МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(национальный исследовательский университет)
«Политехнический институт»
Факультет «Энергетический»
Кафедра «Электрические станции, сети и системы электроснабжения»

ПРОЕКТ ПРОВЕРЕН
Рецензент

_____
_____2018 г.

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ
Заведующий кафедрой

_____/И.М. Кирпичникова/
_____2018 г.

Адаптивная защита трансформатора

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ
ЮУрГУ–13.04.02.2018.05.262 ВКР

Руководитель проекта

_____/А.В.Прокудин/
_____2018 г.

Автор проекта
Студент группы П-282
_____/П.Д. Грачёв/
_____2018 г.

Нормоконтролер
_____/А.В. Прокудин/
_____2018 г.

Челябинск 2018

АННОТАЦИЯ

Грачёв П.Д. Адаптивная защита трансформатора – Челябинск: ЮУрГУ, П, 2018, 30 с., 15 ил., библиогр. список – 10 наим..

В научно-выпускной работе представлен анализ существующих на данный момент способов защиты трансформаторов от перегрузки, по результатам которого была разработана новая защита, которая позволит более полно использовать рабочий ресурс трансформатора и повысить надежность электроснабжения.

Произведен расчет и составлена тепловая модель трансформатора ТМ-25/10 для дальнейшей реализации на ее базе защиты от перегрузки. Моделирование произведено в программной среде Multisim, после чего производится проверка выполненной модели согласно правилам и нормам ГОСТ на допустимые перегрузки для трансформаторов данной марки.

По данным характеристикам и схеме работы защиты составляется алгоритм ее функционирования, а также разобран принцип ее действия.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ОГЛАВЛЕНИЕ 3
ВВЕДЕНИЕ 4
1. ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ ЗАЩИТ ТРАНСФОРМАТОРОВ 5
1.1. Защита трансформаторов плавкими предохранителями 5
1.1.1 Выбор плавких предохранителей для защиты трансформатора 6
1.2. Реле тока серии РТ-40 и РТ-80 7
1.2.1 Расчет тока срабатывания 13
1.3 Цифровая РЗ 14
1.3.1 Пример исполнения защиты от перегрузок 14
1.4 Выявление недостатков защит и постановка задачи 16
2 СОСТАВЛЕНИЕ ТЕПЛОВОЙ МОДЕЛИ, ЕЕ АНАЛИЗ И ПРОВЕРКА, СОСТАВЛЕНИЕ АЛГОРИТМА 17
2.1 Составление тепловой модели и ее проверка 17
2.2. Нормы допустимых перегрузок по ГОСТ 18
2.2.1 Требования по нагреву согласно ГОСТ 18
2.3 Тепловая модель и ее проверка 20
2.4. Разработка алгоритма работы защиты 24
3 АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ И ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ 26
3.1 Допустимая кратность перегрузки для продолжительной работы трансформатора при различных температурах окружающей среды 26
3.2 Оценка износа изоляции в зависимости от температур обмотки 28
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 29
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК 30

ВВЕДЕНИЕ

В отрасли релейной защиты термином реле обычно обозначают автоматически действующее устройство, производящее скачкообразное изменение (так называемое релейное действие) в управляющей системе при заданном изменении контролируемых параметров. Так, например, реле максимального тока при увеличении тока в контролируемой цепи (куда включена токовая обмотка этого реле) до заданного значения, называемого током срабатывания, замыкает своими контактами управляемую цепь.

Под устройством релейной защиты подразумевается совокупность реле, приборов и вспомогательных элементов, которые при возникновении повреждений и ненормальных режимов работы оборудования должны действовать на его отключение или на сигнал.

Для защиты оборудования от КЗ еще в конце XIX века применялись плавкие предохранители.

В 1901 г появляются индукционные реле тока.

В 1905-1908 гг. разрабатывается дифференциальный токовый принцип.

В начале 20-х годов были выпущены первые дистанционные защиты.

В 1923-1928гг предпринимаются первые шаги по использованию для защиты электроники, в частности токов высокой частоты, передаваемых по проводам защищаемой линии.

В 1932г в СССР была разработана дистанционная защита на электронных лампах.

В 70-е годы началось широкое применение для нужд РЗА электронных устройств. (УПЗ-70, МТЗ-М, БА- УРПН, ЭПЗ-1636, ФИП-1, ФИП-2, АРТ-1Н, ТЗВР, КРЗА и многие другие).

В 80-е годы началось применение устройств РЗА на интегральных микросхема.

1. ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ ЗАЩИТ ТРАНСФОРМАТОРОВ

1.1. Защита трансформаторов плавкими предохранителями

Плавким предохранителем называется коммутационный электрический аппарат, предназначенный для отключения защищаемой цепи посредством расплавления специальных токоведущих частей (плавких вставок) под воздействием тока, превышающего определенное значение, с последующим гашением возникающей электрической дуги.

По способу гашения дуги предохранители могут быть разделены на три группы:

- предохранители для сетей до 1000 В с естественной деионизацией дуги, не имеющие специальных устройств для гашения дуги (СПО, П, ПТ). Они сейчас не выпускаются в связи с малой отключающей способностью и большими размерами, а также по условиям техники безопасности;

- предохранители с трубками из газогенерирующего материала, который обильно выделяет газы при высокой температуре горения электрической дуги; возникающие в этот момент высокое давление (в предохранителях ПР напряжением до 1000 В) или продольное дутье (в предохранителях ПСН напряжением выше 1000 В) обеспечивают быстрое гашение дуги;

- предохранители с наполнителем (кварцевым песком), в которых электрическая дуга гасится в канале малого диаметра, образованном телом испарившейся плавкой вставки, между крупинками (гранулами) кварцевого песка.

Наибольшее распространение получили предохранители с кварцевым наполнителем, часто называемые кварцевыми предохранителями. К ним относятся предохранители ПН, НПН (напряжением до 1000 В) и ПК, ПКТ (напряжением выше 1000 В).

Процесс работы плавких предохранителей всех типов состоит таким образом из трех этапов: нагрев плавкой вставки до температуры плавления, плавление плавкой вставки и гашение электрической дуги. Полное время

отключения защищаемой цепи состоит из суммы времени нагрева и плавления вставки и времени гашения дуги.

Фактические защитные характеристики могут отличаться от типовых таким образом, что при одном и том же значении времени плавления значение тока будет на 20% больше или меньше. Иначе говоря, фактическая защитная характеристика должна изображаться в виде зоны, ограниченной характеристиками, сдвинутыми влево и вправо на 20% от средней, типовой, характеристики (Рис. 1.1) Это особенно важно учитывать при согласовании характеристик релейной защиты и предохранителей на соседних участках сети для обеспечения селективности их действия.

Время гашения дуги также зависит от значения тока, проходящего через предохранитель.

