в трансформаторе был установившийся номинальный режим.

Так как переходные процессы при сверхтоках скоротечны, то можно пренебречь теплоотдачей от обмоток к маслу и от обмоток к магнитопроводу и считать, что вся выделившаяся теплота практически сосредотачивается в материале обмоток. В этом случае процесс нагревания описывается дифференциальным уравнением:

, (4.1)

где C1 - теплоемкость обмоток силового трансформатора, Дж/ 0С;

P10 - потери мощности в обмотках трансформатора при начальной температуре, Вт;

- температурный коэффициент сопротивления материала обмоток, 1/оС;

- текущее превышение температуры обмоток над температурой окружающей среды, 0С.

Перепишем уравнение в следующем виде:

.

(4.2)

Введем дополнительное обозначение:

.

(4.3)

Подставив введенное обозначение в уравнение (4.3), получим:

. (4.4)

Запишем характеристическое уравнение:

. (4.5)

Корень характеристического уравнения равен:

. (4.6)

Превышения температуры обмотки над температурой окружающей среды в переходной период можно записать как сумму установившейся (принужденной) и свободной составляющих:

, (4.7)

где - принужденная составляющая превышения температуры обмоток над температурой окружающей среды, о С;

- свободная составляющая превышения температуры обмоток над температурой окружающей среды, о С.

Для определения установившегося значения превышения температуры над температурой окружающей среды рассмотрим уравнение (4.2) при , когда скорость нарастания превышения температуры обмотки над температурой окружающей среды ( ) равна нулю. В результате получим:

. (4.8)

Так как характеристическое уравнение (4.5) имеет один корень, то свободная составляющая превышения температуры обмоток над температурой окружающей среды можно выразить так:

, (4.9)

где - постоянная интегрирования, оС.

Тогда уравнение (4.7) имеет вид:

. (4.10)

Для определения постоянной интегрирования рассмотрим уравнение (4 .1) при с учетом начальных условий. В начальный момент времени теплового переходного процесса обмотка трансформатора была нагрета до номинального значения . Тогда постоянная интегрирования равна:

. (4.11)

Подставив значение постоянной интегрирования в уравнение (4.10), получим выражение текущего превышения температуры обмоток над температурой окружающей среды при действии сверхтоков:

. (4.12)

Если учесть, что , тогда . Подставим это значение в уравнение (4.12), получим:

. (4.13)

Для определения скорости нарастания превышения температуры обмотки над температурой окружающей среды продифференцируем уравнение (4.13). В результате получим:

. . (4.14)

В начальный момент времени потери активной мощности в обмотках трансформатора определяем следующим образом:

, (4.15)

где - активное сопротивление одной фазы приведенного трансформатора при начальной номинальной температуре, Ом;

- номинальная сила тока трансформатора, А.

Номинальное активное сопротивление фазы приведенного трансформатора при номинальной температуре определяется по формуле:

, (4.16)

где - активное сопротивление приведенного трансформатора при температуре окружающей среды, Ом;

- температура обмоток при номинальном режиме, о С;

.3 - температура окружающей среды, ^{o}C.

Рассмотрим Т-образную схему замещения силового трансформатора (рис.4.1.) [117]. Активное сопротивление фазы приведенного трансформатора равно:

, (4.17)

где - активное сопротивление первичной обмотки, Ом;

- приведенное активное сопротивление вторичной обмотки, Ом.

В свою очередь, активное сопротивление фазы приведенного силового трансформатора можно определить следующим образом:

, (4.18)

где - потери активной мощности короткого замыкания, Вт;

- номинальный линейный ток на стороне высшего напряжения, А.

Подставив уравнения (4.157) в уравнение (4.34) получим зависимость для определения постоянной времени нагрева обмотки при сверхтоках:

. (4.19)

Тогда уравнение превышение температуры обмотки силового трансформатора над температурой окружающей среды при сверхтоках имеет вид:

. (4.20)

Запишем выражение для нахождения максимального превышения температуры обмотки над температурой окружающей среды в конце действия сверхтока:

, (4.21)

где - время действия сверхтока, с.

Воспользуемся понятием импульса квадрата сверхтока, введенного в [9], под которым понимается произведение квадрата сверхтока на время его действия:

. (4.22)

Воспользуемся обозначением коэффициента , введенного в [9], который характеризует конструктивные параметры силового трансформатора:

. (4.23)

Тогда уравнение (4.21) можно записать в следующем виде:

. (4.24)

Воспользуемся величиной , введенной в [9], которая называется критерием нагревания обмоток силового трансформатора при сверхтоках и обозначается :

$t_{охл}$

. (4.25)

Выражение максимального значения превышения температуры обмоток силового трансформатора, в конце действия сверхтока примет вид:

. (4.26)

4.2. Анализ процесса износа изоляции после действия сверхтоков

Так как действие сверхтока скоротечно, то можем принять с определенной степенью точности, что максимальное превышение температуры обмоток в конце действия сверхтока наступает мгновенно.

Дополнительный тепловой износ изоляции обмоток силового трансформатора после действия сверхтока будет наблюдаться в период охлаждения обмоток трансформатора до номинального значения.

Принимаем, что процесс охлаждения обмоток силового трансформатора до номинального значения будет длиться по времени равным пяти постоянным времени нагрева силового трансформатора. График процесса охлаждения обмоток силового трансформатора до номинального значения после действия сверхтока и зависимость представлены на рис. 4.2. За время остывания будет происходить дополнительный тепловой износ изоляции, величина которого определяется заштрихованной площадью графика теплового износа изоляции (рис. 4.2).

Запишем выражение для определения дополнительного теплового износа изоляции при остывании обмотки силового трансформатора после действия сверхтоков:

, (4.27)

где T - постоянная времени нагрева трансформатора, с;

- максимальная скорость теплового износа изоляции, при максимальном значении превышения температуры обмотки над температурой окружающей среды в конце действия сверхтоков, бч/ч;

- номинальная скорость теплового износа изоляции, при номинальном значении превышения температуры обмотки над температурой окружающей среды, бч/ч;

- скорость теплового износа изоляции на i–ом участке графика, бч/ч ;

Рисунок 4.2. График процесса охлаждения обмоток силового трансформатора до номинального значения и зависимость после действия сверхтока.

Максимальная скорость теплового износа изоляции, при максимальном значении превышения температуры обмотки над температурой окружающей среды в конце действия сверхтоков определяется по формуле:

, (4.28)

где B - коэффициент, характеризующий класс изоляции, К;

- абсолютная длительно допустимая температура изоляции, К;

- номинальное превышение температуры обмоток над температурой окружающей среды, оС;

- номинальная температура окружающей среды, оС.

Скорость теплового износа изоляции на i–ом участке графика определяется по формуле [9]:

. (4.29)

В свою очередь

; (4.30)

. (4.31)

Для определения допустимого импульса квадрата сверхтока воспользуемся уравнением из [118]:

. (4.32)

Для определения допустимого импульса квадрата сверхтока проанализируем зависимость на примере силового трансформатора ТМ – 160 /10, задавшись значениями ПІ. = 500, 1000, 1500, 2000, 2500, 3000 и решив уравнения (4.27 – 4.31). Результаты расчетов приведены в приложении В.1, зависимость для силового трансформатора ТМ -160/10 при температуре окружающей среды представлена на рис.4.3.

Из полученных данных видно, что дополнительный тепловой износ изоляции после действия сверхтоков равен 1 бч, согласно рекомендациям [13], при импульсе квадрата сверхтока ПІ .

Таким образом, задавшись допустимым значением дополнительного теплового износа изоляции на один аварийный режим, можно найти допустимый импульс квадрата действия сверхтока ПІ , который является параметром диагностирования процесса износа изоляции при сверхтоках.

Рисунок 4.3 Зависимость для силового трансформатора ТМ -160/10 при температуре окружающей среды .

Полученные результаты могут быть использованы для защиты силовых трансформаторов от действия токов короткого замыкания.

В ы в о д ы

1. Функциональное состояние силового трансформатора при сверхтоках предлагается определять по допустимому импульсу квадрата сверхтока, контролируя кратность сила тока в фазах трансформатора и время действия сверхтока, при этом в соответствии с [13] дополнительный тепловой износ изоляции не должен превышает 1 бч. Для исследуемого трансформатора конструкционный коэффициент равен 1/(А2 ·с), при импульсе квадрата сверхтока, равном 2352 , критерий нагревания равен 0,007.
2. Разработана математическая модель тепловых процессов в силовом трансформаторе при действии сверхтоков, которая позволяет контролировать и оценивать процесс дополнительного износа изоляции силового трансформатора после действия сверхтоков.

Результаты исследований, которые приведены в данном разделе, опубликованы в статье [119].

РАЗДЕЛ 5

РАЗРАБОТКА модели ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ силовоГО трансформаторА

5.1. Обоснование параметров диагностирования тепловых процессов в силовом трансформаторе

5.1.1. Общая часть

Для исследования тепловых процессов при перегрузках силовых трансформаторов принимаем три варианта их диагностирования:

- в качестве диагностического параметра тепловых процессов принимается температура масла;
- в качестве диагностического параметра тепловых процессов принимается сила тока в фазах силового трансформатора;
- в качестве диагностических параметров тепловых процессов принимается одновременно температура масла и сила тока в фазах силового трансформатора;

5.1.2. Методика аналитического исследования тепловых процессов при симметричных **допустимых** перегрузках силовых трансформаторов по температуре масла как диагностическому параметру тепловых процессов

Принимаем, что до перегрузки силовой трансформатор был нагрет до определенных значений превышений температуры масла и температуры обмотки.

Затем произошёл наброс нагрузки.

На рис. 5.1 представлены кривые нагрева масла ( ), обмотки ( ) и скорости теплового износа изоляции обмотки ( ).

.Chart.8 \s

Рисунок 5.1 Зависимости при допустимой перегрузке силового трансформатора.

На рис. 5.1 приняты следующие условные обозначения:

- начальное превышение температуры масла над температурой окружающей среды, оС;
- начальное превышение температуры обмотки над температурой окружающей среды, оС;
- допустимое значение превышения температуры масла над температурой окружающей среды, оС;
- предельное значение превышения температуры обмотки над температурой окружающей среды, оС;
- начальная скорость теплового износа изоляции, бч/ч;
- предельное значение скорости теплового износа изоляции, бч/ч;

ЕД - дополнительный тепловой износ изоляции, бч;

- время действия допустимой перегрузки, с.

Принимаем за допустимый нагрев масла силового трансформатор значение, превышающее номинальное на 10 оС.

Заштрихованная площадь на графике под кривой представляет собой в определенном масштабе дополнительный тепловой износ изоляции за время действия перегрузки (t п).

Составляем алгоритм исследования дополнительного теплового износа изоляции за период работы трансформатора с перегрузкой в течение времени t п.

Дополнительный тепловой износ изоляции при допустимой перегрузке равен:

. (5.1)

Скорость теплового износа изоляции при в процессе действии допустимой перегрузкиперегрузки [9]:

, (5.2)

где - номинальная скорость теплового износа изоляции, бч/ч;

- номинальная скорость расхода ресурса изоляции, *бч/ч*;

B - параметр, характеризующий класс изоляции, К;

- абсолютная номинальная температура изоляции, К;

- абсолютная текущая температура изоляциипридопустимой перегрузке, К.

Абсолютная текущая текущая температура изоляции прив течение действия допустимой перегрузкеперегрузки равна:

, (5.3)

где - текущее значение превышения температуры обмотки над температурой окружающей среды в течение действия допустимой перегрузкеперегрузки, оС;

- температура окружающей среды, оС.

Текущее значение превышения температуры обмотки над температурой окружающей среды в течение действия допустимой перегрузкеперегрузки находим из (2.56), записав его с горячего состояния:

, (5.4)

где - установившееся значение превышения температуры обмотки над температурой окружающей среды при заданной перегрузке, оС;

- начальное значение первой парциальной составляющей превышения температуры обмотки над температурой окружающей среды при кратности силы тока, которая была до перегрузки, оС;

- установившееся значение первой парциальной составляющей превышения температуры обмотки над температурой окружающей среды при заданной перегрузке, оС;

t - текущее время, с;

- первая парциальная составляющая постоянной времени нагрева, с.

Установившееся значение превышения температуры обмотки над температурой окружающей среды при заданной перегрузке определяем:

, (5.5)

где R, R1 определяем соответственно по уравнениям (2.10), (2.13).

Начальное значение первой парциальной составляющей превышения температуры обмотки над температурой окружающей среды при кратности силы тока, которая была до перегрузки:

, (5.6)

где L1, T1 , K, L, T определяем соответственно по уравнениям (2.11), (2.12), (2.7) – (2.9);

p1 - корень характеристического уравнения, 1/с.

Установившееся значение первой парциальной составляющей превышения температуры обмотки над температурой окружающей среды при заданной перегрузке определяем по уравнению (5.6) при заданном значении перегрузки.

Первая парциальная составляющая постоянной времени нагрева:

, (5.7)

Корень характеристического уравнения:

. (5.8)

Начальная скорость теплового износа изоляции:

, (5.9)

где - номинальная скорость расхода ресурса изоляции, *бч/ч*;

- абсолютная начальная температура изоляции, К.

Абсолютная начальная температура изоляции:

. (5.10)

Для определения времени перегрузки t п воспользуемся (2.61), записав его с горячего состояния. В результате получим выражение времени перегрузки:

, (5.11)

где - начальное значение первой парциальной составляющей превышения температуры масла над температурой окружающей среды при кратности силы тока, которая была до перегрузки, оС ;

- установившееся значение первой парциальной составляющей превышения температуры масла над температурой окружающей среды при заданной перегрузке, оС ;

- установившееся значение превышения температуры масла над температурой окружающей среды при заданной перегрузке , оС .

Начальное значение первой парциальной составляющей превышения температуры масла над температурой окружающей среды при кратности силы тока, которая была до перегрузки, определяем по уравнению:

, (5.12)

где T3, R3 определяем соответственно по уравнениям (2.21), (2.22).

Установившееся значение первой парциальной составляющей превышения температуры масла над температурой окружающей среды при заданном значении перегрузки определяем по уравнению (5.12).

Установившееся значение превышения температуры масла над температурой окружающей среды при заданном значении перегрузки :

. (5.13)

Предельное значение превышения температуры обмотки над температурой окружающей среды при заданной перегрузке:

. (5.14)

5.1.3. Аналитическое исследование дополнительного теплового износа изоляции при симметричных перегрузках силовых трансформаторов по температуре масла как диагностическому параметру тепловых процессов

В соответствии с приведенной выше методикой проводим аналитическое исследование тепловых процессов в силовом трансформаторе ТМ – 160/10, для которого: .3 *1/°C*; .3 ; .3 ; .3 ; .3 ; $P_{1H} = 2650$ *Вт*; $P_{2H} = 565$ *Вт*; $C_1 = 41800$ *Дж/°C* ; $C_2 = 202100$ *Дж/°C* ; $C_3 = 594000$ *Дж/°C* ; .3 ; $B = 9500$ *K*; .3 [9].

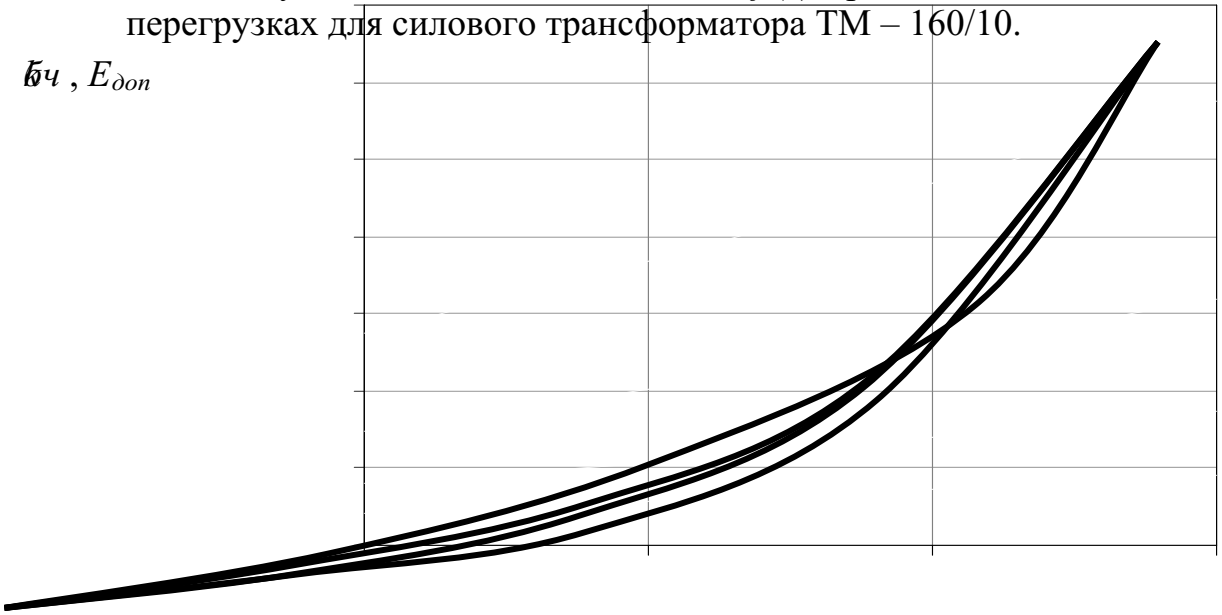
Принимаем значение начального превышения температуры масла над температурой окружающей среды, согласно требованиям [7], равное 36 *°C*, что соответствует кратности силы тока 0,96. Находим значение начального превышения температуры обмотки над температурой окружающей среды при данной кратности силы тока по (5.4), которое равно 58,8 *°C*.

Принимаем допустимое значение превышения температуры масла над температурой окружающей среды 60 *°C*.

Рассчитываем дополнительный тепловой износ изоляции ($E_{доп}$) при действии систематических перегрузок (k = 1,1; 1,15; 1,2; 1,25) и аварийных

перегрузок (k = 1,3; 1,45; 1,6; 1,75; 3) для разных значений температуры окружающей среды, согласно требованиям [7], по (5.1) – (5.10). Результаты расчетов приведены в таблице Д.1, приложения Д. На рис. 5.2 представлены зависимости $E_{доп} = f(k)$ при разных значениях температуры окружающей среды для систематических перегрузок, на рисунке 5.3 зависимости $E_{доп} = f(k)$ при разных значениях температуры окружающей среды для аварийных перегрузок.

Рисунок 5.2. Зависимости $E_{доп} = f(k)$ при систематических перегрузках для силового трансформатора ТМ – 160/10.



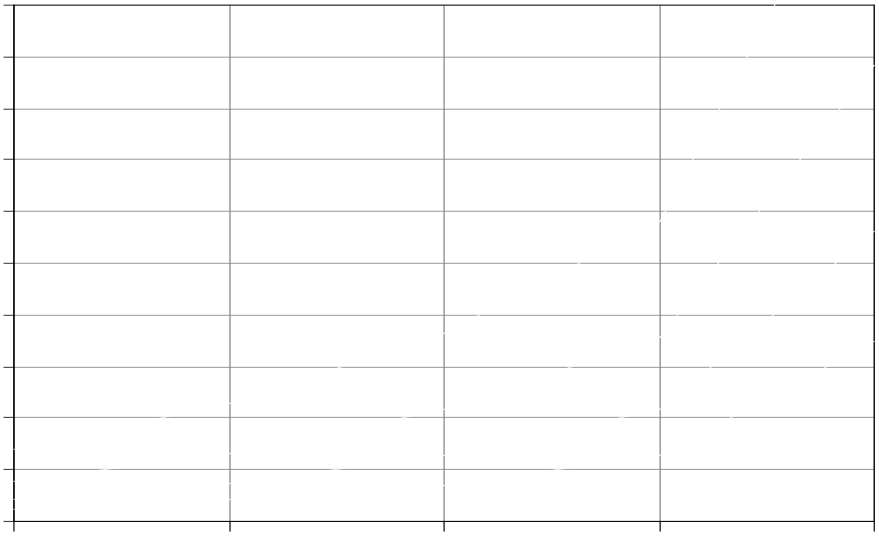


Рисунок 5.3. Зависимости Едоп f (k) при аварийных перегрузках для силового трансформатора ТМ – 160/10.

111

$k_{ч}$, $L_{изн}$. Для сравнения проводим исследования тепловых процессов в силовом трансформаторе по той же методике при систематических и аварийных перегрузках, оговоренных в [7]. Рассчитываем дополнительный тепловой износ изоляции по (5.1) – (5.10), для оговоренных в [7] значений перегрузок и времени их действия. Результаты приведены в таблице Д.2, приложения Д, зависимости Едоп f (k) при систематических перегрузках представлены на рис. 5.4 при аварийных перегрузках – на рис. 5.5.

Проведенные исследования показали что, при диагностировании тепловых процессов в силовом трансформаторе при перегрузках, начиная с нагретого состояния, по превышению температуры масла над температурой окружающей среды дополнительный тепловой износ изоляции превышает значения, полученные при расчете по рекомендациям [7]. Для трансформатора ТМ – 160/10, при кратности перегрузки в 20 % дополнительный износ изоляции выше допустимых значений в 3,7 раз, при перегрузке 75 % - 1,45 раз, при любых значениях температуры окружающей среды.

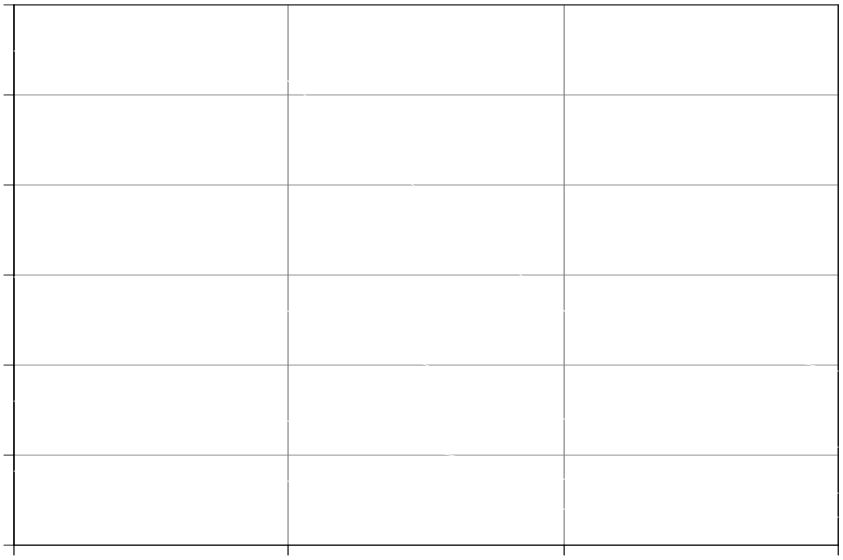


Рисунок 5.4. Зависимости Едоп f (k) при систематических перегрузках для силового трансформатора ТМ – 160/10 по рекомендациям [7].