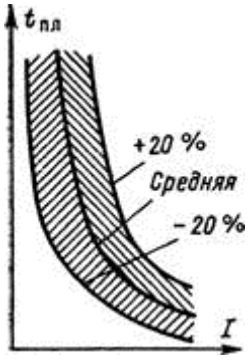

Рис. 1.1 – Разброс защитных характеристик
плавких предохранителей выше 1000 В

Полное время отключения тока, или, иначе говоря, время срабатывания предохранителя:

$$t_{ср} = t_{пл} + t_{гор}$$

1.1.1 Выбор плавких предохранителей для защиты трансформатора

При выборе плавких предохранителей руководствуются следующими условиями:

1) Номинальное напряжение предохранителя должно соответствовать номинальному напряжению защищаемой установки;

2) Номинальный ток вставки должен быть выбран так, чтобы она не расплавлялась в утяжеленном режиме при наибольшем значении тока. Вставка не должна плавиться в переходных режимах, например, для включения силового трансформатора броски намагничивающего тока превышают номинальный в 8-10 раз.

3) Номинальный ток отключения предохранителя не должен быть меньше периодической составляющей тока КЗ:

$$I_{\text{откл. ном}} < I_{\text{п}0};$$

4) Значение наибольшего мгновенного тока, пропускаемого токоограничивающими предохранителями, не должно превышать допустимых токов аппаратов в защищаемой части сети.

1.2. Реле тока серии РТ-40 и РТ-80

Принцип устройства электромагнитного токового реле типа РТ-40

Реле предназначено для применения в схемах РЗ и автоматики энергетических систем в качестве органа, реагирующего на повышение тока. В реле РТ-40 использована электромагнитная система с поперечным движением якоря.

Схема внутренних соединений реле РТ-40 (рис. 1.2). Обмотка реле выполнена двумя полуобмотками (секциями) подключенными к клеммам 6 – 10 и 8 – 12. Замыкая с помощью перемычек клеммы 6 – 8 и 10 – 12 можно получить параллельное соединение секций, а замкнув клеммы 8 – 10 – последовательное соединение.

Нормально-замкнутый (размыкающий) контакт реле подключен к клеммам 9 – 11, а нормально-разомкнутый (замыкающий) контакт к клеммам 5 – 7.

При последовательном соединение секций количество витков обмотки увеличивается в два раза, по сравнению с параллельным соединением.

Уставки срабатывания токовых реле РТ-40 регулируются изменением натяжения пружины с помощью поводка (указателя уставки) и изменением

соединения катушек обмотки реле (последовательно или параллельно), что изменяет пределы шкалы в 2 раза.

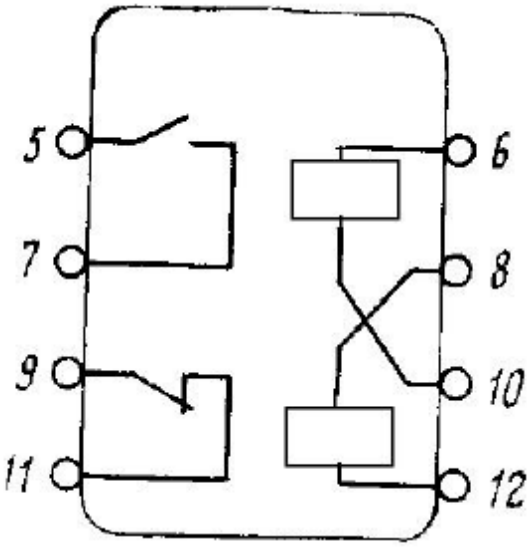

Рис. 1.2 – Схема внутренних соединений реле РТ-40

Принцип устройства электромагнитного токового реле типа РТ-80

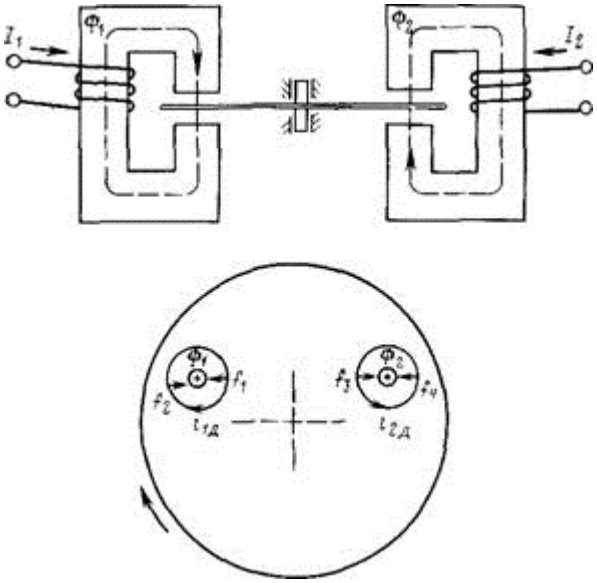

Рис. 1.3 – Принцип действия индукционного реле

В индукционных реле подвижной частью служит алюминиевый диск или барабанчик, укрепленный на оси и поворачивающийся под действием вращающего момента. Вращающий момент является результатом взаимодействия магнитных потоков с наведенными ими в диске или барабанчике вихревыми токами.

Существует 12 модификаций реле серии РТ-80. Каждая из них выпускается в двух исполнениях: для выступающего монтажа с передним и задним присоединением и для утопленного монтажа. Кроме того, реле выпускаются в различных климатических исполнениях и в зависимости от условий работы - по категориям.

В обозначении реле цифра за дробной чертой указывает на диапазон уставок по току: 1 - диапазон уставок 4 - 10 А со ступенью 1 А; 2 - диапазон уставок 2 - 5 А со ступенью 0,5 А.

Реле типов РТ-81 - РТ-84 предназначены для объектов, имеющих источник постоянного или выпрямленного оперативного напряжения (аккумуляторная батарея, блоки питания). Эти реле снабжены замыкающими контактами нормального исполнения, способными включать при замыкании ток до 5 А при напряжении до 250 В. Такая коммутационная способность достаточна для непосредственного замыкания цепи отключения выключателя. Однако размыкание цепи должно производиться вспомогательным контактом выключателя.

Реле типов РТ-81/1 и РТ-81/2 предназначены для защиты питающих и распределительных линий в сетях 6-35 кВ, а также для защиты трансформаторов. Реле имеют четырехзаходный червяк, которому соответствует шкала уставок по времени 0,5 - 4 с в независимой части характеристики.

Реле типов РТ-82/1 и РТ-82/2 предназначены для защиты электродвигателей от междуфазных и витковых замыканий с действием без выдержки времени на отключение (отсечка) и для защиты от перегрузки, действующей с выдержкой времени также на отключение. В отличие от реле РТ-81 они имеют однозаходный червяк и соответственную шкалу уставок по времени 2 - 16 с в независимой части характеристики.

Реле типов РТ-83/1 и РТ-83/2 предназначены для защиты линий и трансформаторов, причем защита от междуфазных КЗ (отсечка) действует на отключение, а защита от перегрузки - с выдержкой времени на сигнал.

Конструктивная особенность этих реле заключается в отсутствии механической связи между индукционным и электромагнитным элементами, т. е. в отсутствии толкателя. Сигнальные контакты, имеющиеся в реле, управляются хвостовиком зубчатого сектора, замыкаясь при его подъеме. Таким образом, электромагнитный элемент воздействует на главные контакты и сигнальный флажок, а индукционный - на сигнальные контакты. Замыкающие сигнальные контакты способны замыкать и размыкать цепь постоянного или выпрямленного тока до 0,2 А или переменного тока до 1 А при напряжении до 250 В. Так как часть хода зубчатого сектора тратится на перемещение сигнального контакта, шкала выдержек времени сокращена на одну минимальную уставку.

Аналогичную конструкцию контактной системы имеют реле типов РТ-84/1 и РТ-84/2. С их помощью выполняется защита электродвигателей от междуфазных и витковых замыканий (отсечка) с действием на отключение, а от перегрузки - с действием на сигнал или технологическую разгрузку. Реле имеют пределы уставок по времени 4-16 с в независимой части характеристики.

Реле типов РТ-85, РТ-86 используются в устройствах защиты на переменном оперативном токе. Они оснащены контактами усиленной мощности. Эти контакты способны шунтировать и дешунтировать управляемую цепь при токах до 150 А, если ее полное сопротивление не более 4 Ом при токе 4 А и не более 1,5 Ом при токе 50 А (сопротивление катушки с сердечником падает при возрастании тока из-за насыщения железа).

Реле типов РТ-86/1 и РТ-86/2, предназначенные для защиты электродвигателей, имеют контакты усиленной мощности, управляемые только якорем отсечки, и сигнальные контакты, управляемые индукционным элементом. В этом они аналогичны реле РТ-84 и имеют такую же шкалу уставок.

Номинальные данные, уставки и схемы внутренних соединений реле серии РТ-80 приведены в табл. 1. Потребляемая мощность реле при токе уставки - не

более 10 В·А. После срабатывания отсечки потребляемая мощность увеличивается на 15%. Коэффициент возврата реле (индукционного элемента) - не менее 0,8. Переход времятоковой характеристики в независимую часть происходит при 8-10-кратном токе.

Таблица 1.1

Тип реле	Номи-нальный ток, А	Пределы шкалы уставок по току, А	Ступень шкалы уставок по току, А	Пределы шкалы уставок повременн , с	Контакты	Схема соединений по рис 10
РТ-81/1	10	4-10	1	0,5-4	Нормальный	а
РТ-81/2	5	2-5	0,5	0,5-4	»	
РТ-82/1	10	4-10	1	2-16	»	
РТ-82/2	5	2-5	0,5	2-16	»	
РТ-83/1	10	4-10	1	1-4	Нормальный и сигнальный	б
РТ-83/2	5	2-5	0,5	1-4	Тоже	
РТ-84/1	10	4-10	1	4-16	,,	
РТ-84/2	5	2-5	0,5	4-16	»	
РТ-85/1	10	4-10	1	0,5-4	Усиленный	в
РТ-85/2	5	2-5	0,5	0,5-4		
РТ-86/1	10	4-10	1	4-16	Усиленный и сигнальный	г
РТ-86/2	5	2-5	0,5	4-16	То же	
РТ-91/1	10	4-10	1	0,5-4	Нормальный	а
РТ-91/2	5	2-5	0,5	0,5-4	»	
РТ-95/1	10	4-10	1	0,5-4	Усиленный	в
РТ-95/2	5	2-5	0,5	0,5-4	»	

В независимой части характеристики. Примечание. Кратность тока срабатывания отсечки к току срабатывания индукционного элемента у реле всех модификаций находится в пределах 2—8

Инерция вращающегося диска послужила причиной двух нежелательных явлений: инерционного выбега, упомянутого ранее, и замедленного возврата. Инерционный выбег практически не зависит от тока и составляет около 40 мс.

Время возврата реле при снижении тока с 5 $I_{уст}$ до 0,7 $I_{уст}$ не превышает 0,8 с.

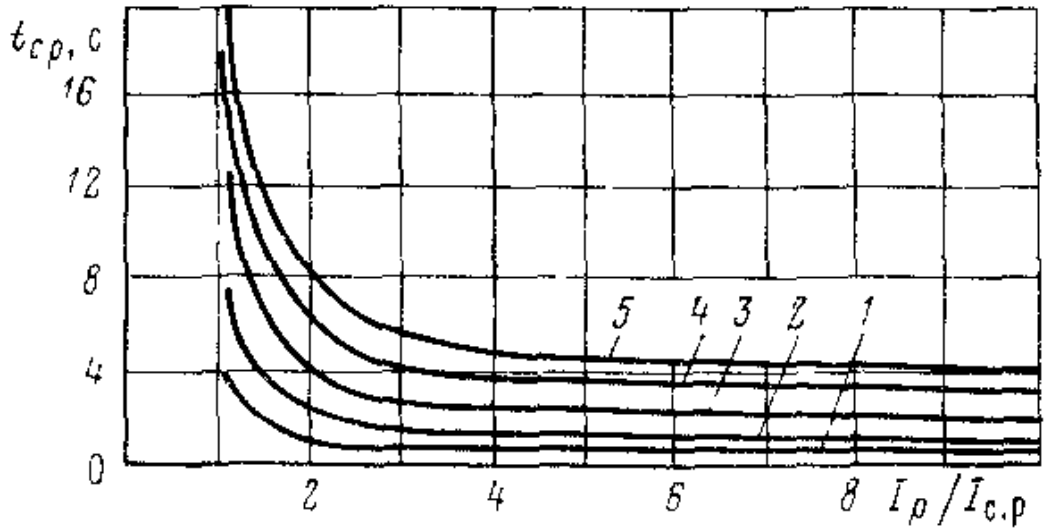

Рис. 1.3 – Времятоковые характеристики реле типов РТ-81, РТ-83, РТ-85 с уставками: *1* - 0,5 с; 2 - 1 с; 3 - 2 с; 4 – 3 с; 5 - 4 с