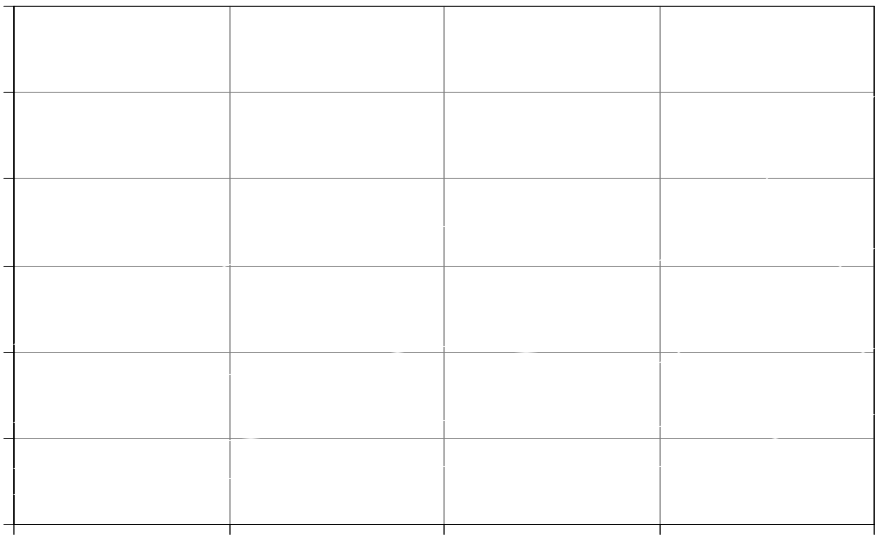


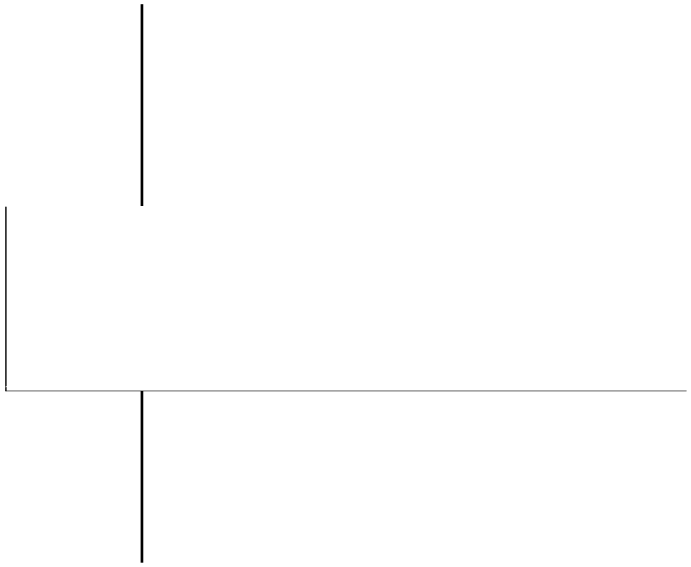
Рисунок 5.5. Зависимости Едоп f (k) при аварийных перегрузках для силового трансформатора ТМ – 160/10 по рекомендациям [7].

5.1.4. Методика аналитического исследования тепловых процессов при симметричных **допустимых** перегрузках силовых трансформаторов по кратности силы тока как диагностическому параметру тепловых процессов

Принимаем, что до перегрузки кратность силы тока была меньше номинальной, силовой трансформатор был нагрет до определенного значения превышения температуры обмотки.

Затем произошёл наброс нагрузки.

На рис. 5.6 представлены график и кривые нагрева обмотки ( ), скорости теплового износа изоляции обмотки ( ).



.Chart.8 \s

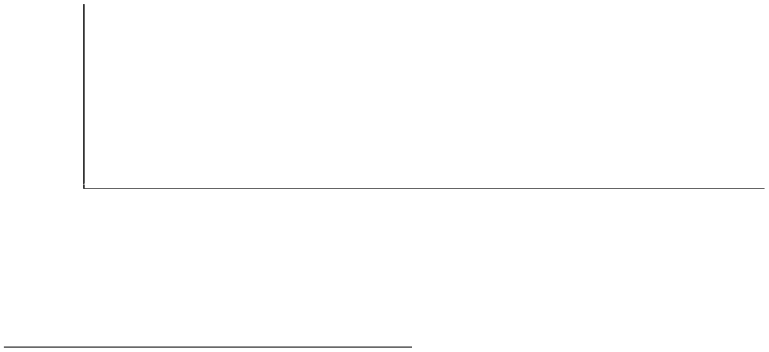


Рисунок 5.6. Зависимости при допустимой перегрузке силового трансформатора.

На рис. 5.6 приняты следующие условные обозначения:

- начальное значение кратности силы тока;
- начальное превышение температуры обмотки над температурой окружающей среды, оС;
- значение кратности силы тока при перегрузке;
- допустимое значение превышения температуры обмотки над температурой окружающей среды, оС;
- начальная скорость теплового износа изоляции, бч/ч;
- предельное значение скорости теплового износа изоляции, бч/ч;

ЕД - дополнительный тепловой износ изоляции, бч;

- время действия допустимой перегрузки, с.

Заштрихованная площадь на графике под кривой представляет собой в определенном масштабе дополнительный тепловой износ изоляции за время действия перегрузки (t п).

Составляем алгоритм исследования дополнительного теплового износа изоляции за период работы трансформатора с перегрузкой в течение времени t п.

Дополнительный тепловой износ изоляции при допустимой перегрузке равен:

.

Скорость теплового износа изоляции при в процессе действии допустимой перегрузкиперегрузки определяем по формуле:

.

Абсолютная текущая текущая температура изоляции прив течение действия допустимой перегрузкеперегрузки равна:

.

Текущее значение превышения температуры обмотки над температурой окружающей среды в течение действия допустимой перегрузкеперегрузки:

.

Установившееся значение превышения температуры обмотки над температурой окружающей среды при заданной перегрузке:

.

Начальное значение первой парциальной составляющей превышения температуры обмотки над температурой окружающей среды при кратности силы тока, которая была до перегрузки:

.

Установившееся значение первой парциальной составляющей превышения температуры обмотки над температурой окружающей среды при заданной перегрузке определяем по уравнению (5.6) при заданном значении перегрузки.

Первая парциальная составляющая постоянной времени нагрева:

.

Корень характеристического уравнения:

.

Начальная скорость теплового износа изоляции:

.

Абсолютная начальная температура изоляции:

.

Для определения времени перегрузки t п воспользуемся (5.4), в результате получим:

, (5.15)

где - допустимое значение превышения температуры обмотки над температурой окружающей среды при заданной перегрузке, оС .

5.1.5. Аналитическое исследование дополнительного теплового износа изоляции при симметричных перегрузках силовых трансформаторов по кратности силы тока как диагностическому параметру тепловых процессов

В соответствии с приведенной выше методикой проводим аналитическое исследование тепловых процессов в силовом трансформаторе ТМ – 160/10.

Начальные условия приведены в п. 5.1.3.

Принимаем допустимое значение превышения температуры обмотки над температурой окружающей среды 78 оС, согласно [13].

Рассчитываем дополнительный тепловой износ изоляции при действии систематических перегрузок (kkиложения Д. На рисунке 5.7 представлены зависимости Едоп f (k) при разных значениях температуры окружающей

среды для систематических перегрузок, на рисунке 5.8 зависимости Едоп f (k) при разных значениях температуры окружающей среды для аварийных перегрузок.

Анализируя полученные данные, можно сделать вывод о том, что при диагностировании тепловых процессов в силовом трансформаторе при перегрузках, начиная с нагретого состояния, по кратности силы тока значения дополнительного теплового износа изоляции значительно отличаются от значений, полученных по рекомендациям [7].

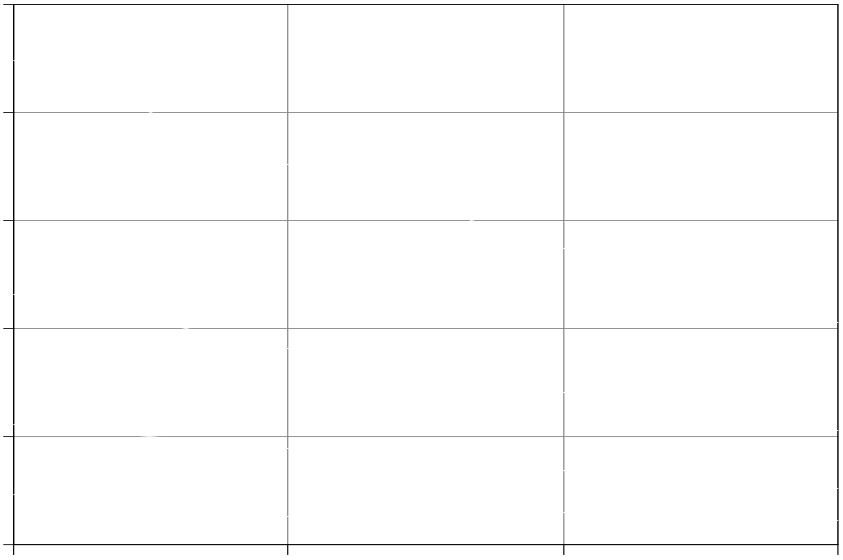


Рисунок 5.7. Зависимости Едоп f (k) при систематических перегрузках для силового трансформатора ТМ – 160/10.

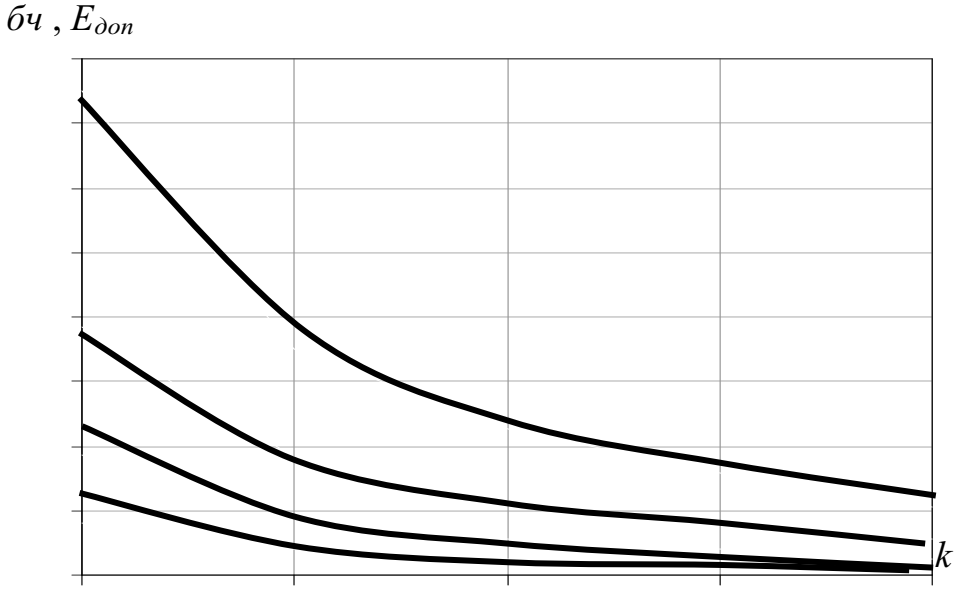


Рисунок 5.8. Зависимости Едоп f (k) при аварийных перегрузках для силового трансформатора ТМ – 160/10.

5.2. Обоснование модели функционального диагностирования силового трансформатора по температуре масла и силам токов в фазах

Рассмотрим комбинированную модель функционального диагностирования силового трансформатора по температуре масла и силам токов в его фазах.

Суммарный тепловой износ изоляции обмоток фаз силового трансформатора

; (5.16)

; (5.17)

, (5.18)

где - промежуток времени контроля, с;

- скорости теплового износа изоляции обмоток соответственно фаз «А», «В», «С» на i – ом участке, бч/ч.

Скорость теплового износа изоляции обмоток фаз на i – ом участке:

; (5.19)

; (5.20)

, (5.21)

где - абсолютная текущая температура наиболее нагретой точки обмоток соответственно фаз «А», «В», «С» на i – ом участке, К.

Абсолютная текущая температура наиболее нагретой точки обмоток фаз на i – ом участке:

; (5.22)

; (5.23)

, (5.24)

где - текущая температура наиболее нагретой точки обмоток соответственно фаз «А», «В», «С» на i – ом участке, оС.

Текущая температура наиболее нагретой точки обмоток фаз с учетом импульса квадрата сверхтока на i – ом участке:

; (5.25)

; (5.26)

, (5.27)

где - текущая температура масла, оС;

- установившиеся значения перепадов температур обмоток соответственно фаз «А», «В», «С» на i – ом участке, определяются по (3.105), (3.106), (3 .107), оС;

- установившиеся значения первых парциальных составляющих перепадов температур обмоток соответственно фаз «А», «В», «С» на i – ом участке, определяются по (3.108), (3.109), (3.110), оС;

- установившиеся значения первых парциальных составляющих перепадов температур обмоток соответственно фаз «А», «В», «С» на (i-1) участке, оС;

- коэффициент, характеризующий конструктивные параметры трансформатора, определяется по (4.24), ;

B I_H A_1 A_2 A_3 A_4 A_5 A_6 D_1 D_2

- первая парциальная составляющая постоянной времени нагрева, определяется по (3.111), с;

- соответственно импульс квадрата сверхтока в фазах «А», «В», «С» на i– ом участке, .

Импульс квадрата сверхтока в фазах трансформатора на i– ом участке:

; (5.28)

; (5.29)

, (5.30)

где tст - время действия сверхтока, с.

Кратность силы тока в фазах на i– ом участке:

; (5.31)

; (5.32)

, (5.33)

где - номинальное значение силы тока в фазах трансформатора, А ;

.3 - значения силы тока в фазах силового трансформатора на *i– ом* участке, *А*.

Структурная схема модели функционального диагностирования силового трансформатора представлена на рисунке 5.9.

Рисунок 5.9. Структурная схема модели функционального диагностирования силового трансформатора.

Для проверки адекватности модели функционального диагностирования проводим экспериментальные исследования, программа которых включает в себя следующие положения:

1. Измерение сопротивления обмоток силового трансформатора в холодном состоянии (при температуре обмоток, равной температуре охлаждающей среды).
2. Измерение температуры верхних слоев масла трансформатора в холодном состоянии.
3. Измерение температуры окружающей среды.
4. Измерение фазных токов силового трансформатора.
5. Измерение сопротивления обмоток силового трансформатора в горячем состоянии при различных значениях кратностей сил тока в фазах.
6. Измерение температуры верхних слоев масла трансформатора в горячем состоянии при различных значениях кратностей сил тока в его фазах .
7. Определение температуры обмоток трансформатора по результатам измерений.
8. Сравнительный анализ экспериментальных и теоретических зависимостей , , , .

Исследования проводим на действующем силовом трансформаторе ТМ -160/10, имеющем следующие паспортные и каталожные данные:

- номинальное напряжение высокой стороны U1H 10 кВ;
- номинальное напряжение низкой стороны U2H
- полная номинальная мощность SH 160 кВА;
- номинальный ток ;
- ток холостого хода ;
- напряжение короткого замыкания ;
- масса обмотки m1111 кг;
- масса магнитопровода m2530 кг;
- масса масла m3330 кг.

В процессе исследования выполняем измерения следующих величин:

- фазных токов – клещи электроизмерительные Ц4501 (класс точности 1,5);
- температуры окружающей среды – термометром ТУЭ – 48;
- температуры верхних слоев – термометром ТУЭ – 48;
- сопротивление обмоток силового трансформатора в холодном и горячем состоянии – измерительным мостом Р – 4833 (класс точности 0,1).

Измерения активных сопротивлений обмоток в каждой фазе силового трансформатора и температуры верхних слоев масла в холодном и горячем состоянии проводим по стандартной методике, изложенной в [106]. Общий вид установки для измерений активного сопротивления обмоток представлен

на рис. 5.10.

Активные сопротивления обмоток в фазах силового трансформатора измеряем в холодном состоянии и через час после включения нагрузки.

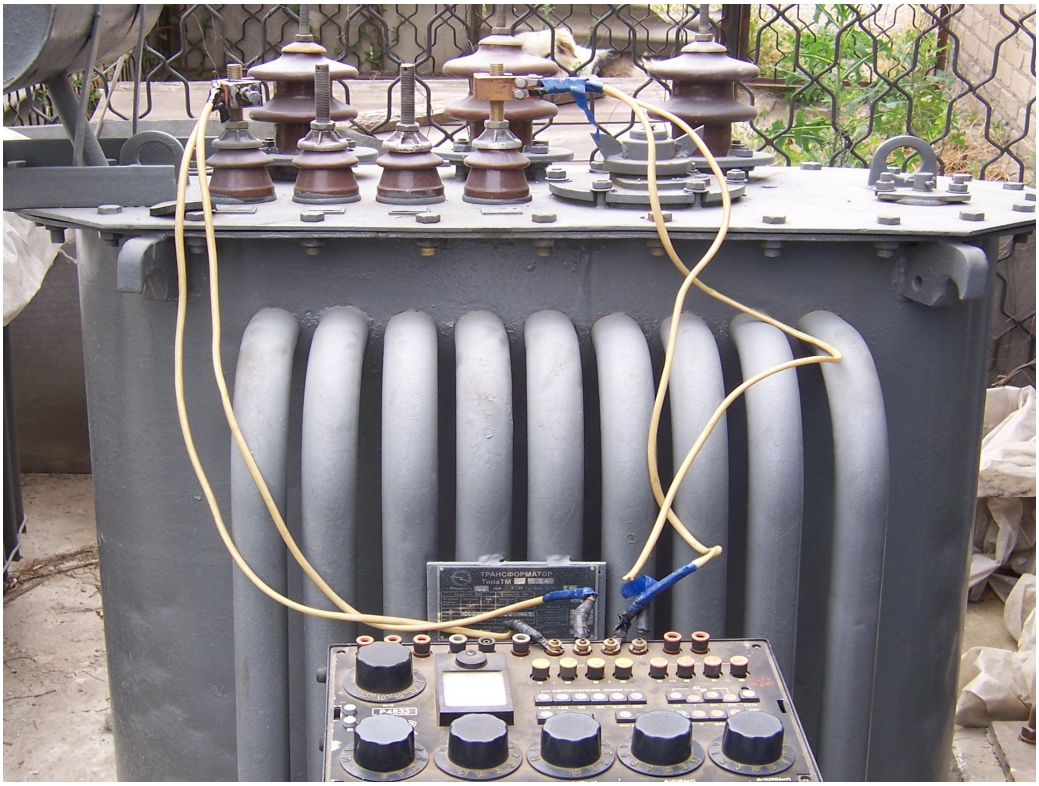


Рисунок 5.10. Общий вид установки для определения температуры обмоток по измеренным значениям активного сопротивления.

Температуру масла измеряем, начиная с холодного состояния через каждые десять минут в течение одного часа.

Силы токов в фазах силового трансформатора измеряем при включении трансформатора под нагрузку и через час работы его под нагрузкой. Кратность силы тока в фазах трансформатора определяем по формулам (5.31) – (5.33). Все измерения проводились при температурах окружающей среды 30 оС и 16 оС.

Значения средних температур обмоток каждой фазы определяем по формуле:

, (5.34)

где - активное сопротивление обмоток в нагретом состоянии, Ом;

- активное сопротивление обмоток в холодном состоянии, Ом;

- температурный коэффициент сопротивления материала обмоток, 1/оС;

- температура окружающей среды, при которой было измерено сопротивление, о С.

Результаты измерений приведены в таблице Д.4 приложения Д. На рисунках 5.11 - 5.14 точками отмечены значения температур обмоток фаз и температур масла, полученные по экспериментальным данным при соответствующих нагрузках в фазах силового трансформатора.

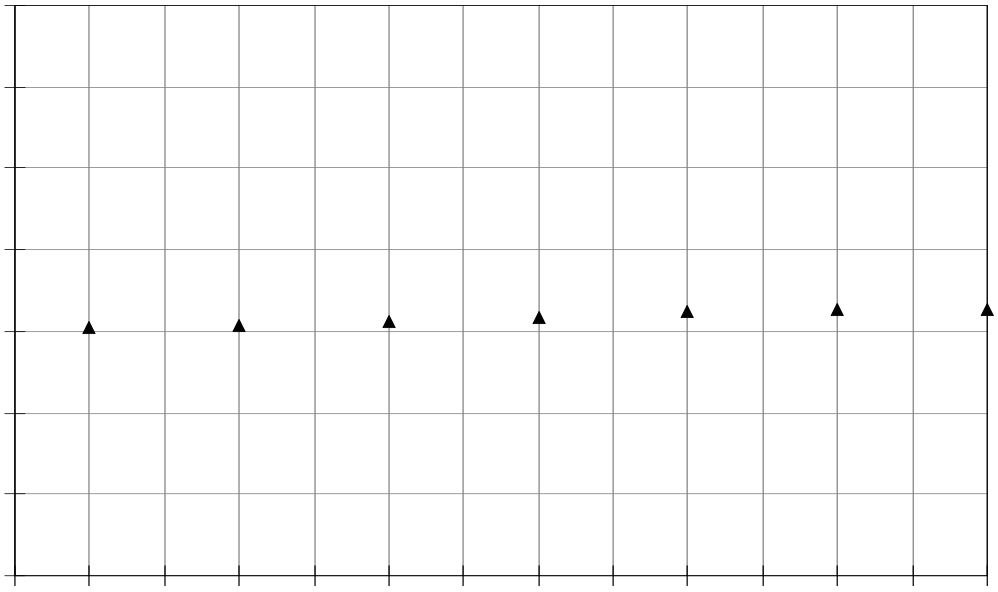


Рисунок 5.10. Экспериментальные значения и расчетные зависимости ; ; ; при kAkB = 0,65; kC oC для трансформатора ТМ-160/10.

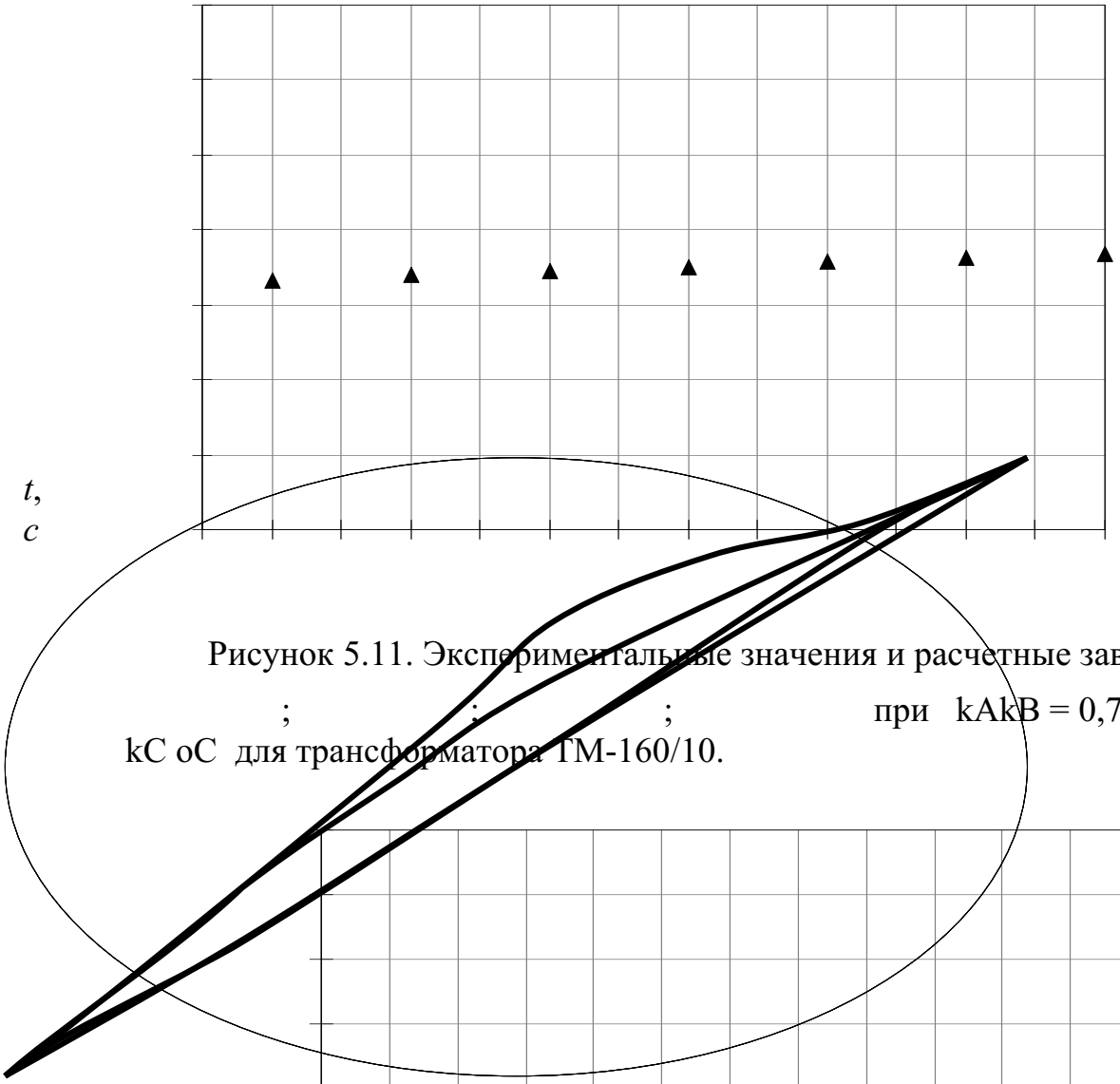


Рисунок 5.11. Экспериментальные значения и расчетные зависимости
; ; ; при kAkB = 0,78;
kC oC для трансформатора ТМ-160/10.