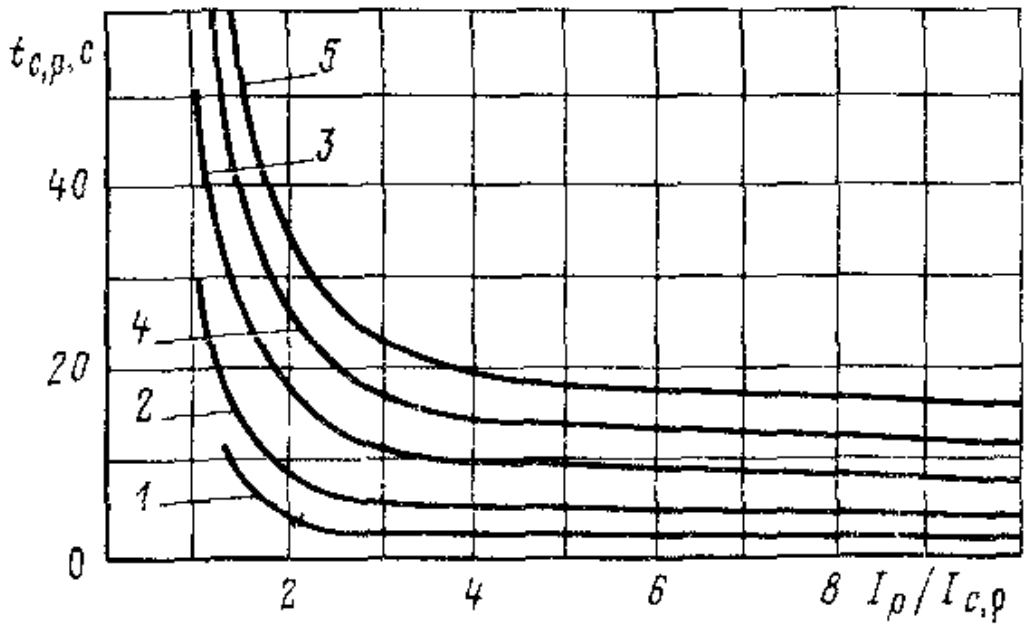

Рис. 1.4 – Времятоковые характеристики реле типов РТ-82, РТ-84 и РТ-86 с уставками: 1 - 2 с; 2 - 4 с; 3 - 8 с; 4 - 12 с; 5 - 16 с

На рис. 1.3-1.4 представлены времятоковые характеристики реле, на рис. 1.5 - кривые зависимости полного сопротивления обмотки реле от кратности тока. Увеличение тока приводит к насыщению магнитопровода, вследствие этого уменьшается индуктивность обмотки.

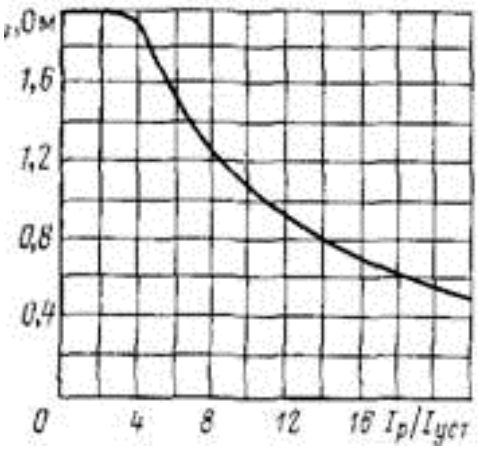

Рис. 1.5 – Зависимость полного сопротивления обмотки реле типа РТ-85/2 от кратности тока (уставка 2 А)

1.2.1 Расчет тока срабатывания

На трансформаторах, находящихся под наблюдением персонала, защита от перегрузки выполняется действующей на сигнал посредством токового реле. Реле устанавливается в одной фазе, поскольку перегрузка трансформатора возникает одновременно во всех трех фазах. Чтобы избежать излишних сигналов при коротких замыканиях и кратковременных перегрузках, предусматривается реле времени, обмотки которого должны быть рассчитаны на длительное прохождение тока.

Ток срабатывания выбирается из условия возврата токового реле при номинальном токе трансформатора:

$$I_{С.З} = \frac{k_н}{k_{воз}} \cdot I_{ном.т} ,$$

где $k_Н$ – коэффициент надежности, принимается равным 1,05.

Время действия защиты от перегрузки выбирается на ступень больше времени МТЗ трансформатора:

$$t_{пер} = t_{мтз} + \Delta t.$$

На подстанциях без дежурного персонала защита от перегрузок выполняется трехступенчатой:

– Первая ступень работает при малой перегрузке и действует на сигнал, передаваемый с помощью телемеханики на дежурный пункт.

– Вторая ступень действует при большой перегрузке, когда требуется быстрая разгрузка, ступень действует на отключение части потребителей, разгружая трансформатор до допустимого значения. Выдержка времени второй ступени: $t_{пер.2} \leq t_{доп}$, где $t_{доп}$ – допустимое время перегрузки, определяемое перегрузочной характеристикой трансформатора. Вторую ступень желательно выполнять с зависимой от тока характеристикой выдержки времени, соответствующей перегрузочной характеристики трансформатора.

– Третья ступень – резервная, действующая на отключение трансформатора, если по каким-либо причинам вторая ступень не осуществит разгрузки.

1.3 Цифровая РЗ

Одной из особенностей цифровых устройств является относительная простота организации контроля исправности аппаратной части и программного обеспечения благодаря циклическому работы микропроцессора по заложенной в реле программе. Отдельные элементы программы выполняют самотестирование устройства защиты. В арсенале разработчиков цифровой аппаратуры имеется целый набор типовых решений в части тестирования.

1.3.1 Пример исполнения защиты от перегрузок

Следствием токовой перегрузки электроустановки является чрезмерный нагрев ее активных частей – обмоток, контактов и т. д. Казалось бы, наиболее простым решением будет непосредственный контроль температуры. Однако, системы теплового контроля весьма инерциальны из-за необходимости изолировать датчики температуры от токоведущих частей электроустановки. Имеются проблемы и с размещением датчиков, и с передачей сигналов от датчиков к выключателю. Вследствие этого практическое применение получили РЗ на основе косвенного контроля теплового состояния электрических машин и аппаратов.

Косвенный контроль температуры проводника путем измерения протекающего по нему тока лежит в основе теплового расцепителя с бимиталлической пластиной, и в основе индукционного реле. Однако, механические устройства нестабильны, сложны в производстве и работают с большой погрешностью. Существенный прогресс в этом направлении был достигнут с переходом на электронную элементную базу построения тепловых реле. Впервые в отечественной практике тепловая защита в аналоговом варианте появилась в начале 80-х годов. Теперь при построении РЗ от перегрузок используются микропроцессоры. Пример функциональной схемы такой защиты представлен на рисунке 1.6.

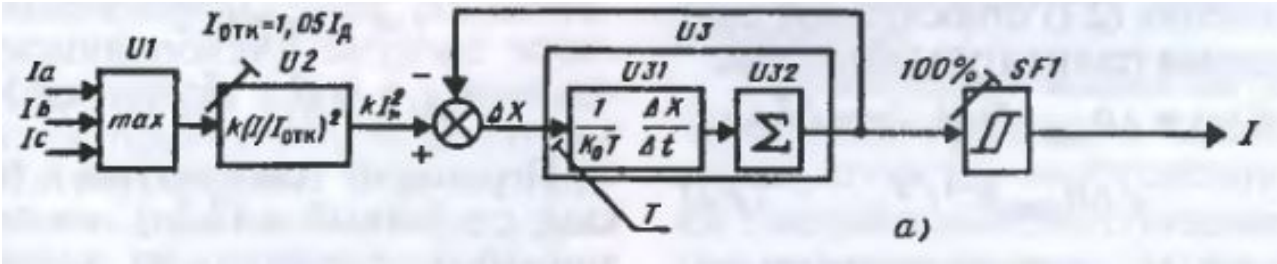

Рис. 1.6 – Функциональная схема защиты от перегрузок

На схеме приняты следующие обозначения:

I_d – ток, соответствующий полной загрузке электроустановки;

$I_{\text{отк}}$ – ток, при котором отключается электроустановка, обычно принимается равным $1{,}05I_d$;

$\Delta\vartheta_*$ – текущее превышение температуры проводника над температурой окружающей среды. Предельная температура, при которой происходит отключение, задается значением в 100%.

Максиселектор U_1 выбирает максимальный фазный ток, тем самым обеспечивая нормальную работу РЗ при различных видах повреждений и анормальных режимах работы электроустановки. Узел U_2 осуществляет формирование сигнала пропорционального тепловым потерям в проводнике, т.е. квадрату тока электроустановки. Звено U_3 выполняет операцию интегрирования, он включается в себя: U_{31} – формирователь приращений сигнала на входе интегратора $\frac{\Delta x}{\Delta t}$ и сумматор U_{32}. На входе сумматора

формируется относительное значение текущей температуры $\Delta\vartheta_*$. При достижении температуры значения в 100% срабатывает компаратор $SF1$ и формирует сигнал на отключение.

Рассмотренная модель нагрева проводника приемлима только в случае, когда ток электроустановки в нормальном режиме работы не превышает длительно допустимого значения.

1.4 Выявление недостатков защит и постановка задачи

Защиты отстраиваются от тока, протекающего через обмотки трансформатора, не учитывается влияние температуры окружающей среды, следовательно, не используется тот факт, что при низких температурах трансформатор можно нагружать больше, а при высоких меньше. В результате чего возникла мысль о создании защиты, которая будет отстраиваться от температуры окружающей среды.

2 СОСТАВЛЕНИЕ ТЕПЛОВОЙ МОДЕЛИ, ЕЕ АНАЛИЗ И ПРОВЕРКА, СОСТАВЛЕНИЕ АЛГОРИТМА

2.1 Составление тепловой модели и ее проверка

Тепловая схема замещения позволяет рассчитать температуры элементов при известных выделяемых мощностях и температуре окружающей среды. Для составления и анализа тепловых схем замещения используют свойство подобия тепловых и электрических процессов. Принимая, что ток эквивалентен тепловому потоку, а напряжение – температуре, сведем расчет теплового режима к анализу электрической схемы, которая подчиняется законам Ома и Кирхгофа. Составление тепловой схемы замещения обладает известной сложностью. На первоначальном этапе требует проанализировать все тепловые потоки внутри исследуемого объекта. Для каждого теплового потока определяются источники тепла, тепловые сопротивления и теплоемкости объектов на пути тепла. Параметры схемы замещения находятся расчетным путем и определяются паспортными данными трансформатора. В дальнейшем, электрическую схему, эквивалентную тепловой, составляем для двухобмоточного трехфазного силового трансформатора марки ТМ-25/10.

Допущения, принятые при упрощении тепловой схемы замещения (рисунок 1):

- в начальный момент нагрева греется только обмотка, теплопередача на окружающую изоляцию и прочие элементы незначительная;
- в установившемся режиме все элементы трансформатора, кроме первичной обмотки, прогреты равномерно;
- в начальный момент температура масла равна температуре окружающей среды.

Исходя из принятых допущений, схема замещения сворачивается до вида, приведенного на рисунке 2.1.

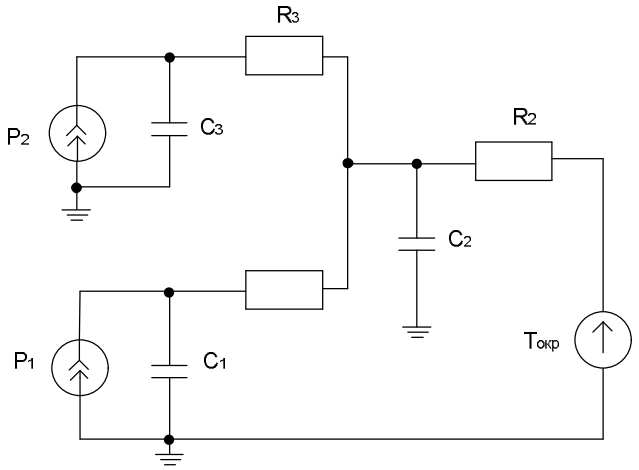

Рисунок 2.1 – Упрощенная тепловая схема замещения трансформатора

Полученная схема замещения не предполагает трудностей для анализа, так как легко преобразуется по законам ТОЭ или анализируется напрямую с помощью симуляторов электронных схем, например National Instruments Multisim. Главная трудность – нахождение параметров элементов схемы замещения. Поэтому схема замещения упрощается и параметры элементов находятся экспериментальным и расчетным способами. Цель упрощения – сократить число элементов до такой степени, при которой эти элементы можно определить экспериментальным способом и точность расчетов будет приемлемая.

2.2. Нормы допустимых перегрузок по ГОСТ

2.2.1 Требования по нагреву согласно ГОСТ

Согласно Таблице 3 в ГОСТ Р 52719-2007 превышения температуры отдельных элементов масляного трансформатора над температурой охлаждающей среды (воздуха или воды) при испытаниях на нагрев на основном ответвлении не должны превышать следующих значений:

– для обмоток при естественной циркуляцией масла превышение температуры не должно быть больше 65 °С;

– для масла в верхних слоях превышение температуры должно лежать в пределах 60 °С;

– для поверхности магнитной системы и элементов металлоконструкций – 75 °С.

В дальнейшем данные значения температур будут использоваться для составления тепловой модели при расчете тепловых сопротивлений элементов конструкций трансформатора.

Исходя из ГОСТ 11677-85 п 2.1.3. максимально допустимое значение температуры наиболее нагретой точки обмотки для систематических перегрузок трансформаторов классов напряжения 110 кВ и ниже - 140 °С. Максимальная допустимая температура масла в верхних слоях - 95 °С. Данные параметры температур принимаем в качестве ограничений по нагреву обмотки и масла в тепловой модели.

Изменения температуры масла и обмотки, будут соответствовать двухступенчатому прямоугольному графику нагрузки (рисунок 2.1).