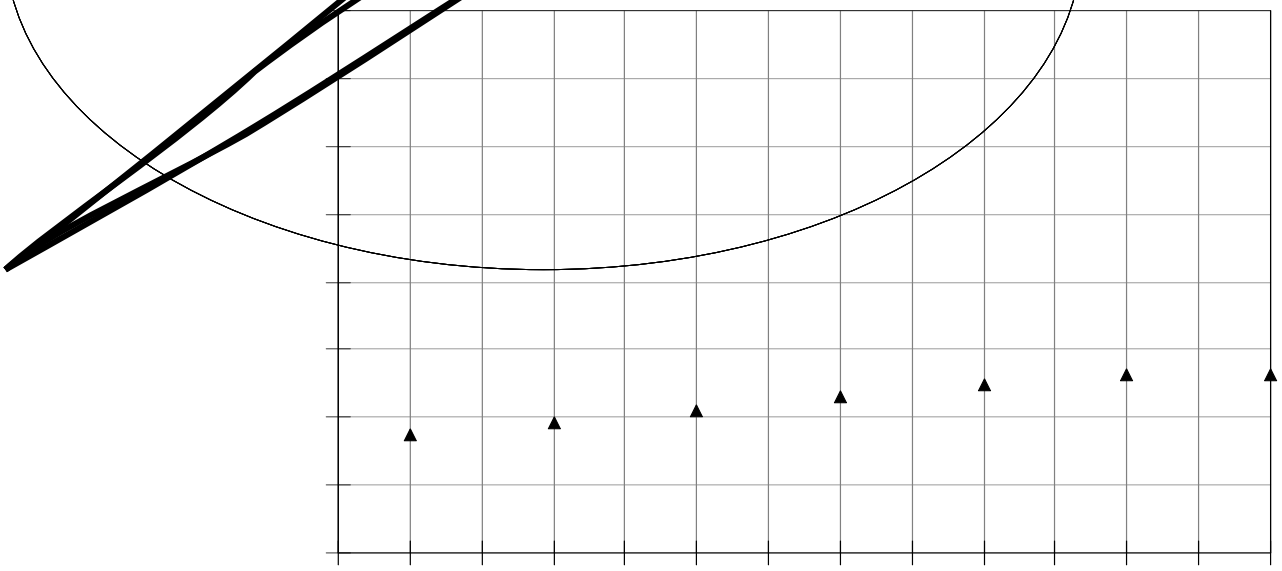


Рисунок 5.12. Экспериментальные значения и расчетные зависимости
; ; ; при kA =0,82; kB =1,0; kC =1,
15 и температуре окружающей среды 16 oC для трансформатора ТМ-160/10.

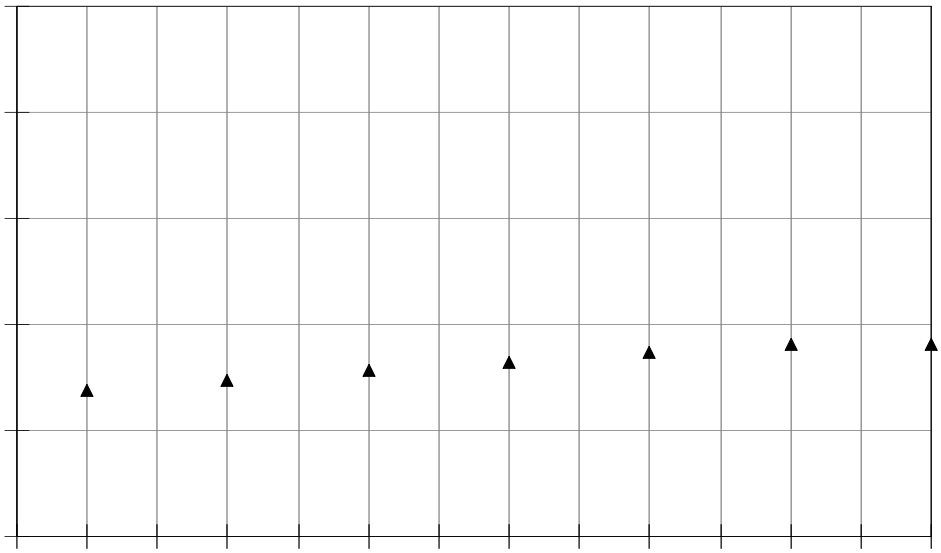


Рисунок 5.13. Экспериментальные значения и расчетные зависимости ; ; ; при kAkB = 1,0; kC оС для трансформатора ТМ-160/10.

Для проверки адекватности модели функционального диагностирования проведем расчет температур обмоток фаз силового трансформатора и масла с применением математической модели при данных эксплуатационных условиях и сравним полученные результаты с экспериментальными данными.

Зависимость рассчитываем для периода времени

и заданных значений кратностей сил токов в фазах силового трансформатора при температурах окружающей среды 30 оС и 16 оС.

Текущие значения температур масла рассчитаем по уравнению:

, (5.35)

где - определяем по уравнению (3.55) с учетом уравнений (3.44) – (3.47).

Результаты расчетов представлены в таблицах Д.5, Д.6 приложения Д, зависимости для различных значений нагрузок и температур окружающей среды представлены на рисунках 5.11 – 5.14.

Зависимости ; ; рассчитываем с применением модели функционального диагностирования представленной в п.5.2. Расчет ведем для заданных значений кратностей сил токов в фазах

трансформатора за период времени при температурах окружающей среды 30 оС и 16 оС.

Результаты расчетов представлены в таблицах Д.5, Д.6 приложения Д. На рис. 5.11 – 5.14 представлены расчетные зависимости ; ; для различных значений нагрузок и температур окружающей среды.

Результаты статистической обработки данных полученных в результате измерений и расчетов приведены в таблице 5.1. В таблице показано следующее:

- величина, значение которой измеряется или рассчитывается (А);
- абсолютная погрешность величины ( );
- относительная погрешность величины ( );
- температуры обмоток фаз, полученные при расчете с применением модели функционального диагностирования для (, ,);
- температуры обмоток фаз, полученные при расчете по измеренным сопротивлениям обмоток фаз (, ,);
- суммарный тепловой износ изоляции, полученный при расчете с применением модели функционального диагностирования (, ,);
- суммарный тепловой износ изоляции, полученный по экспериментальным данным (, ,).

Таблица 5.2

Результаты статистической обработки данных полученных в результате измерений и расчетов температур обмоток фаз и суммарного теплового износа изоляции силового трансформатора ТМ-160/10

Величина	kA kB k C			kA kB k C			kA kB k C			kA kB k C		
	A		, %	A		, %	A		, %	A		, %
, oC	35,14	3,01	7,88	39,2	1,7	4,15	41,25	3,5	7,82	53,9	1,97	3,52
, oC	38,15			40,9			44,75			55,87		
, oC	42,29	2,86	6,33	47,75	2,07	4,15	49,0	2,76	5,32	63,10	2,09	3,2
, oC	45,15			49,82			51,76			65,19		
, oC	36,2	3	7,65	40,22	1,69	4,03	57,71	3	4,94	73,54	1,98	2,62
, oC	39,2			41,91			60,71			75,52		
, бч	0,0034	0,0009	20,9	0,005	0,0006	10,7	0,0061	0,0024	28,2	0,02	0,0034	14,5
, бч	0,0043			0,0056			0,0085			0,0234		
, бч	0,0067	0,0021	23,8	0,012	0,0016	11,7	0,013	0,0032	19,7	0,048	0,0039	7,51
, бч	0,0088			0,0136			0,0162			0,0519		
, бч	0,0038	0,0012	24	0,006	0,0005	7,7	0,027	0,0086	24,15	0,102	0,0151	12,8
, бч	0,005			0,0065			0,0356			0,1171		

По результатам экспериментальных исследований можно сделать выводы:

- предложенная модель функционального диагностирования силового трансформатора позволяет определить температуру обмоток его фаз по измеренному значению температуры верхних слоев масла с учетом токовой нагрузки в фазах силового трансформатора с максимальной абсолютной по грешностью 3,5 оС и средней относительной погрешностью 5 %;

- при увеличении токовой нагрузки в фазах и времени нагрева точность модели функционального диагностирования возрастает (средняя относительная погрешность уменьшается до 3 %).

В ы в о д ы

1. Показано, что если в качестве параметра диагностирования эксплуатационных режимов работы силового трансформатора принять температуру масла, то дополнительный тепловой износ изоляции на одну перегрузку недопустимо превышает значения рекомендованные Правилами эксплуатации силовых трансформаторов. Для исследуемого трансформатора при кратности перегрузки на 20 % дополнительный износ изоляции выше допустимых значений в 3,7 раза, при перегрузке на 75 % - в 1,45 раза.
2. Показано, что если в качестве параметра диагностирования эксплуатационных режимов работы силового трансформатора принять силы токов по фазам, то при допустимых и аварийных перегрузках дополнительный тепловой износ изоляции на одну перегрузку в 4 – 5 раз отличается при разных температурах окружающей среды.
3. Для оперативного контроля и анализа эксплуатационных режимов работы силового трансформатора разработана модель функционального диагностирования силового трансформатора при несимметричной токовой нагрузке, которая позволяет контролировать температуру обмоток фаз силового трансформатора, суммарный тепловой износ изоляции по температуре масла и силе тока нагрузки в его фазах.

3. Экспериментальные исследования показали, что модель функционального диагностирования силового трансформатора позволяет определить температуру обмоток фаз силового трансформатора с заданной периодичностью по измеренной температуре верхних слоев масла с учетом кратности силы тока в фазах со средней относительной погрешностью 5 %. Этот факт даёт возможность применить её в устройстве диагностирования эксплуатационных режимов силового трансформатора, которое в свою очередь позволит произвести контроль температурного состояния трансформатора, не нарушая целостности его обмоток и правил электрической безопасности.

Результаты исследований, которые приведены в данном разделе, опубликованы в статьях [120].

(42)

где .

С учетом дополнительных обозначений получаем уравнения для определения корней уравнения (36):

(43)

(44)

(45)

2.2. Анализ тепловых проводимостей в трансформаторе

В практике инженерных расчетов нагрева электрических аппаратов вызывает затруднение определение тепловых проводимостей между телами, так как процесс распределения тепла описывается нелинейными уравнениями.

Ввиду относительно малого изменения удельной теплопроводности электротехнических проводниковых и конструкционных материалов с изменением температуры (в заданных пределах), можно принять усредненные постоянные значения теплопроводности.

С целью определения тепловых проводимостей проанализируем систему уравнений (1) для номинального установившегося эксплуатационного режима работы трансформатора.

Для номинального режима работы трансформатора система уравнений (1) примет вид:

(46)

где - потери активной мощности в обмотке и магнитопроводе в номинальном режиме, *Вт;*

- превышение температуры обмотки в номинальном режиме, C^{o};

- превышение температуры магнитопровода в номинальном режиме, C^{o} ;

- превышение температуры масла в номинальном режиме, C^{o}.

Для решения полученной системы уравнений (46) найдем общий определитель

(47)

Найдем определитель

(48)

Найдем определитель

(49)

Найдем определитель

(50)

Определяем тепловую проводимость :

(51)

Определяем тепловую проводимость

(52)

Определяем тепловую проводимость

(53)

Следовательно, определить тепловые проводимости между обмоткой, магнитопроводом и маслом можно зная номинальные значения потерь мощности и превышения температур.

Проведем анализ процесса нагрева обмотки, магнитопровода и масла трансформатора, на примере масленого трансформатора ТМ-63/10, имеющий

следующие данные:

Р А З Д Е Л 6

РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВА ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

6.1. Разработка структурной схемы устройства диагностирования силового трансформатора на базе микроконтроллера.

Учитывая специфику эксплуатационных воздействий, режимов работы силового трансформатора сельских потребительских подстанций и модель функционального диагностирования, можно сформулировать требования к устройству функционального диагностирования:

- контроль сил токов в фазах силового трансформатора и температуры верхних слоев масла;
- расчет температур обмоток фаз, суммарный расхода ресурса изоляции в каждой фазе силового трансформатора с заданной периодичностью;
- формирование сигналов при превышении температур обмоток допустимого значения;
- передача предупредительного сигнала на диспетчерский пункт;
- настройка и сохранность базовых параметров модели функционального диагностирования силового трансформатора;
- возможность расширения системы контроля оборудования подстанции, комбинаций с другими системами контроля и защиты;
- стабильность и надежность работы в условиях сельских электрических сетей;
- стоимость устройства диагностирования не должна превышать 10% стоимости объекта контроля.

На основе метода диагностирования и учитывая требования к устройству, разработана структурная схема устройства диагностирования эксплуатационных режимов работы силового трансформатора (рис. 6.1). Для реализации предложенного метода диагностирования использован однокри стальный микроконтроллер (МК), который выполняет функции: расчета текущей температуры обмоток его фаз и суммарного расхода ресурса изоляции на базе математической модели функционального диагностирования, формирования выходных сигналов, а также сохранения постоянных базовых параметров математической модели, обслуживания периферийных устройств, которые подключены к контроллеру. Микроконтроллер является основой микроконтроллерного блока (МБ) и содержит интегрированные часы реального времени, используемые для фиксирования параметров эксплуатационных режимов работы силового трансформатора и аварийных ситуаций во времени.

Рисунок 6.1. Структурная схема устройства диагностирования.

Текущие значения сил тока поступают с измерительного блока силы тока (БИТС), текущие значения температур масла – с (БИТ). Запоминающий блок (ЗУ) предназначен для архивирования информация. Собранная информация с помощью коммутационного порта (КП) передается на интерфейсное устройство (ИУ), в качестве которого выступает GSM/GPRS-модем или персональный компьютер.

6.2. Разработка устройства диагностирования

Принципиальная схема устройства диагностирования представлена в приложении Ж.2, внешний вид платы устройства представлен на рис. 6.2.

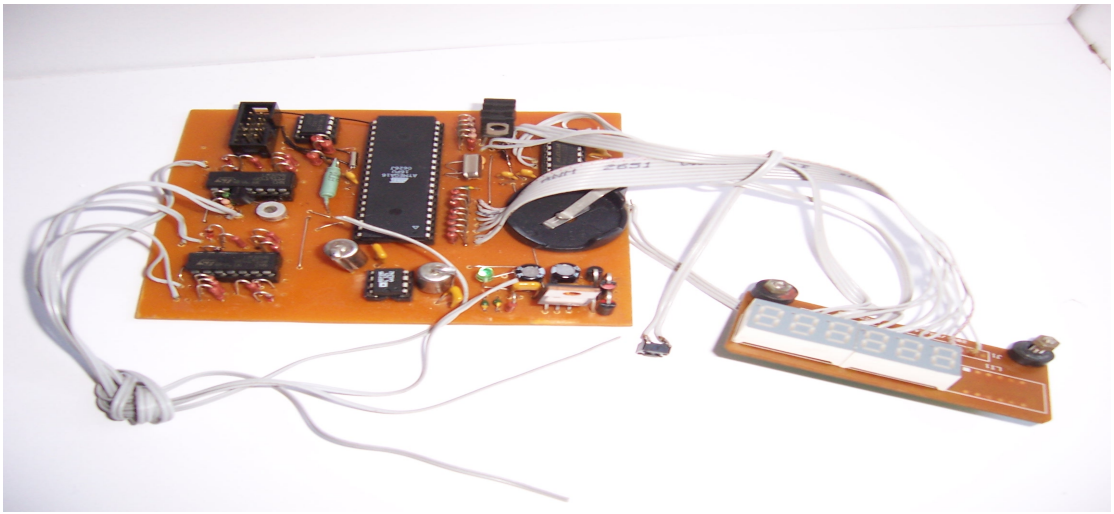


Рисунок 6.2. Плата устройства диагностирования

6.2.1. Микроконтроллерный блок

Центральным элементом устройства диагностирования является микроконтроллер DD2 типа ATmega16. Операционная частота микроконтроллера задается кварцевым резонатором XT1, а для обеспечения работы внутренних часов реального времени используется резонатор с частотой 32,768 кГц XT2. Питание аналоговой части микроконтроллера осуществляется через фильтр низких частот на дросселе L1 и конденсаторе C8. Опорное напряжение величиной 5,0 В необходимое для работы аналогово-цифрового преобразователя создается внешним источником на базе микросхемы DD11.

В устройстве предусмотрена возможность обновления программного обеспечения микроконтроллера посредством протокола JTAG через разъем XP3.

6.2.2. Блок измерения силы тока нагрузки

Переменный ток от трех первичных трансформаторов тока подается через клеммные колодки XP1 - XP3 на блок измерения силы тока БИСТ, состоящий из трех малогабаритных промежуточных трансформаторов тока

ТА1 - ТА3, преобразующих входные сигналы в напряжения пропорцио нальные токам нагрузки в фазах и осуществляющих гальваническую развязку внутренних цепей блока от цепей трансформаторов тока. С помощью выпрямителей управляемых напряжением на нагрузочных резисторах R14, R20 и R26, и построенных на базе операционных усилителей DA1, DA2, формируются сигналы, максимальные значения которых пропорциональны входному току трансформатора. Эти сигналы подаются на входы ADC0 - ADC2 микроконтроллера DD2.

6.2.3. Блок измерения температуры масла

Состоит из первичного измерительного преобразователя температуры – терморезистора с отрицательным коэффициентом сопротивления R5, – размещенного непосредственно в баке трансформатора в верхних слоях масла, разъёма XP4, источника тока DA2 и усилительного блока DA2/3. Сигнал с усилительного блока поступает на порт аналогово-цифрового преобразователя ADC3 микроконтроллера DD2.

6.2.4. Запоминающее устройство

Для хранения информации о параметрах диагностирования используется микросхема энергонезависимой памяти DD1, связь которой с микроконтроллером DD2 осуществляется по шине I^2C.

6.2.5. Коммутационный порт

Связь микроконтроллера с интерфейсными устройствами (персональным компьютером), для обмена данными, осуществляется по протоколу последовательной передачи RS-232 через разъем XP5. Необходимое преобразование уровней сигнала осуществляется микросхемой DD3, которая, в свою очередь, подключена к UART-порту микроконтроллера DD2. Коммутационный порт также используется для подключения GSM/GPRS-модема, осуществляющего передачу предупреждающих сигналов на диспетчерский пункт.

6.2.6. Блок индикации

Данные о текущем значении диагностических параметров выводятся динамическим способом на цифровой четырехразрядный семисегментный светодиодный индикатор HG1. Данные на индикатор подаются по восьми линиям порта PB (PB0 –PB7) микроконтроллера, а сигналы четырех линий управления формируются ключами на базе транзисторов VT1 – VT4 через порт PD (PD4 – PD7). Резисторы с R28 по R35 предназначены для ограничения тока индикаторов.

6.2.7. Блок питания

Универсальный импульсный блок питания (БП) состоит из понижающего трансформатора TV, выпрямительного моста VD1-VD4 и интегрального преобразователя напряжения DA1, который обеспечивает стабилизированное напряжение +5В. Мощность блока питания - 7,5 Вт. Исправное состояние блока питания сигнализируется свечением зеленого светодиода HL1, расположенного на лицевой панели устройства.

При отключенном внешнем питании устройства предусмотрено питание микроконтроллера от батареи GB1 напряжением 3,3 *В.* В момент

исчезновения напряжения на внешнем источнике питания через диод VD11 подается сигнал внешнего прерывания на вход INT микроконтроллера DD2, который переводит его в режим умеренного энергопотребления (спящий режим). При возобновлении внешнего питания этот же сигнал возвращает микроконтроллер DD2 в рабочий режим. В спящем режиме поддерживается работа только часов реального времени, все внешние по отношению к микроконтроллеру цепи остаются незадействованными.

6.3. Принцип действия устройства диагностирования

Принцип действия устройства диагностирования определяется в большей степени не схемным решением, а программным управлением микроконтроллера, так как он является основным элементом данного устройства. Блок-схема алгоритма функционирования микроконтроллера представлена на рис. 6.2.

Рисунок 6.2. Блок-схема алгоритма функционирования устройства диагностирования

Перед началом работы устройства необходимо ввести базовые параметры модели диагностирования, к которым относятся: номинальная скорость износа изоляции ( ); параметр, характеризующий класс изоляции (B); абсолютная номинальная температура изоляции ( ); коэффициент, характеризующий конструктивные параметры силового трансформатора ( ); температурный коэффициент сопротивления материала обмоток ( ); номинальное значение силы тока в фазах трансформатора ( ); уравнения установившихся значений перепадов температур в фазах ( ); уравнения установившихся значений первых парциальных составляющих перепадов температур в фазах ( ); уравнение первой парциальной постоянной времени нагрева ( ); коэффициенты A1, A2, A3,, A4, A5, A6 , D1, D2 .

Ввод данных параметров осуществляется с помощью интерфейсного устройства (персонального компьютера), к COM-порту которого подключается устройство диагностирования.

Последующая работа устройства организуется в виде бесконечного цикла.

На первом шаге производится опрос измерительных преобразователей, которые контролируют силу тока в фазах силового трансформатора и температуру масла (3).

На вход аналогово-цифрового преобразователя от блока изменения силы тока поступает выпрямленный сигнал переменного напряжения. Для получения действующего значения силы тока производятся замеры с периодичностью 2 мс, на основании которых выполняется соответствующий расчет.