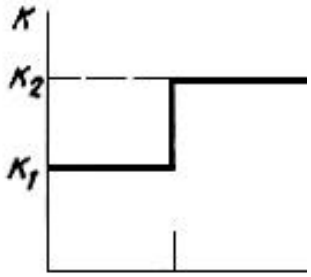

Рисунок 2.1 – Двухступенчатый прямоугольный график нагрузки трансформатора

В таблице 8-14 ГОСТ 11677-85 приведены значения допустимых аварийных перегрузок в зависимости от значения начальных нагрузок при различных значениях температуры охлаждающей среды для трансформаторов классов напряжения до 110 кВ включительно. Таблица допустимых перегрузок масляного трансформатора при температуре окружающей среды + 20 °С для $K_1 = 0{,}7$ представлена ниже.

Таблица 2.1 – Допустимые перегрузки трансформатора для +20 °С

h, ч	0,5	1,0	2,0	4,0	6,0	8,0
K_2	2,0	2,0	1,7	1,5	1,4	1,3

2.3 Тепловая модель и ее проверка

Для расчета элементов схемы замещения примем паспортные данные силового трансформатора ТМ-25/10 из [1].

Параметры силового трансформатора ТМ-25/10: Ркз=0,6 кВт; Рхх=0,13 кВт.

Масса трансформатора (полная) – 360 кг;

Масса масла – 90 кг.

Масса активной части – 12,7·3+3,9·3=49,8 кг (алюминий) – [2].

Масса магнитопровода – 360-90-49,8 = 220,2 кг.

C_0 =1,964 $\frac{\text{кДж}}{\text{кг·К}}$ – для масла при температуре 70°С. [4]

C_0 =0,951 $\frac{\text{кДж}}{\text{кг·К}}$ – для обмотки из алюминия при температуре 70°С. [3]

C_0 =0,426 $\frac{\text{кДж}}{\text{кг·К}}$ – для электротехнической стали 250°К. [5]

Температура охлаждающей среды – $t_{охл}$=20°С.

Мощность зависит от коэффициента загрузки трансформатора в квадрате, поскольку нагрев за счет потерь в трансформаторе определяем по току, протекающему в обмотках, $Q = I^2Rt$, кВт, следовательно: $P = P_0k_н^2$.

Например:

$P_{кз}$=0,6 для k = 1,

$P_{кз}$=0,6·0,7^2=0,294 для k = 0,7,

$P_{кз}$=0,6·1,5^2=1,35 для k = 1,5.

Далее рассчитаем тепловые сопротивления R_i и емкости C_i (теплоемкости) для тепловой схемы замещения:

$R_1 = \frac{\Delta t}{P_{кз}} = \frac{65-60}{0,6} = 8.33 \left(\frac{°C}{кВт}\right)$ - для обмотки;

$C_1 = m_{обм} \cdot C_{0обм} = 49{,}8 \cdot 0{,}951 = 47{,}4 \left(\frac{кДж}{°C}\right)$ - для обмотки;

$R_2 = \frac{\Delta t}{P_{кз}+P_{хх}} = \frac{60}{0.6+0.13} = 82{,}2 \left(\frac{°C}{кВт}\right)$ - для масла;

$C_2 = m_{масл} \cdot C_{0масл} = 90 \cdot 1{,}964 = 176{,}76 \left(\frac{кДж}{°C}\right)$ - для масла;

$R_3 = \frac{\Delta t}{P} = \frac{75-60}{0{,}13} = 115{,}38 \left(\frac{°C}{кВт}\right)$- для сердечника примем, равным нулю;

$C_3 = m_{магн} \cdot C_{0магн} = 220{,}2 \cdot 0{,}426 = 93{,}8 \left(\frac{кДж}{°C}\right)$ - для сердечника,

где Δt – разница температур между элементами теплопередачи (обмотки-масло, сердечник-масло, масло-окружающая среда).

Для ускорения протекания процесса в модели домножим все емкости на 10^{-3}. Тепловая схема соединений для ТМ-25 представлена на рис. 2.2.

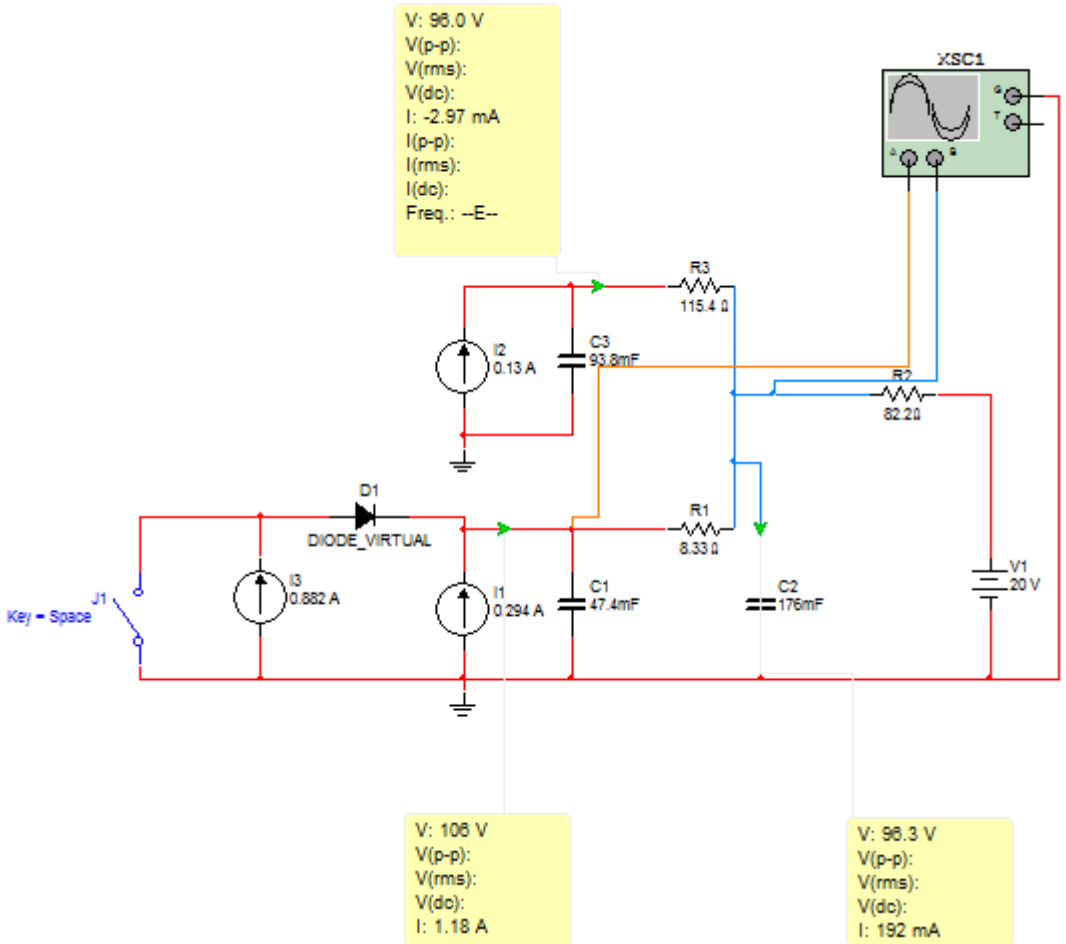

Рисунок 2.2 – Тепловая схема ТМ-25, выполненная в среде Multisim 8

Для температуры окружающей среды +20 °С - время нагрева масла при k_1=0,7 и k_2=1,4 до допустимой по ГОСТ температуры +95 °С составит:

9с·1000/3600 ч = 2,5 ч, данному значению в ГОСТ соответствует 2,0 ч. Значение допустимого времени перегрузки трансформатора для каждого коэффициента перегрузки k_2 сведем в таблицу 2.2.