Учитывая, что терморезистор имеет нелинейный коэффициент сопротивления, для повышения точности измерений используется алгоритм программной линеаризации измеренной температуры масла, реализуемой микроконтроллером [121]. Блок-схема алгоритма определения температуры масла приведена в приложении Ж.1.

Далее происходит расчет температур обмоток фаз силового трансформатора (в блоке 4) и суммарного теплового износа изоляции при данных условиях определяется (в блоке 5). Полученные параметры диагностирования сравниваются с допустимыми значениями (6) и формируются в выходной сигнал (7), на блок индикации (8), а также сохраняется в запоминающем устройстве (9).

В случае, когда температура в фазах превышает допустимое значение, формируется предупредительный сигнал и с помощью GSM/GPRS-модема посылается на диспетчерский пункт. Управление модемом осуществляется микроконтроллером программно с помощью стандартных AT- команд.

Через заданный промежуток времени цикл повторяется. Частота дискретизации определяется относительно частоты переменного сигнала и должна быть больше в два раза [122-123]. Если учесть что, температура

масла при номинальном режиме, в среднем изменяется с частотой 1°С / 540 с, то частоту дискретизации принимаем 5 минут.

При подключении устройства к персональному компьютеру возможно считывание сохраненных данных об эксплуатационных режимах работы диагностируемого силового трансформатора.

Рисунок 6.3. Общий вид устройства диагностирования.

6.4. Оценка надежности устройства диагностирования

К количественным показателям надежности устройства диагностирования относятся: вероятность безотказной работы, интенсивность отказов, среднее время наработки на отказ. Отказ любого элемента, входящего в состав устройства, приводит к потере работоспособно сти устройства в целом [124].

Вероятность безотказной работы p(t) определяем из выражения:

$$p(t) = e^{-K \cdot \lambda \cdot t}, \qquad (6.1)$$

где К – коэффициент, учитывающий влияние окружающей среды;

λ – интенсивность отказов, ч-1;

t – время работы устройства, ч.

Интенсивность отказов устройства определяем по выражению:

, (6.2)

где λ – интенсивность отказов, ч-1;

λi – интенсивность отказов i-го элемента, ч-1;

ni – количество однотипных элементов.

Среднее время наработки на отказ Тср и интенсивность отказов λ устройства связаны следующим соотношением:

Tср . (6.3)

Результаты расчетов вероятности отказов элементов устройства диагностирования приведены в таблице Ж.1 – Ж.3, исходя из которых, количественные показатели надежности следующие:

1) вероятность безотказной работы устройства p(t)
2) интенсивность отказов устройства λ = 12,43 10-6 ч;
3) среднее время безотказной работы устройства Tср =80450,5 ч.

Все расчетные показатели соответствуют среднестатистическим, следовательно, разработанное устройство диагностирования режимов работы силового трансформатора обеспечивает надежный процесс контроля количественных показателей режимов работы силового трансформатора.

6.5. Оценка экономической эффективности

Экономический эффект от внедрения устройства диагностирования достигается за счет сокращения времени на периодический осмотр силовых трансформаторов, увеличивает срок между плановыми осмотрами и профилактическими ремонтами.

Стоимость устройства диагностирования определялась по ценам розничной торговли на 15.05.2007 г. с учетом затрат на монтажные работы в размере 40% стоимости деталей устройства.

Стоимость комплекта диагностического устройства с преобразователем температуры, GSM-модулем, с учетом монтажных работ определяли следующим образом:

С ДУ.у + n Сд +Смод+ Смонт.,

(6.4)

где Су , Сд, Смод, Смонт – стоимость деталей на изготовление, соответственно одного устройства диагностирования, первичного преобразователя температуры, GSM модуля, монтажа, грн;

n – количество устройств, шт.

Проведем экономический анализ предлагаемого метода диагностирования с существующим вариантом технического сервиса на основе системы ППРЭ.

Рассмотрим базовый вариант. Он предполагает определенные суммарные затраты на содержание парка трансформаторов. Эти затраты определяются:

, (6.4)

где Зсер - сервисные затраты, которые включают в себя затраты на периодическое техническое обслуживание, текущий ремонт и прочие затраты;

Зотк - затраты из-за отказов трансформатора, включающие затраты на капитальный ремонт, демонтаж трансформатора, доставку его к месту ремонта и обратно.

Сервисные затраты зависят от стоимости технического сервиса трансформаторов определенного типоразмера (Ссер) и общего количества трансформаторов этого типоразмера, находящихся на техническом обслуживании (N):

. (6.5)

Затраты из-за отказов трансформатора зависят от стоимости ликвидации последствий отказов трансформаторов, конкретного типоразмера (Сотк) и количество трансформаторов вышедших из строя этого типоразмера , находящихся на техническом обслуживании (Nотк):

. (6.6)

Следовательно, суммарные затраты можно представить в виде:

. (6.7)

Выражения (6.4) – (6.7) отражают общие закономерности возникновения материальных затрат при техническом обслуживании трансформаторов. Если рассчитать суммарные затраты за определенный промежуток времени, например годовые (Зсум(год)), то необходимо учитывать усредненную стоимость годового сервиса трансформатора и процент отказа за год трансформаторов от их общего числа (коэффициент отказа - Котк):

. (6.8)

На основании статистических данных [125] можно принять Котк

Следовательно, одним из путей снижения суммарных годовых затрат является повышение уровня сервиса. Этого позволяет добиться новый вариант сервиса, предусматривающий внедрение устройства функционального диагностирования. Годовые суммарные затраты при внедрении этого устройства зависят от стоимости устройства, стоимости дополнительного сервиса за год, затрат времени на проведение монтажа, наладку и испытания устройства диагностирования, стоимость услуг связи, оплата труда персонала, стоимости электроэнергии и прочие расходы.

Таким образом, суммарные затраты за год при внедрении устройства диагностирования составят:

. (6.9)

Следовательно, снижение убытков от незапланированных выходов из строя силовых трансформаторов по причине низкого технического обслуживания или годовая прибыль будет равна:

. (6.10)

В свою очередь, экономическая эффективность (Э) от внедрения устройства диагностирования составит:

. (6.11)

Подставив в (6.11) уравнения (6.10) и (6.9) получим:

. (6.12)

Выразим стоимость ликвидации последствий отказа трансформатора через цену нового трансформатора (Цт). Согласно [126, 127] ориентировочно можно принять:

СоткЦт. (6.13)

Стоимость дополнительного сервиса, выраженная через стоимость нового трансформатора, будет определяться:

Цт. (6.14)

Следовательно, экономическая эффективность от внедрения устройства диагностирования составит:

1,82. (6.15)

Таким образом, убытки от незапланированных выходов из строя силовых трансформаторов снизятся почти в два раза.

Расчет стоимости затрат на капитальный ремонт силовых трансформаторов произведем с учетом таблицы цен на капремонты (от 14.06. 2007 г.) ООО «Магнит». Исходные данные для расчета экономической эффективности представлены в таблице Ж.4.

Годовой экономический эффект от снижения затрат при использовании диагностирующего устройства в связи с заменой вышедшего из строя силового трансформатора на новый или при капитальном ремонте его определим по формулам:

$$Эгсум – Знт ДУ; \quad (6.16)$$

$$Эгсум– Зкр ДУ. \quad (6.17)$$

Срок окупаемости устройства диагностирования определим по выражению:

$$ТокУД / Эг. \quad (6.18)$$

Показатели технико-экономической эффектности при внедрения устройства диагностирования режимов работы силового трансформатора для потребительской подстанции с силовым трансформатором 160/ 10-0,4 Приморского РЭС Запорожской области приведены в таблице Ж. 5.

Выводы

1. Разработанное устройство функционального диагностирования эксплуатационных режимов работы силового трансформатора позволяет определять, по температуре верхних слоев масла и силам токов в фазах, с учетом базовых параметров тепловой схемы замещения, температуры наиболее нагретых точек обмоток фаз и суммарный тепловой расход ресурса изоляции, не нарушая целостности обмоток. В случае превышения температуры наиболее нагретых точек обмоток фаз допустимых значений согласно [13] формируется и передается предупредительный сигнал на диспетчерский пункт.
2. Технико-экономические расчеты показали, что вероятность безотказной работы устройства составляет 0,986, среднее время безотказной работы 80450,5 часов, что убытки от незапланированных выходов из строя силовых трансформаторов снизятся почти в два раза.
3. Годовой экономический эффект от внедрения устройства диагностирования режимов работы на подстанции с силовым трансформатором ТМ-160/ 10-0,4 составляет 2300 грн., капитальные затраты окупаются за один год.

Результаты исследований, которые приведены в данном разделе, опубликованы в статье [129, 130].

ВЫВОДЫ

В диссертационной работе приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований для решения научно-технической задачи, состоящей в обосновании метода и разработке технического средства функционального диагностирования эксплуатационных режимов работы сило вых трансформаторов сельских потребительских подстанций с целью повышения их эксплуатационных показателей. На базе полученных результатов исследований сделаны следующие выводы:

1. Теоретически обоснована необходимость рассмотрения тепловых процессов в силовом трансформаторе как в гетерогенной системе, состоящей из трех тел при симметричной перегрузке и пяти тел при несимметричной перегрузке.
2. Предложена методика определения тепловых проводимостей между телами тепловой схемы замещения и окружающей средой на базе экспериментальных данных, полученных в опытах холостого хода и короткого замыкания. Для исследуемого трансформатора тепловые проводимости равны: между обмоткой и маслом – 130 , между обмоткой и магнитопроводом – 40,1 , между магитопроводом и маслом – 52 , между маслом и окружающей средой – 100 .
3. Получены уравнения нагрева каждого тела при симметричной перегрузке состоящие из трех парциальных установившихся превышений температуры тела над температурой окружающей среды и трех парциальных постоянных времени нагрева. Для исследуемого трансформатора парциальные постоянные времени нагрева в номинальном режиме работы равны: первая – 10525 с, вторая – 1666 с, третья – 246 с. Показано, что с достаточной степенью точности уравнения нагрева тел могут быть записаны как уравнения разности установившегося превышения температуры тела над температурой окружающей среды и первой парциальной экспоненты.

4. Получены уравнения нагрева каждого тела при несимметричной перегрузке, состоящие из пяти парциальных установившихся превышений температуры тела над температурой окружающей среды и пяти парциальных постоянных времени нагрева. Для исследуемого трансформатора парциальные постоянные времени нагрева в номинальном режиме работы равны: первая – 10525 с, вторая – 1666 с, третья и четвертая – 262 с, пятая - 246 с. Показано, что с достаточной степенью точности уравнения нагрева тел могут быть записаны как уравнения разности установившегося превышения температуры тела над температурой окружающей среды и первой парциальной экспоненты.
5. Для описания тепловых процессов при действии сверхтоков получено уравнение нагрева обмотки как адиабатического процесса. В этом уравнение использованы следующие показатели: импульс квадрата сверхтока, конструктивный коэффициент, критерий нагревания. Для исследуемого трансформатора конструктивный коэффициент равен

   1/( ), при импульсе квадрата сверхтока, равном

   2352 , критерий нагревания равен 0,007 .
6. Показано, что, если в качестве параметра диагностирования эксплуатационных режимов работы силового трансформатора принять температуру масла, то дополнительный тепловой износ изоляции на одну перегрузку недопустимо превышает значения, рекомендованные Правилами эксплуатации силовых трансформаторов. Для исследуемого трансформатора при кратности перегрузки на 20 % дополнительный износ изоляции выше допустимых значений в 3,7 раза, при перегрузке на 75 % - в 1,45 раза.
7. Показано, что, если в качестве параметра диагностирования эксплуатационных режимов работы силового трансформатора принять силы токов по фазам, то при допустимых и аварийных перегрузках дополнительный тепловой износ изоляции на одну перегрузку в 4 – 5 раз отличается при разных температурах окружающей среды.
8. Предложена методика функционального диагностирования эксплуатационных режимов работы силовых трансформаторов сельских потребительских подстанций по температуре масла и кратностям сил токов в фазах. Экспериментальная проверка показала, что предложенная модель функционального диагностирования с достаточной степенью точности описывает фактические процессы нагрева обмоток силового трансформатора. Для исследуемого трансформатора значение температуры наиболее нагретой точки обмотки, полученное экспериментально, отличается от значения температуры полученного из модели не более чем на 5 %.
9. Разработано устройство функционального диагностирования эксплуатационных режимов работы силового трансформатора. Вероятность безотказной работы устройства составляет 0,986; среднее время безотказной работы 80450,5 часов. Устройство внедрено в Приморском РЭС Запорожской области и в Тячевском РЭС

Закарпатской области. Годовой экономический эффект на одну трансформаторную подстанцию составляет 2300 грн.

П Р И Л О Ж Е Н И Я

Приложение А

А.1. Результаты экспериментальных исследований в опытах холостого хода и короткого замыкания

Расчет:

В опытах холостого хода и короткого замыкания выполнялось по пять не зависимых измерений и расчетов величин для уменьшения влияния случайных помех. Значения, полученные в результате измерений (расчетов), обозначены А1, А2, А3, А4, А5 в таблицах А.1, А.2. В таблицах «среднее значение» показано следующее:

1) для строк, содержащих измеренные (рассчитанные) значения величины, - среднее арифметическое значение величины, рассчитанное по формуле [107 – 111] :

; (1)

2) для строк, содержащих абсолютные погрешности измерения (расчета) значения величины,- среднеквадратическое отклонение значения величины, рассчитанное по формуле [107 – 111]:

. (2)

Таблица А.1

Результаты измерений в опытах холостого хода и короткого замыкания для силового трансформатора ТМ-160/10

Величины	А1	А2	А3	А4	А5	Сред. значения
РАхх, Вт	565	564,8	565	565,2	564,9	564,98
РВхх, Вт	565,3	565	565	565	564,8	565,02
РСхх, Вт	565	564,8	565	565,2	565	565
Рср.хх, Вт	565,1	564,87	565	565,13	564,9	565
, Вт	-0,1	0,133	0	-0,133	0,1	0,0527
РАкз, Вт	2650	2651	2650	2651	2649,8	2650,36
РВкз, Вт	2649,8	2650	2650	2650	2650	2649,96
РСкз, Вт	2649,9	2650	2650	2650	2650	2649,98
Рср.кз, Вт	2649,9	2650,33	2650	2650,33	2649,93	2650,1
, Вт	0,2	-0,233	0,1	-0,233	0,167	0,0966
, оС	27,25	27,24	27,26	27,28	27,27	27,26
, оС	0,01	0,02	0	-0,02	-0,01	0,00108
, оС	32,48	32,48	32,49	32,5	32,5	32,49
, оС	0,01	0,01	0	-0,01	-0,01	0,0044
, оС	25,64	25,69	25,6	25,66	25,63	25,644
, оС	0,004	-0,046	0,044	-0,016	0,014	0,015
, оС	19,99	19,98	20	20,01	20,02	20
, оС	0,01	0,02	0	-0,01	-0,02	0,007
, оС	68,85	68,84	68,86	68,88	68,87	68,86
, оС	0,01	0,02	0	-0,02	-0,01	0,007
, оС	59	59,02	59,06	59,12	59,1	59,06
, оС	0,06	0,04	0	-0,06	-0,04	0,0228
, оС	51,44	51,47	51,5	51,56	51,53	51,5
, оС	0,06	0,03	0	-0,06	-0,03	0,0212
, оС	24,99	24,98	25	25,01	25,02	25
, оС	0,01	0,02	0	-0,01	-0,02	0,007

А.2 Определение тепловых проводимостей силового трансформатора ТМ-160/10 по результатам опытов холостого хода и короткого замыкания.

Исходные данные: , , , , , , , , P1H, P2H.

Расчет

1. ;
2. ;
3. ;
4. ;
5. ;
6. ;
7. ;
8. ;
9.
10.

Таблица А.2

Результаты расчетов превышений температур обмоток, магнитопровода, масла над температурой окружающей среды и тепловых проводимостей по данным опытов холостого хода и короткого замыкания для силового трансформатора ТМ-160/10

Величины	А1	А2	А3	А4	А5	Средние значения
, оС	7,26	7,26	7,26	7,27	7,25	7,26
, оС	0	0	0	-0,01	0,01	0,0031
, оС	12,49	12,5	12,49	12,49	12,48	12,49
, оС	0	-0,01	0	0	0,01	0,0031
, оС	5,65	5,71	5,6	5,65	5,61	5,644
, оС	-0,006	-0,066	0,044	-0,006	0,034	0,0193
, оС	43,86	43,86	43,86	43,87	43,85	43,86
, оС	0	0	0	-0,01	0,01	0,0031
, оС	34,01	34,04	34,06	34,11	34,08	34,06
, оС	0,05	0,02	0	-0,05	-0,02	0,017
, оС	26,45	26,49	26,5	26,55	26,51	26,5
, оС	0,05	0,01	0	-0,05	-0,01	0,0161
, Вт/ оС	39,9	38,67	41	40,42	40,72	40,142
,Вт/ оС	0,242	1,472	-0,858	-0,278	-0,578	0,4106
, Вт/ оС	129,62	130,72	129,58	130,22	129,87	130
,Вт/ оС	0,382	-0,718	0,422	-0,218	0,132	0,2126
, Вт/ оС	52,14	53,32	50,82	51,77	51,23	51,99
	-0,15	-1,33	1,17	0,22	0,76	0,4351

,Вт/ оС						
, Вт/ оС	100,02	98,92	100,8	99,89	100,4	100
,Вт/ оС	-0,014	1,086	-0,794	0,116	-0,394	0,3145

А.3. Алгоритм расчета кривых нагрева обмоток магнитопровода и масла силового трансформатора ТМ -160/10 (расчет выполнен с применением программного обеспечения «Maple 9,5»).

Исходные данные: m1, m2, m3, c01, c02, c03, .3 , .3 , .3 , .3 , .3 ,, P_{1H}, P_{2H}, k.

Расчет

```
> P1:=2650; P2:=565; al:=.004; tau1x:=7.26; tau2x:=12.49; tau3x:=5.
63; tau1k:=43.86; tau2k:=34.06; tau3k:=26.5; m1:=110; m2:=430; m3:=
330; c01:=380; c02:=470; c03:=1800; Lambda12:=40.04; Lambda13:=130.05;
Lambda23:=51.99; Lambda3:=100;k:=1.0;
```

```
> c1:=c01*m1;
```

```
> c2:=c02*m2;

> c3:=c03*m3;

> K :=c1*c2*c3;

> L := c1*c2*(Lambda13+Lambda23+Lambda3)+c1*c3*(Lambda12+Lambda23)+
c2*c3*(Lambda12+Lambda13-P1*al*k^2);

> T:=c1*(Lambda12*Lambda13+Lambda12*Lambda23+Lambda13*Lambda23+
Lambda23*Lambda3+Lambda12*Lambda3)+c2*(Lambda12*Lambda13+Lambda12*
Lambda23+Lambda12*Lambda3+Lambda13*Lambda23+Lambda13*Lambda3-al*P1*k
^2*Lambda13-al*P1*k^2*Lambda23-al*P1*k^2*Lambda3)+c3*(Lambda12*
Lambda23+Lambda12*Lambda13+Lambda13*Lambda23-al*P1*k^2*Lambda23-al*
P1*k^2*Lambda12);

> R:=(Lambda12*Lambda23*Lambda3+Lambda12*Lambda13*Lambda3+Lambda13*
Lambda23*Lambda3)-al*P1*k^2*(Lambda12*Lambda13+Lambda12*Lambda23+
Lambda12*Lambda3+Lambda13*Lambda23+Lambda23*Lambda3);

> L1:=c2*c3*P1*k^2;

> T1:=c2*P1*k^2*(Lambda13+Lambda23+Lambda3)+c3*P1*k^2*(Lambda12+
Lambda23)+c3*P2*Lambda12;

> R1:=P1*k^2*(Lambda12*Lambda13+Lambda12*Lambda23+Lambda12*Lambda3+
Lambda13*Lambda23+Lambda23*Lambda3)+P2*(Lambda23*Lambda13+Lambda12*
Lambda13+Lambda12*Lambda23+Lambda12*Lambda3);

> L2:=c1*c3*P2;

> T2:=P2*c1*(Lambda13+Lambda23+Lambda3)+P2*c3*(Lambda12+Lambda13-al*
P1*k^2)+P1*k^2*c3*Lambda12;

> R2:=P2*(Lambda12*Lambda23+Lambda12*Lambda13+Lambda12*Lambda3+
Lambda13*Lambda23+Lambda13*Lambda3)+P1*k^2*(Lambda13*Lambda23+
Lambda12*Lambda13+Lambda12*Lambda23+Lambda12*Lambda3)-P2*al*P1*k^2*(
Lambda13+Lambda23+l3);

> T3:=c2*P1*k^2*Lambda13+c3*P2*Lambda23;

> R3:=P1*k^2*(Lambda12*Lambda23+Lambda12*Lambda13+Lambda13*Lambda23
)+P2*(Lambda13*Lambda23+Lambda12*Lambda13+Lambda12*Lambda23)-al*k^2*
P1*Lambda23*P2;
```

```
> pp:=solve(K*p^3+L*p^2+T*p+R=0,p);

> pp1:=pp[3];pp2:=pp[2]; pp3:=pp[1];



> tau1:= R1/R+((L1*pp1^2+T1*pp1+R1)/(pp1*(3*K*pp1^2+2*L*pp1+T)))*exp
(t/pp1)+((L1*pp2^2+T1*pp2+R1)/(pp2*(3*K*pp2^2+2*L*pp2+T)))*exp(t/pp2
)+((L1*pp3^2+T1*pp3+R1)/(pp3*(3*K*pp3^2+2*L*pp3+T)))*exp(t/pp3);



> tau2:=R2/R+((L2*pp1^2+T2*pp1+R2)/(pp1*(3*K*pp1^2+2*L*pp1+T)))*exp(
pp1*t)+((L2*pp2^2+T2*pp2+R2)/(pp2*(3*K*pp2^2+2*L*pp2+T)))*exp(pp2*t
)+((L2*pp3^2+T2*pp3+R2)/(pp3*(3*K*pp3^2+2*L*pp3+T)))*exp(pp3*t);



> tau3:=(R3/R+((T3*pp1+R3)/(pp1*(3*K*pp1^2+2*L*pp1+T)))*exp(pp1*t
)+((T3*pp2+R3)/(pp2*(3*K*pp2^2+2*L*pp2+T)))*exp(pp2*t)+((T3*pp3+R3)/
(pp3*(3*K*pp3^2+2*L*pp3+T)))*exp(pp3*t));



> tau1y:=R1/R;

> tau1y':=-((L1*pp1^2+T1*pp1+R1)/(pp1*(3*K*pp1^2+2*L*pp1+T)))*exp(
t/pp1);

> tau1y'':=-((L1*pp2^2+T1*pp2+R1)/(pp2*(3*K*pp2^2+2*L*pp2+T)))*exp(
t/pp2);

> tau1y''':=-((L1*pp3^2+T1*pp3+R1)/(pp3*(3*K*pp3^2+2*L*pp3+T)))*exp(
t/pp3);

> tau2y:=R2/R;

> tau2y':=-((L2*pp1^2+T2*pp1+R2)/(pp1*(3*K*pp1^2+2*L*pp1+T)))*exp(
t/pp1);

> tau2y'':=-((L2*pp2^2+T2*pp2+R2)/(pp2*(3*K*pp2^2+2*L*pp2+T)))*exp(
t/pp2);
```

```
> tau2y’’’:=-((L2*pp3^2+T2*pp3+R2)/(pp3*(3*K*pp3^2+2*L*pp3+T)))*exp(
t/pp3);


> tau3y:=R3/R;

> tau3y’:=-((T3*pp1+R3)/(pp1*(3*K*pp1^2+2*L*pp1+T)))*exp(t/pp1);


> tau3y’’:=-((T3*pp2+R3)/(pp2*(3*K*pp2^2+2*L*pp2+T)))*exp(t/pp2);


> tau1y’’’:=-((T3*pp3+R3)/(pp3*(3*K*pp3^2+2*L*pp3+T)))*exp(t/pp3);
```

Таблица А.31.