Таблица 2.2 – Допустимые перегрузки трансформатора для +20 °С

k_2	Модель t, ч	ГОСТ t, ч
2,0	1,6	1,0
1,7	2,5	2,0
1,5	4,0	4,0
1,4	5,5	6,0
1,3	8,0	8,0

По данным табличным данным построем зависимости допустимого времени работы трансформатора от его коэффициента перегрузки.

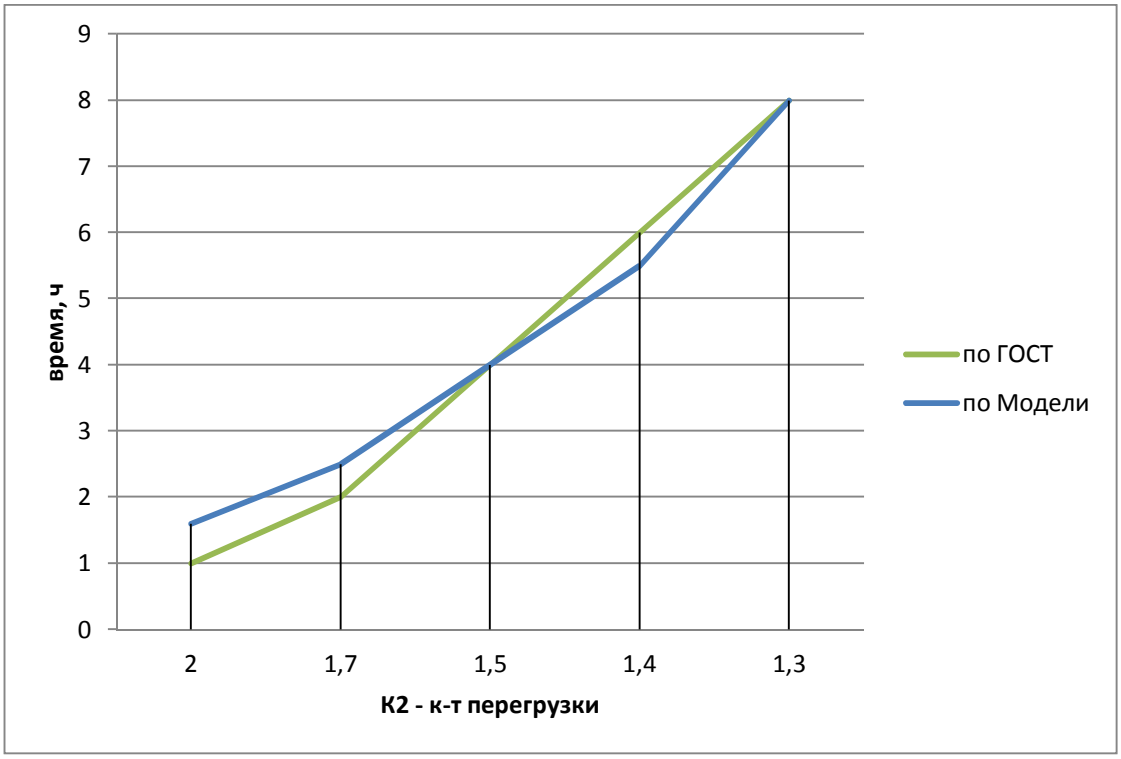

Рисунок 2.3 – Зависимости времени работы трансформатора от его загрузки

Погрешность обусловлена выбором значений удельных теплоемкостей материалов и их массы, также габариты и исполнение трансформаторов

различных изготовителей могут разниться, что также может сказаться на результате, но в целом зависимость соответствует той, что заложена в ГОСТ.

Также испытаем нашу модель для различных температур охлаждающей среды: от 0 °С до +40 °С для k_1=0,7 и k_2=1,4.

Таблица 2.2 – Допустимые перегрузки трансформатора

t, °С	t, ч Модель	t, ч ГОСТ
+40	2,0	2,0
+30	3,4	4,0
+20	5,5	6,0
+10	8,4	8,0
0	13,4	+

По данным табличным данным построем зависимости допустимого времени работы трансформатора от температуры окружающей среды.

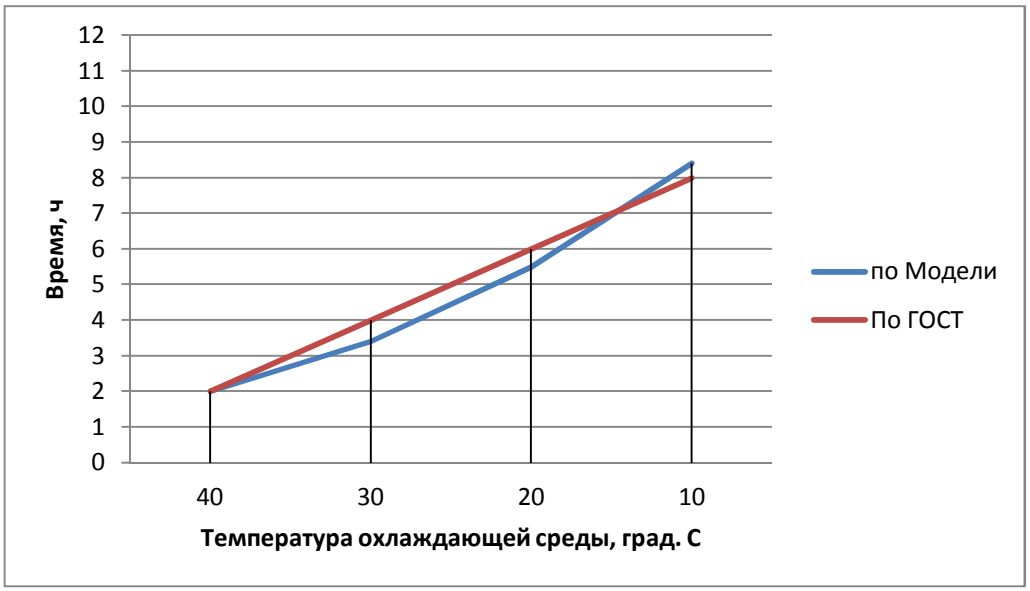

Рисунок 2.4 – Зависимости времени работы трансформатора от температуры окружающей среды

Можно сделать вывод о том, что при изменении температуры охлаждающей среды модель реагирует на ее изменение согласно ГОСТ с учетом погрешностей.