Расчетные данные кривых нагрева составляющих превышений температуры обмотки, магнитопровода и масла и эквивалентной кривой нагрева обмотки при температуре для силового трансформатора ТМ-160/10 при k = 1. окружающей среды 27 °С.

t	.3											
c	oC	oC	oC	oC	oC	oC	oC	oC	oC	oC	oC	oC
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
258740 08.4	**11.27** 23,48	9,73	-0,1	14,55	**0.24**9, 62	11,2	-0,75	-0,73	**6.73**7, 34	7,86	1,07	-1,1
6012. 65635	**16.11** 32,72	19,72	-0,13	14,55	**0.29**20, 48	22,69	-0,95	-0,73	**6.739** 15,91	15,93	1,36	-1,1
12025. 27279	**28.05** 36,52	23,75	-0,137	14,55	**0.35**24, 93	27,33	-0,97	-0,73	**6.74**18, 24	19,18	1,4	-1,1
18037. 810543	**36.89** 42,69	30,11	-0,138	14,55	**0.366** 32,25	34,64	-0,98	-0,73	**6.74**23, 27	24,31	1,4	-1,1
24050. 412963	**43.44** 46,27	33,69	-0,138	14,55	**0.369** 36,46	38,77	-0,98	-0,73	**6.74**26, 15	27,21	1,4	-1,1
300631 5328	**48.29** 49,13	36,48	-0,138	14,55	**0.37**39, 83	41,98	-0,98	-0,73	**6.74**28, 43	29,47	1,4	-1,1
36075. 618557	**51.89** 52,22	39,41	-0,138	14,55	**0.37**43, 47	45,35	-0,98	-0,73	**6.74**30, 91	31,83	1,4	-1,1
42088. 220980	**54.55** 54,15	41,09	-0,138	14,55	**0.37**45, 61	47,28	-0,98	-0,73	**6.74**32, 36	33,19	1,4	-1,1
48100. 823428	**56.52** 55,52	42,44	-0,138	14,55	**0.37**47, 37	48,83	-0,98	-0,73	**6.74**33, 52	34,27	1,4	-1,1

54113. 425873	**57.98** 56,73	43,5	-0,138	14,55	48,82**0.** **37**	50,1	-0,98	-0,73	34,56**6.** **74**	35,13	1,4	-1,1
601262 8300	57,72 **59.06**	44,34	-0,138	14,55	**0.37**49, 91	51,02	-0,98	-0,73	**6.74**35, 33	35,81	1,4	-1,1
31530	58,74	45,19	-0,138	14,55	51,22	52,0	-0,98	-0,73	36,1	36,5	1,4	-1,1
33974	59,34	45,69	-0,138	14,55	51,96	52,57	-0,98	-0,73	36,95	36,9	1,4	-1,1
36352	59,83	46,07	-0,138	14,55	52,41	53,0	-0,98	-0,73	36,91	37,2	1,4	-1,1
38805	60,24	46,38	-0,138	14,55	52,91	53,36	-0,98	-0,73	37,32	37,4	1,4	-1,1

А.4. Алгоритм расчета парциальных составляющих установившихся превышений температур обмоток, магнитопровода и масла при различных значениях кратности силы тока. (расчет выполнен с применением программного обеспечения «Maple 9,5»).

Исходные данные:m1, m2, m3, c01, c02, c03, .3 , .3 , .3 , .3 , .3 ,, P_{1H}, P_{2H}.

Переменные данные: k = 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0; 1,1; 1,2; 1,3; 1,4; 1,5.

Расчет

```
> P1:=2650; P2:=565; al:=.004; tau1x:=7.26; tau2x:=12.49; tau3x:=5.63
; tau1k:=43.86; tau2k:=34.06; tau3k:=26.5; m1:=110; m2:=430; m3:=330;
c01:=380; c02:=470; c03:=1800; Lambda12:=40.04; Lambda13:=130.05;
Lambda23:=51.99; Lambda3:=100;k:=1.0;
```

```
> c1:=c01*m1;
```

```
> c2:=c02*m2;
```

```
> c3:=c03*m3;
```

```
> K :=c1*c2*c3;

> L := c1*c2*(Lambda13+Lambda23+Lambda3)+c1*c3*(Lambda12+Lambda23)+c2*
c3*(Lambda12+Lambda13-P1*al*k^2);

> T:=c1*(Lambda12*Lambda13+Lambda12*Lambda23+Lambda13*Lambda23+
Lambda23*Lambda3+Lambda12*Lambda3)+c2*(Lambda12*Lambda13+Lambda12*
Lambda23+Lambda12*Lambda3+Lambda13*Lambda23+Lambda13*Lambda3-al*P1*k^2
*Lambda13-al*P1*k^2*Lambda23-al*P1*k^2*Lambda3)+c3*(Lambda12*Lambda23+
Lambda12*Lambda13+Lambda13*Lambda23-al*P1*k^2*Lambda23-al*P1*k^2*
Lambda12);

> R:=(Lambda12*Lambda23*Lambda3+Lambda12*Lambda13*Lambda3+Lambda13*
Lambda23*Lambda3)-al*P1*k^2*(Lambda12*Lambda13+Lambda12*Lambda23+
Lambda12*Lambda3+Lambda13*Lambda23+Lambda23*Lambda3);

> L1:=c2*c3*P1*k^2;

> T1:=c2*P1*k^2*(Lambda13+Lambda23+Lambda3)+c3*P1*k^2*(Lambda12+
Lambda23)+c3*P2*Lambda12;

> R1:=P1*k^2*(Lambda12*Lambda13+Lambda12*Lambda23+Lambda12*Lambda3+
Lambda13*Lambda23+Lambda23*Lambda3)+P2*(Lambda23*Lambda13+Lambda12*
Lambda13+Lambda12*Lambda23+Lambda12*Lambda3);

> L2:=c1*c3*P2;

> T2:=P2*c1*(Lambda13+Lambda23+Lambda3)+P2*c3*(Lambda12+Lambda13-al*P1
*k^2)+P1*k^2*c3*Lambda12;

> R2:=P2*(Lambda12*Lambda23+Lambda12*Lambda13+Lambda12*Lambda3+
Lambda13*Lambda23+Lambda13*Lambda3)+P1*k^2*(Lambda13*Lambda23+Lambda12
*Lambda13+Lambda12*Lambda23+Lambda12*Lambda3)-P2*al*P1*k^2*(Lambda13+
Lambda23+l3);

> T3:=c2*P1*k^2*Lambda13+c3*P2*Lambda23;

> R3:=P1*k^2*(Lambda12*Lambda23+Lambda12*Lambda13+Lambda13*Lambda23)+
P2*(Lambda13*Lambda23+Lambda12*Lambda13+Lambda12*Lambda23)-al*k^2*P1*
Lambda23*P2;

> pp:=solve(K*p^3+L*p^2+T*p+R=0,p);

> pp1:=pp[3];pp2:=pp[2]; pp3:=pp[1];
```

```
> tau1y:=R1/R;

> tau1y':=-((L1*pp1^2+T1*pp1+R1)/(pp1*(3*K*pp1^2+2*L*pp1+T)))*exp(
t/pp1);

> tau1y'':=-((L1*pp2^2+T1*pp2+R1)/(pp2*(3*K*pp2^2+2*L*pp2+T)))*exp(
t/pp2);

> tau1y''':=-((L1*pp3^2+T1*pp3+R1)/(pp3*(3*K*pp3^2+2*L*pp3+T)))*exp(
t/pp3);

> tau2y:=R2/R;

> tau2y':=-((L2*pp1^2+T2*pp1+R2)/(pp1*(3*K*pp1^2+2*L*pp1+T)))*exp(
t/pp1);

> tau2y'':=-((L2*pp2^2+T2*pp2+R2)/(pp2*(3*K*pp2^2+2*L*pp2+T)))*exp(
t/pp2);

> tau2y''':=-((L2*pp3^2+T2*pp3+R2)/(pp3*(3*K*pp3^2+2*L*pp3+T)))*exp(
t/pp3);

> tau3y:=R3/R;

> tau3y':=-((T3*pp1+R3)/(pp1*(3*K*pp1^2+2*L*pp1+T)))*exp(t/pp1);

> tau3y'':=-((T3*pp2+R3)/(pp2*(3*K*pp2^2+2*L*pp2+T)))*exp(t/pp2);

> tau1y''':=-((T3*pp3+R3)/(pp3*(3*K*pp3^2+2*L*pp3+T)))*exp(t/pp3);
```

Таблица А.4

Расчетные данные парциальных составляющих установившихся превышений температур обмоток, магнитопровода и масла при различных значениях кратности силы тока для силового трансформатора ТМ – 160/10. составляющих превышений температуры масла и эквивалентной кривой нагрева масла.

k	.3 .3	.3 .3	.3						
-	oC	oC	oC	oC	oC	oC %	oC	oC	oC
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,55013.7	13,.0745	-0,3990.23	16,01-0.9	-0,13512.4	1,84313. 03	19,944-4.8	-0,364	0,664	12,479
0,68715.2	5,04820. 82	-0,340.29	19,895-0.9	-0,19920.2	1,56820.8	24,586-2. 97	-0,456	0,825	15,76
0,712562	6,9627.49	-0,5690.31	24,764-0.9	-0,27726.9	1,23827.1	30,313-0. 74	-0,567	1,017	19,82
0,816305	9,19832. 87	-0,1870.32	30,786-0.9	-0,36932. 28	0,85332. 76	37,268-1.5	-0,699	1,239	24,771
0,920046. 7	11,77637. 32	-0,09010. 32	38,186-0.9	-0,47736. 74	0,409537. 17	45,64-1.17	-0,856	1,494	30,76
1,023704	14,7140. 95	0,0210.32	47,267-0.9	-0,60340. 36	-0,09440. 73	55,683-0.9	-1,038	1,782	37,98
1,127516	18,02244. 08	0,1480.32	58,415-0.9	-0,74843.5	-0,66443.8	67,726-0. 69	-1,248	2,103	46,682
1,231293	46.6521, 733	0,.29232	-0.972,19	46.1-0,915	46.4-1,3	-0.6582, 218	-1,489	2,46	57,22

1,334973	25,8748.73	0,4540.32	89,352-0.9	-1,10648.15	-2,0148.43	99,78-0.58	-1,768	2,85	70,07
1,438796.9	30,4650.52	0,6370.32	110,98-0.9	-1,32549.94	-2,7950.18	121,28-0.48	-2,09	3,285	85,908
1,542479.8	33,61851.95	0,8260.32	129,52-0.9	-1,4551.4	-3,6451.6	141,01-0.39	-2,27	3,76	100,3
46233	53.16	0.32	-0.9	52.58	52.7	-0.22			
50003.6	54.17	0.32	-0.9	53.6	53.75	-0.28			
53697.9	54.99	0.32	-0.9	54.41	54.55	-0.26			
57483.2	55.68	0.32	-0.9	55.11	55.23	-0.22			
60000	56.08	0.32	-0.9	55.5	55.82	-0.5			

16
5

Приложение Б

Б.1 Алгоритм расчета превышения температуры обмоток фаз над температурой окружающей среды и превышения температуры масла над температурой окружающей среды для силового трансформатора ТМ -160/10 при несимметричной токовой нагрузке (расчет выполнен с применением про граммного обеспечения «Maple 9,5»).

Исходные данные: m1, m2, m3, c01, c02, c03, .3 , .3 , .3 , .3 , .3 ,, P_{1H}, P_{2H}, $k_A = k_B = k_C = 1$.

Расчет

```
> P1:=2650; P2:=565;alpha:=.004;Lambda12:=40.04; Lambda13:=130.05;
Lambda23:=51.99; Lambda3:=100; C1 := 41800;C2 := 202100;C3 :=
594000; ka:=1; kb:=1.; kc:=1;
```

```
> L1A:=(0.1554164269e18*kb^2+0.2089023844e18+0.3574459353e17*ka^2*
kb^2*kc^2-0.7046799368e18*ka^2*kc^2+0.1319626593e20*ka^2-0.
7046799374e18*ka^2*kb^2+0.1554164269e18*kc^2);
```

```
> M1A:=0.5558417908e24*ka^2;
```

```
> K1A:=(-0.1409550953e21*ka^2*kb^2-0.1409550953e21*ka^2*kc^2+0.
5040629580e22*ka^2+0.2347910430e20);
```

```
> T1A:=(-0.5199027559e15*ka^2*kb^2+0.7220500818e15*kb^2+0.
7220500818e15*kc^2-0.5199027559e15*ka^2*kc^2-0.8033351629e14*kb^2*
kc^2+0.3324902912e14*ka^2*kb^2*kc^2+0.7935631170e16*ka^2+0.
5338122832e15);
```

```
> R1A:=(-0.4660902145e11*kb^2*kc^2+0.2951099175e12+0.3647538382e12*
kc^2+0.1016440828e13*ka^2+0.3647538382e12*kb^2-0.8722212096e11*ka^2
```

```
*kc^2-0.8722212094e11*ka^2*kb^2+6923727687.*ka^2*kb^2*kc^2);


> N:=876761768155680000000000;


> M:=(0.1151854516e24-0.2223367163e22*kb^2-0.2223367163e22*kc^2-0.
2223367164e22*ka^2);


> K:=(-0.2016251831e20*kc^2+0.5291393646e21+0.5638203811e18*ka^2*kc
^2-0.2016251832e20*ka^2+0.5638203811e18*ka^2*kb^2-0.2016251831e20*
kb^2+0.5638203809e18*kb^2*kc^2);


> L:=(-0.1429783741e15*ka^2*kb^2*kc^2-0.5278506373e17*ka^2+0.
2818719748e16*kb^2*kc^2-0.5278506373e17*kb^2+0.2818719747e16*ka^2*
kc^2+0.9499741194e18-0.5278506370e17*kc^2+0.2818719750e16*ka^2*kb^2
);


> T:=(0.2079611023e13*kb^2*kc^2+0.2079611024e13*ka^2*kb^2+0.
4711472125e15-0.1329961165e12*ka^2*kb^2*kc^2-0.3174252467e14*kb^2-0
.3174252468e14*ka^2+0.2079611024e13*ka^2*kc^2-0.3174252467e14*kc^2
);


> R:=(348888483.7*ka^2*kb^2+348888483.9*kb^2*kc^2-4065763313.*kc^2-
4065763312.*ka^2-4065763312.*kb^2+348888483.8*ka^2*kc^2+0.
4064802829e11-27694910.75*ka^2*kb^2*kc^2);


> M1B:=0.5558417908e24*kb^2;


> K1B:=(-0.1409550953e21*ka^2*kb^2+0.5040629579e22*kb^2+0.
2347910430e20-0.1409550953e21*kb^2*kc^2);


> L1B:=(-0.7046799370e18*kb^2*kc^2+0.1319626593e20*kb^2+0.
1554164268e18*ka^2+0.3574459354e17*ka^2*kb^2*kc^2+0.1554164268e18*
kc^2+0.2089023844e18-0.7046799372e18*ka^2*kb^2);


> T1B:=(0.7220500817e15*ka^2-0.8033351627e14*ka^2*kc^2-0.
5199027558e15*kb^2*kc^2+0.3324902912e14*ka^2*kb^2*kc^2-0.
5199027560e15*ka^2*kb^2+0.5338122832e15+0.7935631171e16*kb^2+0.
7220500818e15*kc^2);


> R1B:=(0.2951099175e12+0.3647538381e12*ka^2-0.8722212096e11*kb^2*
kc^2+0.3647538381e12*kc^2+6923727686.*ka^2*kb^2*kc^2+0.
1016440828e13*kb^2-0.4660902146e11*ka^2*kc^2-0.8722212094e11*ka^2*
kb^2);


> M1C:=0.5558417908e24*kc^2;
```

```
> K1C:=(-0.1409550953e21*ka^2*kc^2+0.5040629578e22*kc^2+0.
2347910430e20-0.1409550953e21*kb^2*kc^2);


> L1C:=(-0.7046799371e18*kb^2*kc^2+0.1554164268e18*kb^2+0.
1554164268e18*ka^2+0.3574459354e17*ka^2*kb^2*kc^2-0.7046799370e18*
ka^2*kc^2+0.1319626594e20*kc^2+0.2089023844e18);


> T1C:=(0.7220500817e15*ka^2-0.5199027561e15*ka^2*kc^2-0.
5199027559e15*kb^2*kc^2+0.3324902913e14*ka^2*kb^2*kc^2+0.
7220500818e15*kb^2+0.5338122832e15-0.8033351627e14*ka^2*kb^2+0.
7935631173e16*kc^2);


> R1C:=(0.2951099175e12+0.3647538381e12*ka^2-0.8722212096e11*kb^2*
kc^2+0.1016440828e13*kc^2+6923727686.*ka^2*kb^2*kc^2+0.
3647538381e12*kb^2-0.8722212097e11*ka^2*kc^2-0.4660902146e11*ka^2*
kb^2);


> K3:=(0.2145344842e19+0.4056522160e20*kb^2+0.4056522160e20*kc^2+0.
4056522160e20*ka^2);


> L3:=(0.3132961840e17-0.2057374876e17*kb^2*kc^2-0.2057374876e17*ka
^2*kc^2+0.3512719800e18*ka^2+0.3512719800e18*kb^2+0.3512719799e18*
kc^2-0.2057374876e17*ka^2*kb^2);


> T3:=0.8428563492e15*kb^2-0.9457760327e14*kb^2*kc^2+0.
1484019758e15-0.9457760330e14*ka^2*kb^2-0.9457760326e14*ka^2*kc^2+0
.8428563486e15*kc^2+0.7825899647e13*ka^2*kb^2*kc^2+0.8428563493e15*
ka^2;


> R3:=(0.2296613601e12+4148512302.*ka^2*kb^2*kc^2+0.3465132378e12*
kc^2-0.4408132736e11*ka^2*kc^2+0.3465132379e12*ka^2-0.4408132736e11
*kb^2*kc^2-0.4408132738e11*ka^2*kb^2+0.3465132379e12*kb^2);


> pp:=solve((N*p^5+M*p^4+K*p^3+L*p^2+T*p + R),p);

> pp1:=pp[5];pp2:=pp[4]; pp3:=pp[3];pp4:=pp[2]; pp5:=pp[1];




> tau1A:=((R11)/R+((M11*pp1^4+(K11)*pp1^3+(L11)*pp1^2+(T11)*pp1+(
R11))/(pp1*(5*N*pp1^4+4*M*pp1^3+3*K*pp1^2+2*L*pp1+T)))*exp(pp1*t
)+((M11*pp2^4+(K11)*pp2^3+(L11)*pp2^2+(T11)*pp2+(R11))/(pp2*(5*N*
pp2^4+4*M*pp2^3+3*K*pp2^2+2*L*pp2+T)))*exp(pp2*t)+((M11*pp3^4+(K11
```

```
)*pp3^3+(L11)*pp3^2+(T11)*pp3+(R11))/(pp3*(5*N*pp3^4+4*M*pp3^3+3*K*
pp3^2+2*L*pp3+T)))*exp(pp3*t)+((M11*pp4^4+(K11)*pp4^3+(L11)*pp4^2+(
T11)*pp4+(R11))/(pp4*(5*N*pp4^4+4*M*pp4^3+3*K*pp4^2+2*L*pp4+T)))*
exp(pp4*t)+((M11*pp5^4+(K11)*pp5^3+(L11)*pp5^2+(T11)*pp5+(R11))/(
pp5*(5*N*pp5^4+4*M*pp5^3+3*K*pp5^2+2*L*pp5+T)))*exp(pp5*t));
```

```
> tau1B:=((R12)/R+((M12*pp1^4+(K12)*pp1^3+(L12)*pp1^2+(T12)*pp1+(
R12))/(pp1*(5*N*pp1^4+4*M*pp1^3+3*K*pp1^2+2*L*pp1+T)))*exp(pp1*t
)+((M12*pp2^4+(K12)*pp2^3+(L12)*pp2^2+(T12)*pp2+(R12))/(pp2*(5*N*
pp2^4+4*M*pp2^3+3*K*pp2^2+2*L*pp2+T)))*exp(pp2*t)+((M12*pp3^4+(K12
)*pp3^3+(L12)*pp3^2+(T12)*pp3+(R12))/(pp3*(5*N*pp3^4+4*M*pp3^3+3*K*
pp3^2+2*L*pp3+T)))*exp(pp3*t)+((M12*pp4^4+(K12)*pp4^3+(L12)*pp4^2+(
T12)*pp4+(R12))/(pp4*(5*N*pp4^4+4*M*pp4^3+3*K*pp4^2+2*L*pp4+T)))*
exp(pp4*t)+((M12*pp5^4+(K12)*pp5^3+(L12)*pp5^2+(T12)*pp5+(R12))/(
pp5*(5*N*pp5^4+4*M*pp5^3+3*K*pp5^2+2*L*pp5+T)))*exp(pp5*t));
```

```
> tau1C:=(R13)/R+((M13*pp1^4+(K13)*pp1^3+(L13)*pp1^2+(T13)*pp1+(R13
))/(pp1*(5*N*pp1^4+4*M*pp1^3+3*K*pp1^2+2*L*pp1+T)))*exp(pp1*t)+((
M13*pp2^4+(K13)*pp2^3+(L13)*pp2^2+(T13)*pp2+(R13))/(pp2*(5*N*pp2^4+
4*M*pp2^3+3*K*pp2^2+2*L*pp2+T)))*exp(pp2*t)+((M13*pp3^4+(K13)*pp3^3
+(L13)*pp3^2+(T13)*pp3+(R13))/(pp3*(5*N*pp3^4+4*M*pp3^3+3*K*pp3^2+2
*L*pp3+T)))*exp(pp3*t)+((M13*pp4^4+(K13)*pp4^3+(L13)*pp4^2+(T13)*
pp4+(R13))/(pp4*(5*N*pp4^4+4*M*pp4^3+3*K*pp4^2+2*L*pp4+T)))*exp(pp4
*t)+((M13*pp5^4+(K13)*pp5^3+(L13)*pp5^2+(T13)*pp5+(R13))/(pp5*(5*N*
pp5^4+4*M*pp5^3+3*K*pp5^2+2*L*pp5+T)))*exp(pp5*t);
```

```
> tau3:=(((R5)/R)+((K5*pp1^3+L5*pp1^2+T5*pp1+R5)/(pp1*(5*N*pp1^4+4*
M*pp1^3+3*K*pp1^2+2*L*pp1+T)))*exp(pp1*t)+((K5*pp2^3+L5*pp2^2+T5*
pp2+R5)/(pp2*(5*N*pp2^4+4*M*pp2^3+3*K*pp2^2+2*L*pp2+T)))*exp(pp2*t
)+((K5*pp3^3+L5*pp3^2+T5*pp3+R5))/(pp3*(5*N*pp3^4+4*M*pp3^3+3*K*pp3
^2+2*L*pp3+T))*exp(pp3*t)+((K5*pp4^3+L5*pp4^2+T5*pp4+R5)/(pp4*(5*N*
pp4^4+4*M*pp4^3+3*K*pp4^2+2*L*pp4+T)))*exp(pp4*t)+((K5*pp5^3+L5*pp5
^2+T5*pp5+R5)/(pp5*(5*N*pp5^4+4*M*pp5^3+3*K*pp5^2+2*L*pp5+T)))*exp(
pp5*t));
```

Б.2. Исследование изменения установившихся парциальных составляющих превышений температур обмоток фазы «А» и масла силового трансформатора ТМ – 160/10 при несимметричной нагрузке (расчет выполнен с применением программного обеспечения «Maple 9,5»).

Исходные данные: m_1, m_2, m_3, c_{01}, c_{02}, c_{03}, .3 , .3 , .3 , .3 , .3 ,, P_{1H}, P_{2H}, $k_B = k_C = 1$, k_A = 0,4; 0,6; 0,8; 1,0; 1,2; 1,4; 1,6; 1,8; 2,0.

Расчет

```
> P1:=2650; P2:=565;alpha:=.004;Lambda12:=40.04; Lambda13:=130.05;
Lambda23:=51.99; Lambda3:=100; C1 := 41800;C2 := 202100;C3 :=
594000; ka:=1; kb:=1.; kc:=1;
```

```
> L1A:=(0.1554164269e18*kb^2+0.2089023844e18+0.3574459353e17*ka^2*
kb^2*kc^2-0.7046799368e18*ka^2*kc^2+0.1319626593e20*ka^2-0.
7046799374e18*ka^2*kb^2+0.1554164269e18*kc^2);
```

```
> M1A:=0.5558417908e24*ka^2;
```

```
> K1A:=(-0.1409550953e21*ka^2*kb^2-0.1409550953e21*ka^2*kc^2+0.
5040629580e22*ka^2+0.2347910430e20);
```

```
> T1A:=(-0.5199027559e15*ka^2*kb^2+0.7220500818e15*kb^2+0.
7220500818e15*kc^2-0.5199027559e15*ka^2*kc^2-0.8033351629e14*kb^2*
kc^2+0.3324902912e14*ka^2*kb^2*kc^2+0.7935631170e16*ka^2+0.
5338122832e15);


> R1A:=(-0.4660902145e11*kb^2*kc^2+0.2951099175e12+0.3647538382e12*
kc^2+0.1016440828e13*ka^2+0.3647538382e12*kb^2-0.8722212096e11*ka^2
*kc^2-0.8722212094e11*ka^2*kb^2+6923727687.*ka^2*kb^2*kc^2);


> N:=876761768155680000000000;

> M:=(0.1151854516e24-0.2223367163e22*kb^2-0.2223367163e22*kc^2-0.
2223367164e22*ka^2);


> K:=(-0.2016251831e20*kc^2+0.5291393646e21+0.5638203811e18*ka^2*kc
^2-0.2016251832e20*ka^2+0.5638203811e18*ka^2*kb^2-0.2016251831e20*
kb^2+0.5638203809e18*kb^2*kc^2);


> L:=(-0.1429783741e15*ka^2*kb^2*kc^2-0.5278506373e17*ka^2+0.
2818719748e16*kb^2*kc^2-0.5278506373e17*kb^2+0.2818719747e16*ka^2*
kc^2+0.9499741194e18-0.5278506370e17*kc^2+0.2818719750e16*ka^2*kb^2
);


> T:=(0.2079611023e13*kb^2*kc^2+0.2079611024e13*ka^2*kb^2+0.
4711472125e15-0.1329961165e12*ka^2*kb^2*kc^2-0.3174252467e14*kb^2-0
.3174252468e14*ka^2+0.2079611024e13*ka^2*kc^2-0.3174252467e14*kc^2
);


> R:=(348888483.7*ka^2*kb^2+348888483.9*kb^2*kc^2-4065763313.*kc^2-
4065763312.*ka^2-4065763312.*kb^2+348888483.8*ka^2*kc^2+0.
4064802829e11-27694910.75*ka^2*kb^2*kc^2);


> M1B:=0.5558417908e24*kb^2;


> K1B:=(-0.1409550953e21*ka^2*kb^2+0.5040629579e22*kb^2+0.
2347910430e20-0.1409550953e21*kb^2*kc^2);


> L1B:=(-0.7046799370e18*kb^2*kc^2+0.1319626593e20*kb^2+0.
1554164268e18*ka^2+0.3574459354e17*ka^2*kb^2*kc^2+0.1554164268e18*
kc^2+0.2089023844e18-0.7046799372e18*ka^2*kb^2);


> T1B:=(0.7220500817e15*ka^2-0.8033351627e14*ka^2*kc^2-0.
5199027558e15*kb^2*kc^2+0.3324902912e14*ka^2*kb^2*kc^2-0.
5199027560e15*ka^2*kb^2+0.5338122832e15+0.7935631171e16*kb^2+0.
7220500818e15*kc^2);
```

```
> R1B:=(0.2951099175e12+0.3647538381e12*ka^2-0.8722212096e11*kb^2*
kc^2+0.3647538381e12*kc^2+6923727686.*ka^2*kb^2*kc^2+0.
1016440828e13*kb^2-0.4660902146e11*ka^2*kc^2-0.8722212094e11*ka^2*
kb^2);


> M1C:=0.5558417908e24*kc^2;


> K1C:=(-0.1409550953e21*ka^2*kc^2+0.5040629578e22*kc^2+0.
2347910430e20-0.1409550953e21*kb^2*kc^2);


> L1C:=(-0.7046799371e18*kb^2*kc^2+0.1554164268e18*kb^2+0.
1554164268e18*ka^2+0.3574459354e17*ka^2*kb^2*kc^2-0.7046799370e18*
ka^2*kc^2+0.1319626594e20*kc^2+0.2089023844e18);


> T1C:=(0.7220500817e15*ka^2-0.5199027561e15*ka^2*kc^2-0.
5199027559e15*kb^2*kc^2+0.3324902913e14*ka^2*kb^2*kc^2+0.
7220500818e15*kb^2+0.5338122832e15-0.8033351627e14*ka^2*kb^2+0.
7935631173e16*kc^2);


> R1C:=(0.2951099175e12+0.3647538381e12*ka^2-0.8722212096e11*kb^2*
kc^2+0.1016440828e13*kc^2+6923727686.*ka^2*kb^2*kc^2+0.
3647538381e12*kb^2-0.8722212097e11*ka^2*kc^2-0.4660902146e11*ka^2*
kb^2);


> K3:=(0.2145344842e19+0.4056522160e20*kb^2+0.4056522160e20*kc^2+0.
4056522160e20*ka^2);


> L3:=(0.3132961840e17-0.2057374876e17*kb^2*kc^2-0.2057374876e17*ka
^2*kc^2+0.3512719800e18*ka^2+0.3512719800e18*kb^2+0.3512719799e18*
kc^2-0.2057374876e17*ka^2*kb^2);


> T3:=0.8428563492e15*kb^2-0.9457760327e14*kb^2*kc^2+0.
1484019758e15-0.9457760330e14*ka^2*kb^2-0.9457760326e14*ka^2*kc^2+0
.8428563486e15*kc^2+0.7825899647e13*ka^2*kb^2*kc^2+0.8428563493e15*
ka^2;


> R3:=(0.2296613601e12+4148512302.*ka^2*kb^2*kc^2+0.3465132378e12*
kc^2-0.4408132736e11*ka^2*kc^2+0.3465132379e12*ka^2-0.4408132736e11
*kb^2*kc^2-0.4408132738e11*ka^2*kb^2+0.3465132379e12*kb^2);


> pp:=solve((N*p^5+M*p^4+K*p^3+L*p^2+T*p + R),p);

> pp1:=pp[5];pp2:=pp[4]; pp3:=pp[3];pp4:=pp[2]; pp5:=pp[1];
```

```
> tau1Ay:=(R1A)/R;

> tau1Aa:=-((M1A*pp1^4+(K1A)*pp1^3+(L1A)*pp1^2+(T1A)*pp1+(R1A))/(
pp1*(5*N*pp1^4+4*M*pp1^3+3*K*pp1^2+2*L*pp1+T)));

> tau1Ab:=-((M1A*pp2^4+(K1A)*pp2^3+(L1A)*pp2^2+(T1A)*pp2+(R1A))/(
pp2*(5*N*pp2^4+4*M*pp2^3+3*K*pp2^2+2*L*pp2+T)));

> tau1Ac:=-((M1A*pp3^4+(K1A)*pp3^3+(L1A)*pp3^2+(T1A)*pp3+(R1A))/(
pp3*(5*N*pp3^4+4*M*pp3^3+3*K*pp3^2+2*L*pp3+T)));

> tau1Ad:=-((M1A*pp4^4+(K1A)*pp4^3+(L1A)*pp4^2+(T1A)*pp4+(R1A))/(
pp4*(5*N*pp4^4+4*M*pp4^3+3*K*pp4^2+2*L*pp4+T)));

> tau1Af:=-((M1A*pp5^4+(K1A)*pp5^3+(L1A)*pp5^2+(T1A)*pp5+(R1A))/(
pp5*(5*N*pp5^4+4*M*pp5^3+3*K*pp5^2+2*L*pp5+T)));

> tau3y:=((R3)/R);

> tau3ya:=-((K3*pp1^3+L3*pp1^2+T3*pp1+R3)/(pp1*(5*N*pp1^4+4*M*pp1^3
+3*K*pp1^2+2*L*pp1+T)));

> tau3yb:=-((K3*pp2^3+L3*pp2^2+T3*pp2+R3)/(pp2*(5*N*pp2^4+4*M*pp2^3
+3*K*pp2^2+2*L*pp2+T)));

> tau3yc:=-((K3*pp3^3+L3*pp3^2+T3*pp3+R3))/(pp3*(5*N*pp3^4+4*M*pp3^
3+3*K*pp3^2+2*L*pp3+T));

> tau3yd:=-((K3*pp4^3+L3*pp4^2+T3*pp4+R3)/(pp4*(5*N*pp4^4+4*M*pp4^3
+3*K*pp4^2+2*L*pp4+T)));

> tau3yf:=-((K3*pp5^3+L3*pp5^2+T3*pp5+R3)/(pp5*(5*N*pp5^4+4*M*pp5^3
+3*K*pp5^2+2*L*pp5+T)));
```

Таблица Б.1

Результаты расчетов установившихся парциальных составляющих превышений температур обмотки фазы «А» и масла при изменении кратности силы тока в фазе «А» для силового трансформатора ТМ-160/10 при $k_C = k_B = 1$.

k_A												
0,4	33,5	-0,2	-0,0002	-9,1	10,24	34,74	29,8	-0,68	-0, 00001	-0,27	-0,35	28,48
0,6	36,6	-0,18	-0,0003	-8,8	12,8	40,52	32,1	-0,63	-0, 00002	-0,18	-0,5	30,75
0,8	41,1	-0,17	-0,0006	-6,4	15,7	49,97	35,1	-0,6	-0, 00004	-0,06	-0,7	34,1
1,0	47,6	-0,14	0,03	-0,03	14,5	61,99	40,04	-0,4	-0,002	0,002	-0,87	38,8
1,2	56,6	-0,1	10,55	0,0002	11,6	78,65	46,3	-0,3	-0,07	0,00001	-0,9	44,92
1,4	69,1	-0,0047	23,1	1,92	8,56	100,8	54,5	-0,14	-0,28	0,00001	-0,92	53,15
1,6	86,8	0,02	37,2	0,0004	6,33	130,34	65,6	0,07	-0,57	0,00001	-0,94	64,14
1,8	112,9	0,12	53,0	0,0002	4,8	170,56	80,6	0,37	-0,97	0,00001	-0,91	79,09
2,0	150	0,3	72,4	0,0001	3,8	226,82	101,7	0,66	-1,5	0,00001	-0,9	100,02

Приложение Б.3. Определение математической зависимости перепадов температур в функции кратностей сил токов для силового трансформатора ТМ – 160/10.

Таблица Б.2

Результаты расчета коэффициентов установившегося значения перепада для фазы «А» силового трансформатора ТМ – 160/10 при варьировании кратностей сил токов в фазах от 0,8 до 1,2.

№ опыта	X1Y	X2Y	X3Y	X1 X2Y	X1 X3Y	X2X3Y	(Y)
1	-14,49	-14,49	-14,49	14,49	14,49	14,49	14,49
2	32,12	-32,12	-32,12	-32,12	-32,12	32,12	32,12
3	-15,61	15,64	-15,61	-15,64	15,64	-15,64	15,64
4	33,98	33,98	-33,98	33,98	-33,98	-33,98	33,98
5	-15,61	-15,61	15,61	15,61	-15,61	-15,61	15,61
6	33,98	-33,98	33,98	-33,98	33,98	-33,98	33,98
7	-16,83	16,83	16,83	-16,83	-16,83	16,83	16,83
8	36,03	36,03	36,03	36,03	36,03	36,03	36,03
	73,57	6,25	6,25	1,57	1,57	0,29	198,65
Ai	9,1963	0,7813	0,7813	0,1963	0,1963	0,0363	24,831

Таблица Б.3

Результаты расчета коэффициентов установившегося значения перепада для фазы «В» силового трансформатора ТМ – 160/10 при варьировании кратностей сил токов в фазах от 0,8 до 1,2.

№ опыта	X1Y	X2Y	X3Y	X1 X2Y	X1 X3Y	X2X3Y	(Y)
1	-14,49	-14,49	-14,49	14,49	14,49	14,49	14,49
2	15,61	-15,64	-15,61	-15,64	-15,64	15,64	15,64
3	-32,12	32,12	-32,12	-32,12	32,12	-32,12	32,12
4	33,98	33,98	-33,98	33,98	-33,98	-33,98	33,98
5	-15,61	-15,61	15,61	15,61	-15,61	-15,61	15,61
6	16,83	-16,83	16,83	-16,83	16,83	-16,83	16,83
7	-33,98	33,98	33,98	-33,98	-33,98	33,98	33,98
8	36,03	36,03	36,03	36,03	36,03	36,03	36,03
	6,25	73,57	6,25	1,57	0,29	1,57	198,65
Bi	0,7813	9,1963	0,7813	0,1963	0,0363	0,1963	24,831

Таблица Б.4

Результаты расчета коэффициентов установившегося значения перепада для фазы «С» силового трансформатора ТМ – 160/10 при варьировании кратностей сил токов в фазах от 0,8 до 1,2.

№ опыта	X1Y	X2Y	X3Y	X1 X2Y	X1 X3Y	X2X3Y	(Y)

1	-14,49	-14,49	-14,49	14,49	14,49	14,49	14,49
2	15,61	-15,64	-15,61	-15,64	-15,64	15,64	15,64
3	-15,61	15,64	-15,61	-15,64	15,64	-15,64	15,64
4	16,83	16,83	-16,83	16,83	-16,83	-16,83	16,83
5	-32,12	-32,12	32,12	32,12	-32,12	-32,12	32,12
6	33,98	-33,98	33,98	-33,98	33,98	-33,98	33,98
7	-33,98	33,98	33,98	-33,98	-33,98	33,98	33,98
8	36,03	36,03	36,03	36,03	36,03	36,03	36,03
	6,25	6,25	73,57	0,29	1,57	1,57	198,65
Ci	0,7813	0,7813	9,1963	0,0363	0,1963	0,1963	24,831

Таблица Б.5

Результаты расчета коэффициентов установившегося значения первых парциальных составляющих перепада для фазы «А» силового трансформатора ТМ – 160/10 при варьировании кратностей сил токов в фазах от 0,8 до 1,2.

№ опыта	X1Y	X2Y	X3Y	X1 X2Y	X1 X3Y	X2X3Y	(Y)
1	-4,33	-4,33	-4,33	4,33	4,33	4,33	4,33
2	8,29	-8,29	-8,29	-8,29	-8,29	8,29	8,29
3	-5,89	5,89	-5,89	-5,89	5,89	-5,89	5,89
4	10,65	10,65	-10,65	10,65	-10,65	-10,65	10,65
5	-5,89	-5,89	5,89	5,89	-5,89	-5,89	5,89
6	10,65	-10,65	10,65	-10,65	10,65	-10,65	10,65
7	-7,54	7,54	7,54	-7,54	-7,54	7,54	7,54
8	13,16	13,16	13,16	13,16	13,16	13,16	13,16
	19,1	8,08	8,08	1,66	1,66	0,24	66,4
Ai	2,387	1,01	1,01	0,207	0,207	0,03	8,3

Таблица Б.6

Результаты расчета коэффициентов установившегося значения первых парциальных составляющих перепада для фазы «В» для силового трансформатора ТМ – 160/10 при варьировании кратностей сил токов в фазах от 0,8 до 1,2.

№ опыта	X1Y	X2Y	X3Y	X1 X2Y	X1 X3Y	X2X3Y	(Y)
1	-4,33	-4,33	-4,33	4,33	4,33	4,33	4,33
2	5,89	-5,89	-5,89	-5,89	-5,89	5,89	5,89
3	-8,29	8,29	-8,29	-8,29	8,29	-8,29	8,29
4	10,65	10,65	-10,65	10,65	-10,65	-10,65	10,65
5	-5,89	-5,89	5,89	5,89	-5,89	-5,89	5,89
6	7,54	-7,54	7,54	-7,54	7,54	-7,54	7,54
7	-10,65	10,65	10,65	-10,65	-10,65	10,65	10,65
8	13,16	13,16	13,16	13,16	13,16	13,16	13,16
	8,08	19,1	8,08	1,66	0,24	1,66	66,4
Bi	1,01	2,387	1,01	0,207	0,03	0,207	8,3

Таблица Б.7

Результаты расчета коэффициентов установившегося значения первых парциальных составляющих перепада для фазы «С» для силового трансформатора ТМ – 160/10 при варьировании кратностей сил токов в фазах от 0,8 до 1,2.

№ опыта	X1Y	X2Y	X3Y	X1 X2Y	X1 X3Y	X2X3Y	(Y)
1	-4,33	-4,33	-4,33	4,33	4,33	4,33	4,33
2	5,89	-5,89	-5,89	-5,89	-5,89	5,89	5,89
3	-5,89	5,89	-5,89	-5,89	5,89	-5,89	8,29
4	7,54	7,54	-7,54	7,54	-7,54	-7,54	7,54
5	-8,29	-8,29	8,29	8,29	-8,29	-8,29	8,29
6	10,65	-10,65	10,65	-10,65	10,65	-10,65	10,65
7	-10,65	10,65	10,65	-10,65	-10,65	10,65	10,65
8	13,16	13,16	13,16	13,16	13,16	13,16	13,16
	8,08	8,08	19,1	0,24	1,66	1,66	66,4
Ci	1,01	1,01	2,387	0,03	0,207	0,207	8,3

Таблица Б.8

Результаты расчета коэффициентов первых парциальных составляющих постоянной времени для силового трансформатора ТМ – 160/10 при варьировании кратностей сил токов в фазах от 0,8 до 1,2.

№ опыта	X1Y	X2Y	X3Y	X1 X2Y	X1 X3Y	X2X3Y	(Y)

1	-9987	-9987	-9987	9987	9987	9987	9987
2	10393	-10393	-10393	-10393	-10393	10393	10393
3	-10393	10393	-10393	-10393	10393	-10393	10393
4	10832	10832	-10832	10832	-10832	-10832	10832
5	-10393	-10393	10393	10393	-10393	-10393	10393
6	10832	-10832	10832	-10832	10832	-10832	10832
7	-10832	10832	10832	-10832	-10832	10832	10832
8	11307	11307	11307	11307	11307	11307	11307
	1756	1756	1756	69	69	69	84969
Di	219,88	219,88	219,88	8,625	8,625	8,625	10621

Приложение В

В.1. Алгоритм расчета импульса квадрата сверхтока.

Исходные данные:

; ; ; ; ; ; ; ; ; ; .

Переменные данные: ПI .3 .

Расчет

1. ;

2. ;

3. ;

4. ;

5. ;

6. ;

7. ;

8. ;

Таблица В

Результаты расчетов скорости дополнительного расхода изоляции и дополнительного теплового износа изоляции обмоток силового трансформатора после действия сверхтоков для трансформатора ТМ-160/10 при температуре окружающей среды 40 оС.

t, с	Величины	Импульс квадрата сверхтока,					
		500	1000	1500	2000	2500	3000
0	, оС	65,94	66,9	67,85	68,8	69,76	7,07
		1,064	1,134	1,21	1,28	1,37	1,45
10525	, оС	65,4	65,81	66,2	66,64	67,06	67,24
		1,027	1,055	1,083	1,114	1,146	1,16
21050	, оС	65,15	65,29	65,44	65,65	65,81	65,9
		1,01	1,02	1,03	1,044	1,06	1,064
		65,06	65,13	65,19	65,26	65,32	65,38

31575	, oC						
		1,004	1,009	1,013	1,017	1,021	1,026
42100	, oC	65,02	65,05	65,07	65,1	65,13	65,15
		1,001	1,003	1,005	1,007	1,009	1,01
52625	, oC	65,01	65,02	65,03	65,04	65,05	65,06
		1,0006	1,001	1,002	1,003	1,0033	1,004
Ед, бч		0,219	0,45	0,685	0,954	1,21	1,43

Приложение Д

Д.1. Расчет дополнительный тепловой износ изоляции при действии систематических и аварийных перегрузок для силового трансформатора ТМ – 160/10

Таблица Д.1

Дополнительный тепловой износ изоляции при действии систематических и аварийных перегрузок для силового трансформатора ТМ – 160/10 при диагностировании по температуре масла

	tп, с	, oC	Едоп, бч			
			oC	oC	oC	oC
1,1	7581	75,59	0,41	0,79	1,49	2,75
1,15	6692	80,27	0,56	1,07	2,01	3,69
1,2	5961	84,82	0,73	1,39	2,59	4,69
1,25	5348	89,24	0,92	1,74	3,21	5,76
1,3	4827	90,02	1,14	2,14	3,91	6,95
1,45	3654	106,42	2,06	3,75	6,65	11,46
1,6	2858	119,43	3,58	6,32	10,85	18,15
1,75	2291	133,17	6,34	10,8	17,95	29,16
2	1653	159,01	17,43	28,02	44,12	68,15

Таблица Д.2

Дополнительный тепловой износ изоляции при действии систематических и аварийных перегрузок для силового трансформатора ТМ–160/10 по рекомендациям [7]

	tп, с	, оС	Едоп, бч			
			оС	оС	оС	оС
1,1	7581	75,59	0,412	0,789	1,488	2,75
1,15	4320	79,15	0,36	0,69	1,3	2,58
1,2	1620	80,41	0,197	0,37	0,7	1,27
1,25	900	82,13	0,154	0,29	0,54	0,97
1,3	7200	97,61	1,71	2,14	3,91	10,37
1,45	4800	110,78	2,69	4,92	8,71	15,02
1,6	2700	118,34	3,40	6,00	10,29	17,23
1,75	1200	121,33	4,32	7,65	13,39	19,27
2	600	138,61	6,33	10,17	16,03	24,75

Таблица Д.3

Дополнительный тепловой износ изоляции при действии систематических и аварийных перегрузок для силового трансформатора ТМ – 160/10 при диагностировании по силам токов в фазах

	tп, с	, оС	Едоп, бч			
			оС	оС	оС	оС
1,1	3595	78	0,232	0,561	1,162	2,241
1,15	2827	78	0,127	0,441	0,909	1,761
1,2	2192	78	0,149	0,342	0,706	1,372
1,25	1654	78	0,113	0,258	0,532	1,031
1,3	1195	78	0,081	0,187	0,384	0,75
1,45	570	78	0,039	0,089	0,183	0,351
1,6	360	78	0,025	0,056	0,116	0,225
1,75	360	78	0,018	0,039	0,082	0,159
2	168	78	0,011	0,026	0,055	0,106

Таблица Д. 4

Экспериментальные данные при несимметричной токовой нагрузке для трансформатора ТМ-160/10

t, с	Состояние трансформатора	Фаза трансформатора	Экспериментальные данные					
			I, A	k	, oC	, oC	, Ом	, oC
0	Холодное	-	-	-	30	30	0,0134	30
3600	Нагретое	A	46,2	0,2	30	32,7	0,01383	38,64
		B	150,2	0,65			0,01416	45,15
		C	69,3	0,3			0,01386	39,2
3600	Нагретое	A	49,6	0,21	30,2	36,8	0,01395	40,9
		B	180,6	0,78			0,01440	49,82
		C	105,5	0,46			0,01401	41,91
0	Холодное	-	-	-	16	16	0,01250	16
3600	Нагретое	A	190,0	0,82	15,8	26,5	0,01392	44,75
		B	232	1			0,01427	51,76
		C	265,6	1,15			0,01472	60,71
3600	Нагретое	A	189,5	0,82	16	37,5	0,01448	55,87
		B	231	1			0,01494	65,19
		C	250	1,08			0,01545	75,52

Таблица Д.5.

Расчетные данные температуры обмоток, скорости теплового износа изоляции и суммарного теплового износа изоляции на базе математической модели при несимметричной токовой нагрузке по измеренным значениям температуры масла при температуре окружающей среды 30 о С.

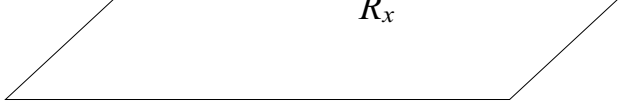
t, с	IA	IB	IC	kA	kB	kC											ПIA	ПIB	ПIC
	A	A	A	-	-	-	о С	о С	о С	о С	бч/ч	бч/ч	бч/ч	бч	бч	бч	А2с	А2с	А2с
600	46,2	150,2	69,3	0,2	0,65	0,3	30,5	31,67	34,77	32,05	2	3,0	2	0,3	0,5	0,3	0,0064	0,068	0,0144
1200	46,2	150,2	69,3	0,2	0,65	0,3	30,8	32,36	36,68	32,9	2,5	4,0	2,7	0,7	1,2	0,8			
1800	46,2	150,2	69,3	0,2	0,65	0,3	31,2	33,06	38,35	33,71	2,7	4,6	3,0	1,2	2,0	1,3			
2400	46,2	150,2	69,3	0,2	0,65	0,3	31,8	33,9	39,9	34,68	3,0	5,0	3,2	1,7	2,8	1,8			
3000	46,2	150,2	69,3	0,2	0,65	0,3	32,3	34,5	41,14	35,3	3,2	6,0	3,4	2,2	3,8	2,4			
3600	46,2	150,2	69,3	0,2	0,65	0,3	32,7	35,14	42,29	36,0	3,4	6,7	3,6	2,8	4,9	3,0			
600	49,6	180,6	105,5	0,21	0,78	0,46	33,2	35,76	43,29	36,7	3,6	7,4	4	3,4	6,1	3,7	0,007	0,097	0,034
1200	49,6	180,6	105,5	0,21	0,78	0,46	33,7	36,4	44,19	37,3	3,8	8,1	4,2	4,0	7,5	4,4			
1800	49,6	180,6	105,5	0,21	0,78	0,46	34,4	37,1	45,2	38,1	4,1	8,9	4,5	4,7	9,0	5,0			
2400	49,6	180,6	105,5	0,21	0,78	0,46	35,1	37,9	46,25	39,0	4,4	10	5,0	5,4	11	6,0			
3000	49,6	180,6	105,5	0,21	0,78	0,46	35,8	38,64	47,05	39,7	4,7	11	5,2	6,2	12	6,8			
3600	49,6	180,6	105,5	0,21	0,78	0,46	36,3	39,2	47,75	40,22	5,0	12	6,0	7,1	14	7,8			

Таблица Д.6

Расчетные данные температуры обмоток, скорости теплового износа изоляции и суммарного теплового износа изоляции на базе математической модели при несимметричной токовой нагрузке по измеренным значениям температуры масла при температуре окружающей среды 16 о С.

t, с	IA	IB	IC	kA	kB	kC											ПIA	ПIB	ПIC
	A	A	A	-	-	-	о С	о С	о С	о С	бч/ч	бч/ч	бч/ч	бч	бч	бч	A2с	A2c	A2c
600	189,4	231	265,6	0,82	1,0	1,15	17,3	23,85	27,2	31	1,0	1,5	2,2	0,17	0,25	0,37	0,108	0,16	0,212
1200	189,4	231	265,6	0,82	1,0	1,15	19,2	28,25	32,9	38,17	1,7	2,7	4,5	0,45	0,7	1,1			
1800	189,4	231	265,6	0,82	1,0	1,15	21,1	32,13	37,86	44,32	2,5	4,4	8,2	0,87	1,4	2,5			
2400	189,4	231	265,6	0,82	1,0	1,15	23,0	35,61	42,16	49,57	3,5	6,7	13	1,5	2,6	4,7			
3000	189,4	232	265,6	0,82	1,0	1,15	24,7	38,55	45,77	53,87	4,7	9,4	20	2,2	4,1	8			
3600	190,0	232	265,6	0,82	1,0	1,15	26,4	41,25	49,0	57,71	6,1	13	27	3,2	6,3	12			
600	190,0	232	250	0,82	1,0	1,08	27,6	43,22	51,37	60,57	7	16	35	4,4	9	18			
1200	190,0	232	250	0,82	1,0	1,08	29,4	45,69	54,07	63,7	10	20	46	6,1	12	26			
1800	190,0	231,1	250	0,82	1,0	1,08	31,2	47,61	56,0	65,52	11	24	53	8,0	16	35			
2400	190,0	231,1	250	0,82	1,0	1,08	33,0	50,1	59,1	69,2	14	31	72	10	21	47			
3000			250	0,82	1,0	1,08	34,6	52,0			17	37	87	13	27	61			

	189,5	231,1							61,17	71,57							0,108	0,16	0,187
3600	189,5	231,1	250	0,82	1,0	1,08	36,2	53,9	63,1	73,54	20	43	102	16	35	78			



Приложение Ж

Ж.1. Блок-схема алгоритма определения температуры масла

Ж.2. Принципиальная схема устройства диагностирования

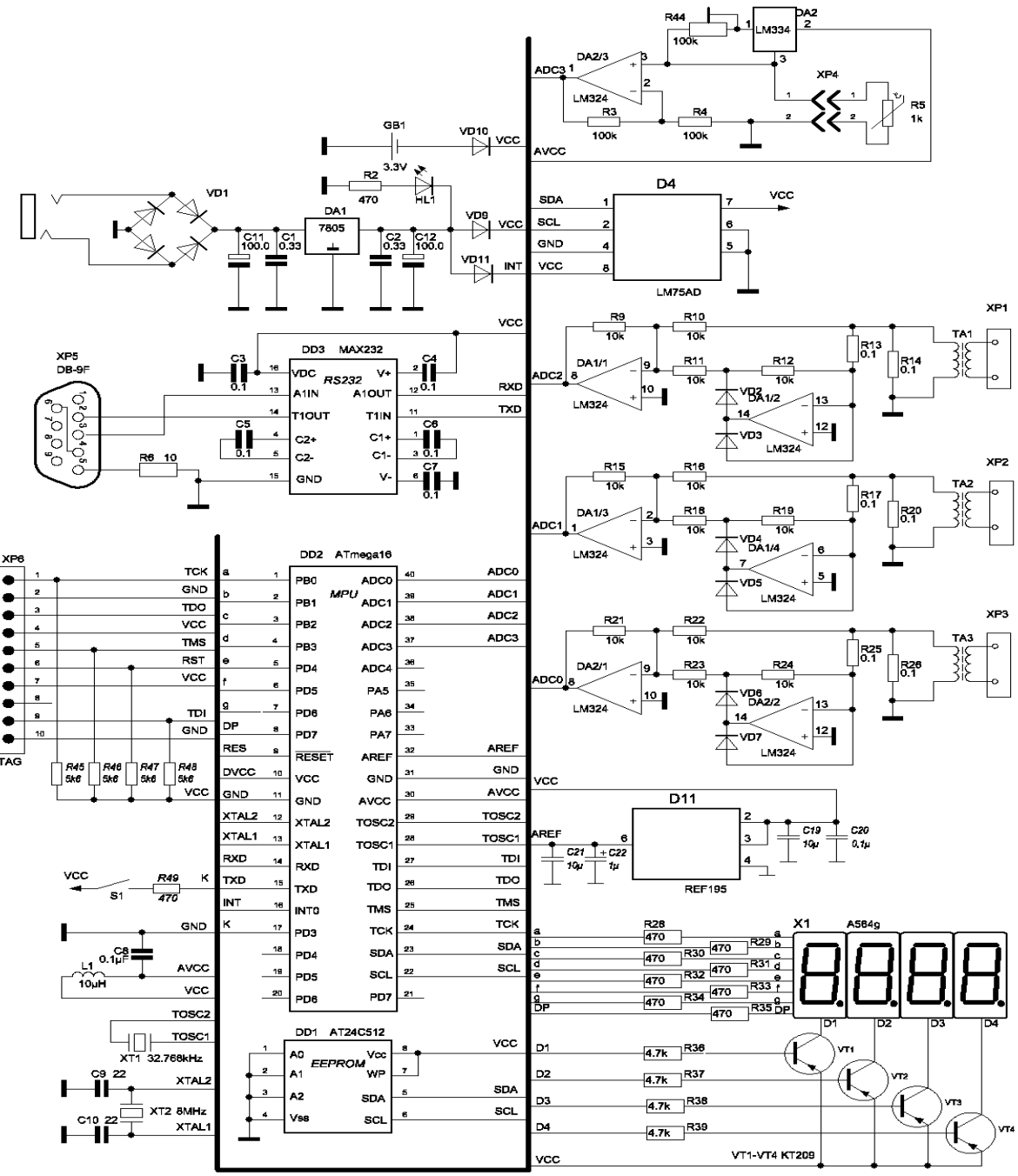

DD2 ATmega16
MPU
DD3 MAX232
RS232
DD1 AT24C512
EEPROM
D4
LM75AD
D11
REF195
DA1 7805
DA2/3
DA1/1
DA1/2
DA1/3
DA1/4
DA2/1
DA2/2
LM324
LM334
XP1
XP2
XP3
XP4
XP5
DB-9F
XP6
TAG
TA1
TA2
TA3
X1
A564g
VT1-VT4 KT209
VCC
AVCC
GND
SDA
SCL
INT
RXD
TXD
TCK
TDI
TDO
TMS
RST
AREF
TOSC1
TOSC2
XTAL1
XTAL2
ADC0
ADC1
ADC2
ADC3
XT1 32.768kHz
XT2 8MHz
S1
L1 10μH
R1 0.33
R2 470
R3 100k
R4 100k
R5 1k
R6 10
R9 10k
R10 10k
R11 10k
R12 10k
R13 0.1
R14 0.1
R15 10k
R16 10k
R17 0.1
R18 10k
R19 10k
R20 0.1
R21 10k
R22 10k
R23 10k
R24 10k
R25 0.1
R26 0.1
R28 470
R29 470
R30 470
R31 470
R32 470
R33 470
R34 470
R35 470
R36 4.7k
R37 4.7k
R38 4.7k
R39 4.7k
R44 100k
R45 5k6
R46 5k6
R47 5k6
R48 5k6
R49 470
C1 0.33
C2 0.33
C3 0.1
C4 0.1
C5 0.1
C6 0.1
C7 0.1
C8 0.1μF
C9 22
C10 22
C11 100.0
C12 100.0
C19 10μ
C20 0.1μ
C21 10μ
C22 1μ
VD1
VD2
VD3
VD4
VD5
VD6
VD7
VD8
VD9
VD10
VD11
HL1
GB1
3.3V

Таблица Ж.1

Технические характеристики элементов устройства диагностирования режимов работы силового трансформатора

Наименование элементов	Обозначение	Количество	Примечание
Микросхемы			
AT24C512	DD1	1	
ATmega 16	DD2	1	
MAX232	DD3	1	
LM75AD	DD4	1	
LM7805	DA1	1	
LM324	DA1/1-DA1/4	4	
LM324	DA2/1-DA2/3	3	
LM334	DA2	1	
REF195	DA3	1	
Диоды			
КД522	VD1	4	
КД522	VD2…VD7	8	
КД503А	VD9- VD11	3	
LED1	VD8	1	
Конденсаторы			
К50-6	С1, С2	2	0,33 мкФ
К50-6	С11, С12	2	100 мкФ
К50-6	С3, С7	5	0,1 мкФ

Продолжение таблицы Ж.1

Наименование элементов	Обозначение	Количество	Примечание

К50-6	С8	1	100 мкФ
К50-6	С9 – С10	2	22 мкФ
К50-6	С19, С21	2	10 мкФ
К50-6	С20	1	0,1 мкФ
К50-6	С22	1	10 мкФ
Резисторы			
МЛТ-0, 25	R2	1	470 Ом
МЛТ-0,125	R3 - R3	2	100 кОм
СТ1-18в	R5	1	1 кОм
МЛТ-0,125	R6	1	10 кОм
МЛТ-0,25	R7	1	100 кОм
МЛТ-0,125	R9 – R12	4	10 кОм
МЛТ-0,125	R15 – R18	4	10 кОм
МЛТ-0,125	R21 - R24	4	10 кОм
МЛТ-0,25	R13, R14	2	0,1 Ом
МЛТ-0, 25	R19, R20	2	0,1 Ом
МЛТ-0,25	R25, R26	2	0,1 Ом
МЛТ-0,125	R28 – R35	8	470 Ом
МЛТ-0,125	R36 – R39	4	4,7 кОм
МЛТ-0,125	R45 – R48	4	5 кОм
МЛТ-0,125	R49	1	470 кОм

Продолжение таблицы Ж.1

Наименование элементов	Обозначение	Количество	Примечание
Разъемы			

ТП11	XP1 – XP3	3	
Онп-КГ-22	XP4	1	
DB-9F	XP5	1	
JTAG	XP6	1	
Транзистор			
КТ209 Б	VT1…VT4	4	
Трансформатор тока	TA1-TA3	3	
Трансформатор напряжения	TU	1	

Таблица Ж.2

Основные технические характеристики устройства диагностирования эксплуатационных режимов работы силового трансформатора

Наименование	Единицы измерения	Показатель
Количество контролируемых силовых трансформаторов	шт.	1
Номинальный фазный ток	А	5
Номинальное напряжение переменного оперативного тока	В	220

Первичные преобразователи температуры	шт.	1
Диапазон контролируемых температур	0С	0…150
Напряжение стабилизированного источника питания	В	5
Длительность опроса цепей контроля датчиков	с	60
Вероятность безотказной работы	-	0,986
Вид индикации	-	дискретная
Габаритные размеры	мм	150 220 90
Масса	кг	3,6
Средний срок службы	лет	9

Таблица Ж.3

Расчет интенсивности отказов элементов устройства диагностирования режимов работы силового трансформатора

Наименование элементов	Количество	Интенсивность отказов λ 10-6, ч-1	
		одного элемента	группы элементов
Интегральная микросхема	13	0,10	1,30
Резистор	37	0,04	1,48
Диод	16	0,05	0,80
Конденсатор	16	0,02	0,32
Транзистор	4	0,2	0,80
Разъем	6	0,400	2,40
Трансформатор	4	0,12	0,48

Плата печатная	2	0,700	1,40
Точки пайки	345	0,001	3,45
И Т О Г О			12,43

Таблица Ж.4

Исходные данные для расчета экономической эффективности

Наименование	Номинальная мощность, кВА	Номинальные напряжения, кВ	Цена, грн.
Силовые трансформаторы	160	10/0,4	18500
	250	10/0,4	24100
Капитальный ремонт силового трансформатора	160	10/0,4	4383
	250	10/0,4	5055
Устройство диагностирования с GSM/GPRS модемом	-	-	1500
Затраты на обслуживание одного силового трансформатора напряжением 10 кВ			5659

Таблица Ж. 5

Показатели технико-экономической эффектности при внедрении устройства диагностирования на потребительской подстанции Приморского РЭС Запорожской области с силовым трансформатором 160/ 10-0,4

Название показателей	Вариант	
	Базовый	Новый
Дополнительные затраты, грн	-	1600
Затраты на техническое обслуживание, грн	5659	4234
Затраты на заработную плату, грн/ч	5,68	4,25
Годовой экономический эффект, грн	-	2300
Срок окупаемости, год		1,1

УТВЕРЖДАЮ
Ректор ТГАТА
_____проф. В.Н. Кюрчев
_____2007 г.

УТВЕРЖДАЮ
Начальник Приморского РЭС
_____С.В.Цуркан
_____2007 г.

АКТ
ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ, ОПЫТНО-КОНСТРУКТОРСКИХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РАБОТ

Мы, нижеподписавшиеся, представители Таврической государственной агротехнической академии (ТГАТА) Овчаров В.В. – профессор, д.т.н., Безменникова Л.Н. – соискатель, инженер с одной стороны и представители главный инженер- Кузьменко И.А., инженер ГРЭ Кузьменко Т.Ф., главный бухгалтер Матяш С. А., инженер по ОТ Главчева Г С. с другой стороны, составили настоящий акт в том, что с 6.12.06 г. по 23. 06. 07 г. в результате проведения научно-исследовательских, опытно-конструкторских работ по теме: «Диагностирование эсплуатационных режимов роботи силових трансформаторов сельских потребительских подстанций» на потребительской п/ст с силовым трансформатором 160/10-0,4 (1995 г. изготовления, после капитального ремонта) Приморского РЭС внедрено устройство диагностирования эксплуатационных режимов работы силовых трансформаторов.

В процессе внедрения выполнены следующие работы:

выполнен монтаж устройства диагностирования, монтаж измерительных преобразователей температуры, для определения теплових проводимостей между активними частями трансформатора проведены опыты холостого хода

и короткого замыкания, введены базовые параметры, наладка устройства и канала святи с диспетчерським пунктом по средствам мобильной связи.

От внедрения получены следующие предварительные результаты:

уменьшение трудозатрат по проведению технического обслуживания - на 25%; экономический эффект за текучий период составил 5980 грн; эксплуатационная надежность возросла на 12%;

Рекомендации:

1. Довести разработку до стадии серийного производства.
2. Усовершенствовать методику ввода базовых данных и отладку устройства диагностирования, применительно к различным трансформаторам.

Представители ТГДТА

Руководитель НИР
_____ В.В. Овчаров

Соискатель
_____ Л.Н.Безменникова

Представители

Инженер ПТО _____ Кузьменко И.А.

Инженер ТРЭ _____ Кузьменко Т.Ф.

Инженер по ОТ
_____ Главчева Г.С.

Главный бухгалтер
_____ Матяш С.А.

ЗАТВЕРДЖУЮ
Ректор ТДАТА

ЗАТВЕРДЖУЮ
Начальник Тячівського РЕМ

технології управління, збору і обробки інформації з видаленого об'єкту енергосистеми і підвищення культури роботи електротехнічного персоналу.

Рекомендації: довести розробку до стадії серійного виробництва, оскільки представлений пристрій діагностування експлуатаційних режимів роботи силових трансформаторів є надійним, адаптованим до роботи в умовах споживчих мереж і може застосовуватися в системі енергопостачання.

Представники ТДАТА

Керівник НДР
_____ В.В. Овчаров

Здобувач
_____ Л.М.Безменнікова

Представники Тячівського РЕМ

Гол. інженер _____ Цараска М.Ю.

Ст. майстер _____ Немеш І.В.

ВІДКРИТЕ АКЦІОНЕРНЕ ТОВАРИСТВО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАЛЬНА КОМПАНІЯ «Закарпаттяобленерго» Тячівський район електричних мереж м. Тячів 00131529 УКРАЇНА

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Кириленко О.В., Денисюк С.П. Науково-технічне забезпечення функціонування електроенергетики України. // Паливо-енергетичний комплекс України в контексті глобальних енергетичних перетворень. –К.: УЕЗ, 2004. -468с.
2. Єрмолаев С.О., Мунтян В.О., Яковлєв В.Ф. Експлуатація енергообладнання та засобів автоматизації в системі АПК: підручник / За ред. С.О.Єрмолаева. – К.: Мета, 2003. – 543 с.:іл..
3. Тихомиров И.М. Расчет трансформаторов: Учеб.пособие для вузов. - 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 528 с.: ил.
4. Федосенко Р.Я., Мельников А. Я. Эксплуатационная надежность электросетей сельскохозяйственного назначения. - М.: «Энергия», 1977. - 320 с.
5. Будзко И.А., Зуль Н.М. Электроснабжение сельского хазяйства. –М.: Агропромиздат, 1990.- 496 с.
6. Ермолаев С.А. Защита трансформаторного масла от увлажнения // Механизация и электрификация сельского хазяйства. - 1985. - № 11. - С. 55-56.
7. ГКД 34.46.501-2003 Трансформатори силові. Типова інструкція з експлуатації.. - Затв. наказом Мінпаливенерго України № 137 від 19 березня 2003р. - 82 с.
8. Банников Ю.И.,Спиридонов В.А. Исследование температурного поля трансформаторов в режиме несимметричной загрузки // Вопросы эксплуатации и повышения надежности электрооборудования / Труды ЧИМЭСХ. - Вып. 106. – Челябинск: ЧИМЭСХ, 1985. - С. 25-36.
9. Эксплуатационные режимы работы и непрерывная диагностика электрических машин в сельскохозяйственном производстве / В.В. Овчаров. – Киев: Изд-во УСХА, 1990. -168 с.
10. Наумов И. В. Показатели качества электрической энергии при несимметричной нагрузке в сети 0,38 кВ // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2002. - № 2. – С. 24-25.
11. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей. - М.: Энергий. 1985. – 547 с.
12. ГОСТ 11920 – 93. Трансформатори силові масляні загального призначення напругою до 35 кВ включно. Технічні умови. – К.: Держстандарт України,– 78 с.
13. ДСТУ 3463-96. Керівництво з навантаження силових масляних трансформаторів. Технічні умови. – К.: Держстандарт України,– 202 с.

14. Алексеев Б.А. Контроль состояния (диагностика) силовых трансформаторов. –М.: Издательство НЦ ЭНАС, 2002. - 216 с.

15. Безменнікова Л.М. Аналіз пошкоджень силових трансформаторів сільських підстанції.// Праці ТДАТА. - Вип..19. Мелітополь, 2007. –С.129-133.

16. Толпенко М.Є. Аналіз розвитку електроенергетики як складової частини паливно-енергетичного комплексу областей півдня України. // Экономические науки. – К.: , 2006. – С. 84-87.

17. Сулейманова Л.М. Повышение эксплуатационных ресурсов силовых трансформаторов при обеспечении электромагнитной совместимости по перенапряжениям // Автореферат дис.канд. технич. наук. – Самара.,2006.

18. Гарифуллин М.Ш., Козлов В.К. Диагностика состояния бумажной изоляции трансформаторов // Международная научно-техническая конференция «XII Бенардосовские чтения» / г. Иваново июнь 2005 Материалы докладов. – Том1. - Иваново: Ивановский гос. Энерг. Ун-т, 2005. - С.107-109.

19. О надежности силовых трансформаторов и автотрансформаторов электрических сетей/ М.Ю. Львов, Ю.Н. Львов, Ю.А. Дементьев и др. // Электрические станции.- 2005.- № 11.- С.69-75: схем.

20. Береговский А.В. Исследования факторов, влияющих на техническое состояние силових трансформаторов // сб.науч.тр.Ч1. Норильский индустриальный институт. –Норильск, 2006. –С. 146-149.

21. Монастырский А.Е. Экономические аспекты эксплуатации трансформаторного оборудования. «Методы и средства оценки состояния электрооборудования»Выпуск 27.Материалы семинара «Современные проблемы производства, эксплуатации и ремонта трансформаторного оборудования». – Санкт-Петербург: ПЭИПК, 2004, - С. 5-10.

22. Боднар В.В. Нагрузочная способность силовых масляных трансформаторов. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 176 с.

23. Надежность изоляции электрических машин // Галушко А.И., Максимова И.С. и др. –М.: Энергия, 1979. – 176 с.

24. Новиков И.Н. Использование электрической аналоговой модели тепловых процессов силового трансформатора в устройстве для прогнозирования его срока службы // Научные труды УСХА. –К.: УСХА, 1983.- С 25-27.

25. Киш Л. Нагрев и охлаждение трансформаторов. Пер. с венгерского. Под ред. Тарле Г.Е. – М.: Энергия, 1983. – 280 с.

26. Голунов А.М. Охлаждающие устройства масляных трансформаторов. –М. : Энергия, 1964.- 152 с.

27. Сви П.М. Методы и средства диагностики оборудования высокого напряжения. – М.: Энергоатомиздат. 1992. -240с.

28. Технические средства диагностики: Справочник // Клюев В.В., Пархоменко П.П., Абрамчук В.Е. и др. Под общей ред. Клюева В.В. –М.:

Машиностроение, 1989. – 160с.

29. Осотов В.Н. Совершенствование системы сервисного обслуживания для повышения надежности электроснабжения.// Энергетик.- 2007, - № 2. - С. 6-7.

30. Васютинский С.Б. Вопросы теории и расчета трансформаторов. – Л.: Энергия, 1970. -432 с.

31. Готтер Г. Нагревание и охлаждение электрических машин. –М.; Л.: Госэнергоиздат, 1961. – 480 с.

32. Шницер Л.М. Нагрузочная способность силовых трансформаторов. - М.; Л.: Госэнергоиздат, 1953. – 111 с.

33. Бернштейн И.Я. Износ изоляции и нагрузочная способность // Энергетика за рубежом. Трансформаторы.- М.; Л.: Госэнергоиздат, 1961. – Вып.5 –С. 62-91.

34. Whitman L.C. Cheng of time constant with transformer load. – AIEE Transactions, 1983, vol.PAS-82, p. 760-764.

35. Incropera F. P., and DeWitt D. P., "Fundamentals of Heat and Mass Transfer", 4th ed., John Wiley & Sons, 1996, pp. 886.

36. Radakovic Z.,Feser K.,"A new method for the calculation of the hot-spot temperature in power transformers with ONAN cooling", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 18 , Iss. 4, October 2003, pp.1284 -1292.

37. Филиппов И.Ф.Основы теплообмена в электрических машинах. – Ленинград.: «Энергия», 1974. -384 с.

38. Залесский А.М., Кукенков Г.А. Теплове расчеты электрических аппаратов . – Ленинград.: Энергия, 1967. –379 с.

39. В.И.Егоров Точные методы решения задач теплопроводности. Учебное пособие. – СПб: СПб ГУ ИТМО, 2006. - 48 с.

40. Влияние нарушения циркуляции хладагента на тепловое состояние обмотки статора турбогенератора типа ТВВ - 1000-2УЗ / Г.М. Федоренко, В.И. Выговский, А.В. Выговский // Техн. електродинаміка. -1998. - № 6. - С. 50-55.

41. Диагностика термических дефектов обмотки статора турбогенераторов с непосредственным охлаждением проводников / В.И. Выговский // Техн. електродинаміка. — 1999. — № 6. — С. 55-59.

42. Состояние исследований по проблеме электродинамической стойкости силовых трансформаторов / П.Г. Кохан, А.Н. Кравченко, А.И. Титко // Техн. електродинаміка. — 2005. — № 6. — С. 66-71

43. Новиков И.Н. Использование электрической аналоговой модели теплових процес сов силового трансформатора в устройстве для прогнозирования его срока службы. // Сборник научных трудов УСХА. – Киев, 1983. С 25-27.
44. Susa D., Lehtonen M., and Nordman H.," Dyn Modelling of Power Transformers", IEEE Transactions on Power 20, Iss. 1, January 2005, pp. 197 - 204.
45. Федоров М.М. Динамические теплове модели узлов электрических машин// Електромашинобудування та електрообладнання. К. -1999. -№53. –С.70-73.
46. Declercq J., and Van der Veken W., " Accurate hot spot modeling in a power transformer leading to improved design and performance", Transmission and Distribution Conference, 1999 IEEE ,Vol. 2 , 11-16 April 1999, pp. 920-924.
47. Климов Д.А., Попов Г.В.,Тихонов А.И. Методы автоматизированного моделирования динамических процессов трансформаторов. ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина». – Иваново, 2006. - 100 с.
48. Вовк О.В. Аналіз усталеного теплового режиму асинхронного електродвигуна в експлуатації // Праці Таврійської державної агротехнічної академії. – Вип.. 32.- Мелітополь, 2005. –С33-38.
49. Євтушенко В.Н. Расчет нагревания асинхронного электродвигателя при перегрузках // Сборник научных трудов УСХА. –К, 1983. –С35-37.
50. Пчелінцев А.В.,; Шумяцький В.М.Спрощена теплова математична модель двигуна // Автоматизація технологічних об’єктів та процесів. Пошук молодих” ДонНТУ-2004, Донецьк, 2004. – С.258-262.
51. Бурковский А.Н., Ковалев Е.Б., Коробков Е.К. Нагрев и охлаждение электродвигателей взрывозащищенного исполнения. – М: Энергия, 1970, 185с.
52. K. O. Wong, Dr. T. K. Saha “Expert System for the Fault Diagnosis of Oil-Filled Power Transformer Using Dissolved Gas Analysis” Nov.2000, School of Computer Science and Electrical Engineering, The University of ueensland, Brisbane, Australia.
53. Hong-Tzer Yang and Yann-Chang Huang,“Intelligent Decision Support for Diagnosis ofIncipient Transformer Faults Using Self-Organizing Polynomial Networks”, IEEE Transactions on Power System, Vol. 13, No 13, Aug 1998, pp. 946.
54. Tylavsky D.J., Qing He, Jennie Si, McCulla G.A., Hunt J.R., "Transformer top-oil temperature modeling and simulation", IEEE Transactions on Industry Applications,Vol.36, Iss.5, Sept.-Oct.2000, pp. 1219 – 1225.
55. Van der Veken W., Declercq J., Baelmans M., and Van Mileghem S., "New perspectives to overloading with accurate modeling of thermal transients in oil-immersed power transformers", Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2001 IEEE/PES ,Vol. 1 , 28 Oct.-

2 Nov. 2001, pp. 147 – 152.

56. Weekes T., Molinski T., Xin Li, and Swift G., "Risk assessment using transformer loss of life data", Electrical Insulation Magazine, IEEE ,Vol. 20, Iss. 2, March-April 2004, pp. 27 – 31.

57. Weekes T., Molinski T., and Swift, G., "Transient transformer overload ratings and protection", Electrical Insulation Magazine, IEEE , Vol. 20, Iss. 2, March-April 2004, pp.32 – 35.

58. Nordman H., Rafsback N., and Susa, D., "Temperature responses to step changes in the load current of power transformers", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 18 , Iss. 4 , Oct. 2003, pp.1110 – 1117.

59. Oommen T.V., and Lindgren S.R., "Bubble evolution from transformer overload", Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2001 IEEE/PES ,Vol. 1 , 28 Oct.-2 Nov. 2001, pp.137-142.

60. Pierce L.W., and Holifield T., "A thermal model for optimized distribution and small power transformer design", Transmission and Distribution Conference, 1999 IEEE ,Vol. 2 , 11-16 April 1999 , pp. 925 - 929.

61. Объем и нормы испытаний электрооборудования. РД 34.45-51.300-97. – М.: изд-во НЦ "ЭНАС", 2000, 256 с.

62. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей и правила при эксплуатации электроустановок потребителей. –М.: Энергоатомиздат, 2003, 245с.

63. Методические указания по подготовке и проведению хроматографического анализа газов, растворенных в масле силовых трансформаторов. РД 34.46.303-98. – М.: ОАО "ВНИИЭ", 1998, 48 с.

64. Методические указания по диагностике развивающихся дефектов трансформаторного оборудования по результатам хроматографического анализа газов, растворенных в масле. РД 153-34.0-46.302-00. – М.: ОАО " ВНИИЭ", 2001, 41 с.

65. Методика количественного химического анализа. Определение содержания производных фурана в электроизоляционных маслах методом высокоэффективной жидкостной хроматографии. РД 34.43.206-94. – М.: СПО "ОРГРЭС", 1995, 12 с.

66. Львов М.Ю. Информативность контролируемых показателей при диагностике силовых трансформаторов.– В сб. "Инновации в энергетических технологиях. Доклады юбилейной научно-практической конференции, посвященной 50-летию ИПК Госслужбы" – Т.3. Под ред. О. А. Терешко. М.: ИПК Госслужбы, ВИПКЭнерго, 2002, С.219-224.

67. Ванин Б.В., Львов Ю.Н., Львов М.Ю., Неклепаев Б.Н. Показатели состояния изоляции для оценки возникновения внутренних коротких замыканий в силовых трансформаторах // Электрические станции, 2003, № 2.

68. I.Gussenbauer. Examination of Humidity Distribution in Transformer Models by Means of Dielectric Measurments. CIGRE, v. 1, Sec. 15-02, 1980/

69. Шлегель О.А., Хренников А.Ю., Запорожец М.И.Диагностика повреждений силовых трансформаторов // Электрические станции 1994.- №2. –С. 43.
70. Хренников А.Ю., Киков О.М. Диагностика силовых трансформаторов методом низковолотных импульсов // Электрические станции. -№ 11 - 2003. –С. 12-15.
71. Дробышевский А.А., Левицкая Е.И., Андреев Д.В., Бельцер В.Р. Диагностика деформаций обмоток силових трансформаторов и реакторов методом низковольтных импульсов. –М.: Электротехника, 1997, №3. –С. 48-51
72. Соколов В.В. Разработка методов повышения эффективности диагностики состояния изоляции мощных силовых трансформаторов. Автореферат. – К.: Б.и., 1982.
73. Соколов В.В. Актуальные задачи развития методов и средств диагностики трансформаторного оборудования под напряжением. – М.: Известия РАН. Энергетика, 1997, №1. -С.18-23.
74. Лапонов С.Н., Шишминцев В.В. Тепловизионный контроль и диагностика электрооборудования. – М.: Промышленная энергетика,2000, №11. –С.8-9
75. Журавлев А.Н., Попов Г.В. Технология тепловизионного контроля в диагностике силовых трансформаторов // Весник ИГЭУ. – 2001,- №1.-С.7-9
76. Малов А.В., Снетков А.Ю. Тепловизионное обследование силовых трансформаторов // Энергетик. -2000. -№2. –С. 34-35.
77. Озерницкий И.М. Новые решения в тепловизионных системах диагностики промышленного оборудования. // Энергетик. –2000. –№ 11. –С. 23-24.
78. Власов А.Б. Диагностическая модель тепловизионного контроля высоковольтных выводов//Методы и средства оценки состояния электрооборудования. - Выпуск 27. – Санкт-Петербург: ПЭИПК, 2004. –С. 41-53
79. Будадин О.Н., Потапов А.И., Колганов В.И., Троицкий—Марков Т.Е., Абрамова Е.В., Тепловой неразрушающий контроль изделий, - М.: Наука, 2002.
80. Бажанов С.А., ИК-диагностика электрооборудования распределительных устройств. Библиотечка электротехника, вып. 4(16). - М., 2000. с.15.
81. Хренников А.Ю., Шлегель О.А. Контроль измерения индуктивного сопротивления трансформатора для определения повреждений в обмотках. // Энергетик. -2004, -№2.- 27-30.
82. Засыпкин А.С., Дорожко С.В. Схема замещения нулевой последовательности несимметричного трансформатора как модель диагностирования деформаций обмоток. – М.: Электричество, 1995, №9, - С.14-16.

83. Transformateur de summation et processus de sa fabrscatson. Metz Pserre; Soc/ d'Etude et de Réali sation de Disjoncteurs. Заявка 2581264, Франция. Заявл. 26.04.85, № 8506532, опубл. 31.10.86. МКИ H 02 H 3/33, H 01 F 41/06.

84. Пат. 34253 Україна, МПК G01R 31/06. Пристрій для вимірювання спрацювання силових трансформаторів / Мокін Борис Іванович, Грабко Володимир Віталійович (Україна). – №99063415; Заявлено 18.06.99; Опубліковано 15.02.01, Бюл. №1.

85. А.с. 864158 СССР, МПК G01R 19/26. Устройство для измерения износа силовых трансформаторов / А.И. Бетнева, Ж.П. Гейдерман, Г.В. Краснов, Р.Ф. Стасенко, И.А. Федотов (СССР). – №2844851/18-21; Заявлено 20.11. 79; Опубликовано 15.09.81, Бюл. №34.

86. А.с. 1000937 СССР. Устройство для прогнозирования расхода ресурса изоляции трансформатора / В.В.Овчаров, В.Я. Жарков, И.Н. Новиков, А.Я . Чураков (СССР). – Опубл.,1983. Бюл. №8.

87. Новиков И.Н. Определение расхода ресурса изоляции трансформатора. // Сборник научных трудов УСХА. – Киев, 1988. - С 27-29.

88. А.С. 1275297, СССР. Счетчик износа витковой изоляции трансформатора / Розенкрон Я.К., Зандебергс Г.А., Биманис В.В.Заявка 22.02.85 № 3859174/24-21, опубл. В Б.И., 1986, № 45, МКИ G 01 R11/00.

89. Publication number:CH663093 (Швейцария). Method for measuring the use of life of power transformers / MAX FRIEDRICH. Publication date: 13.11.87, Classification: - international:G07C3/00; G07C3/00; (IPC1-7): G01M19/00; H01F15/00 - European: G07C3/00 Application number:CH19830004845 19830905 Priority number(s):CH19830004845 19830905.

90. Dispositif de suivi pour transtormateur de distributsn d'énergie électrigue. Aftalion René; Alsthom-Atlantigue. Заявк 2580815, Франция, Заявл, 17.04.85 , №8505796, опубл. 24.10.84 МКИ G 01 R22/0, G 05 B 15/02.

91. Purkait P., Chakravorts S. Time and frequency domain analyses based expert system for impulse fault diagnosis in transformers. IEEE.Trans. Dieles.And Elec.Insul.2002. 9, № 3., p.433-445.

92. *Руссов В.А.*Контроль прессовки обмоток и магнитопровода крупных трансформаторов по вибропараметрам. – М.:Электрические станции, 1998 , №6. –С. 41-42.

93. Техническое описание модулей системы TDM. – Пермь, 2006.- с 14.

94. Экспертная диагностика и мониторинг эксплуатационной надежности силовых трансформаторов / *А.В. Береговских, В.Г. Сазыкин* // Всероссийская конференция аспирантов и молодых ученых. – Екатеринбург, 2006. – С. 19-21.

95. *Береговских А.В*. Экспертная диагностика силовых трансформаторов // Наука. Технологии. Инновации: Материалы всероссийской научной конференции молодых ученых в 7-ми частях. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006. Часть 7. – С. 90-92.
Береговских, А.В. Организация мониторинга, экспертной диагностики и

96. прогнозирования технического состояния силовых трансформаторов предприятий машиностроения // Московский гос. горный ун-т. Москва, 2006. 4с.

97. *Ватлецов А.В., Виноградова Л.В., Данилин И.А. и др.* Экспертная система оценки состояния силовых масляных трансформаторов « Диагностика +». // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВИ,№ 2002610211. –М.: 2002.

98. Новые возможности компьютерной системы «Диагностика +» при оценки состояния маслонаполненного оборудования. *Г.В.Попов, А.В. Ватлецов, Л .В. Виноградова, Е.Б. Игнатьев. /* Сборник «Методы и средства оценки состояния энергетического оборудования», выпуск 20, С.-Петербург, ПЭИПК, 2002.

99. *Попов Г.В., Рогожников Ю.Ю.* Алгоритм диагностики масляных трансформаторов // Электрические станции. -2003. № 8. –С. 54-59.

100. *Игнатьев Е.Б., Комков Е.Ю., Попов Г.В*. Оценка состояния электрооборудования на основе программного комплекса «Диагностика + » в режиме on-line. –VIII Симпозиум «Электротехника 2010». Сборник тезисов докладов. –М.: ВЭИ, 2005. –С.102-106.

101. *Долин А.П., Першина Н.Ф., Смекалов В.В.* Опыт проведения комплексных обследований силовых трансформаторов // Электрические станции. – М.: - 2000. -№6. –С. 8-14.

102. *ГОСТ 14209 – 97.* Керівництво з навантаження силових масляних трансформаторів. – К.: Держстандарт України. – 202 с.

103. *Банников Ю.И.,Спиридонов В.А.* Исследование температурного поля трансформаторов при симметричной токовой загрузке / Вопросы эксплуатации и повышения надежности электрооборудования // Труды ЧИМЭСХ, - вып. 91. Челябинск, 1975. - С. 24-35.

104. *Банников Ю.И.,Спиридонов В.А.* Исследование температурного поля трансформаторов в режиме несимметричной загрузки / Вопросы эксплуатации и повышения надежности электрооборудования // Труды ЧИМЭСХ, - вып. 91. Челябинск, 1975. - С. 37-43.

105. *Бронштейн И.Н., Семендяев К.А.* Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. – М., 1980. – 976 с.

106. *ГОСТ 3484 – 77.* Трансформаторы силовые. Методы испытаний. – М.: Изд-во стандартов, 1980. – 55 с.

107. *Веденяпин В.Г*. Общая методика експериментального исследования и обработки опытных даннях. – М.: Колос, 1973. -199 с.

10 *Богданович Н.И.* Расчеты в планировании эксперимента. Учебное пособие 8 . –Л.: Изд.ЛТА, 1987. - 80 с.
.

109. Электрические измерения: Учебное пособие */ В.Н. Малиновский, Р.М. Демидова-Панферова, Ю.Н. Евланов и др..*/ Под ред../ *В.Н. Малиновского.* – М.: Энергоатомиздат, 1985. - 416 с.
110. Основы научных исследований: Учеб. Для техн..вузов / В.*И.Крутов, И.М. Грушко, В.В. Попов* и др.; Под ред. В.И.Крутова, В.В. Попова. –М.: Высшая школа, 1989. - 400с.
111. *Красовский Г.И., Филаретов Г.Ф.* Планирование эксперимента. – Мн.: Изд-во БГУ, 1982. – 302 с.
112. *Овчаров В.В*., *Безменнікова Л.М*. Теоретичне обґрунтування визначення теплових провідностей у силових трансформаторах // Праці ТГАТА. - Випуск 19, - Мелітополь, ТДАТА, 2004.- С.18-21.
113. *Овчаров В.В.,Безменнікова Л.М*. Аналітичне дослідження залежності температури обмоток силового трансформатора у функції температури масла і кратності сили струму // Праці ТГАТА. - Випуск № 32, - Мелітополь: ТДАТА, 2005.- С.39-43.
114. Справочник по прикладной статистике. В 2-х т. Т.1. Пер. с англ./ Под ред. Э. Ллойда, У. Ледермана, Ю.Н. Тюрина. – М.: Финансы и статистика, 1989. - 510 с.: ил.
115. *Формалёв В.Ф., Ревизников Д.Л.* Численне методы. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. - 400 с.
116. *Безменникова Л.Н*. Исследование нагрева силового трансформатора при неравномерной нагрузке фаз // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. 2007, №6. - С.29 – 35.
117. *Овчаров В.В*. Теоретичні основи електротехніки. – К.: Урожай, 1993.- 224 с.
118. *Овчаров С.В*. Експлуатаційні режими роботи асинхронних електродвигунів потокових технологічних ліній в умовах агропромислового комплексу: Автореф. дис.. канд. техн. наук: 05.09.16 / ХНТУСГ, - Харків, 2004. - 24 с.
119. *Овчаров В.В.*, *Безменникова Л.Н*. Исследование теплових переходных процессов в силових трансформаторах при воздействии сверх токов// Праці ТГАТА. - Випуск 45, - Мелітополь: ТДАТА, 2006. - С.32-39.
120. *Безменникова Л.М*. Математична модель діагностування функціонального стану силових трансформаторів сільських підстанцій // Праці ХНТУСГ випуск № 43, том1.-Харків: ХНТУГС, 2006.- С.197-201.
121. *Рижков А.О.* Вимірювання температури у складі мікроконтролерного пристрою діагностування режимів роботи асинхронних двигунів //. Праці Таврійська державна агротехнічна академія –Вип.45. – Мелітополь: ТДАТА, 2006. - С.65-71.
122. *Мирошник И.В.* Теория автоматического управления. Линейные системы. – СПб.: Питер, 2005. -336 с.

123. *Точчи Р.Дж., Уиднер Н.С.* Теория и практика, 8-е изд. : пер. с англ..- М.: изательский дом «Вильямс», 2004. -1024 с.
124. *Мартыненко И.И., Лысенко В.Ф.* Проектирование систем автоматики. – М .: Агропромиздат, 1990. – 243с.
125. Продукція сільського господарства // Статистичний щорічник України за 2005 р. – К.: ІОЦ Держкомстату України. –С. 149
126. *Рюмин В.П.* Ценообразование научно-технической продукции. –М: Финансы и статистика, 1991. - 80 с.
127. Расчеты экономической эффективности новой техники: Справочник / Под общ. Ред.. К.М. Велика нова. –Л.: Машиностроение, 1990. - 448 с.
128. *Безменнікова Л.М.*, *Переверзєв Д.М.* Пристрій діагностування експлуатаційних режимів роботи силового трансформатора // Матеріали науково-технічної конференції магістрів та студентів ТДАТА. - Вип..1 -т.2 .-Мелітополь: ТДАТА, 2006.-С.18-19.
129. *Безменникова Л.Н.* Устройство функционального диагностирования силовых трансформаторов // Збірник наукових праць Дніпродзержинського університету (технічні науки). Тематичний випуск «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія й практика» / Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2007. –С. 467-468.