2.4. Разработка алгоритма работы защиты

По результатам работы рассмотренным в предыдущем пункте составим алгоритм работы защиты.

Работа защиты состоит из этапов:

- получение исходных данных об температуре окружающего воздуха, токов или мощности трансформатора;
- расчет температур по модели трансформатора;
- сравнение полученных значений температур с уставками;
- выдача сигналов.

Кроме этого есть функция самодиагностики, проверяющая адекватность работы модели путем сравнения величин температур между собой.

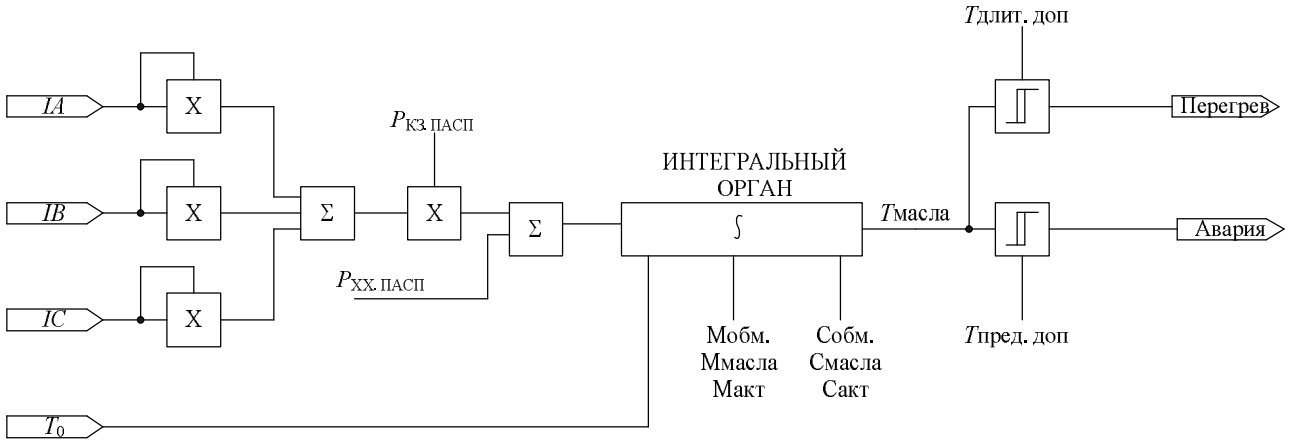

Рис. 2.5 – Алгоритм работы защиты

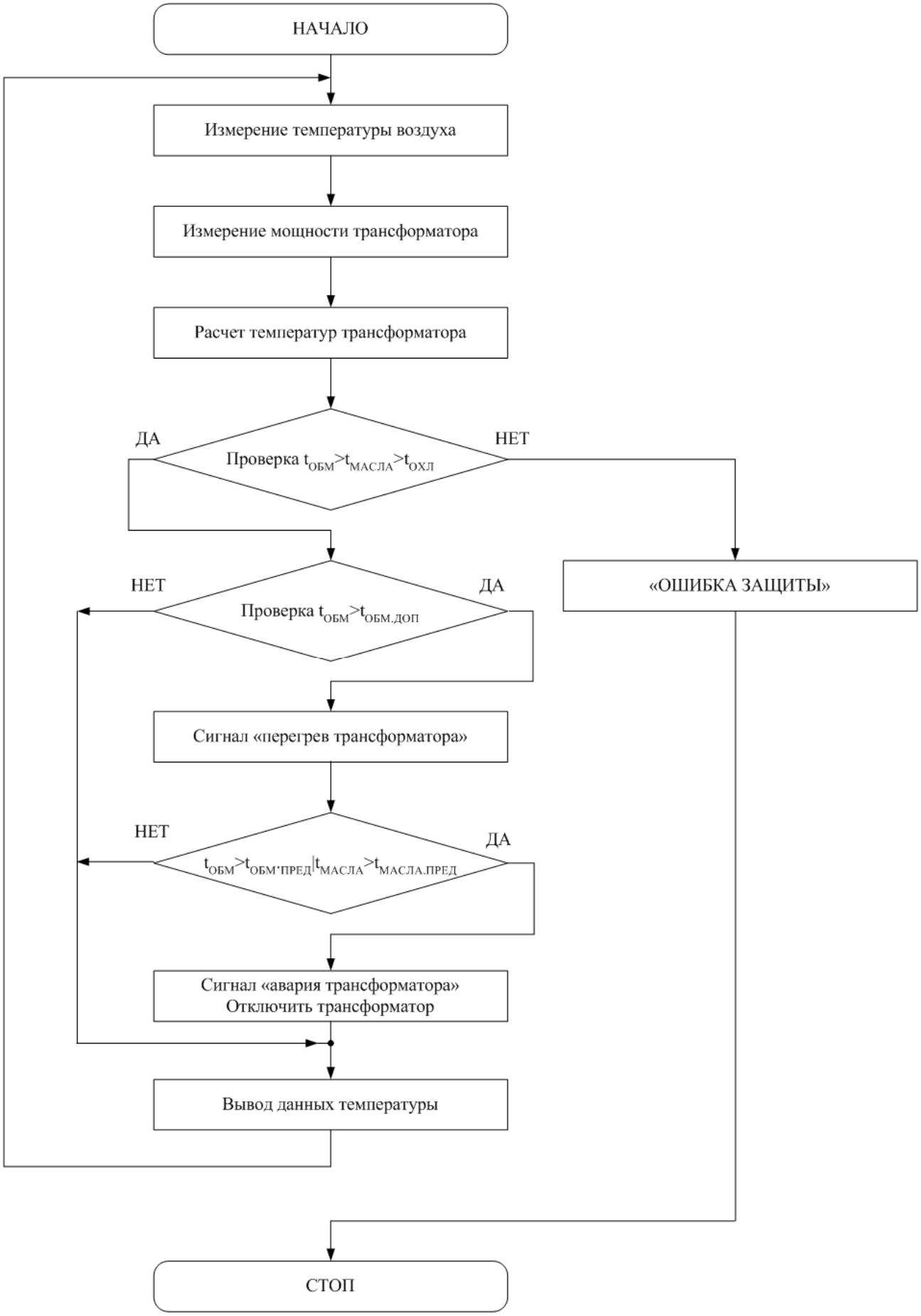

Рис. 2.6 – Блочная схема алгоритма

3 АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ И ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ

3.1 Допустимая кратность перегрузки для продолжительной работы трансформатора при различных температурах окружающей среды

Обратимся к нашей модели (рисунок 2.2) для определения перегрузки трансформатора при условии, что защита не сработает, и его нагрузка будет лежать в допустимых пределах, то есть температура масла в баке трансформатора не будет нагреваться выше 95°С. Коэффициент загрузки трансформатора в первоначальном режиме примем равным 0,7. Опустим происходящие в трансформаторе переходные процессы и зададим установившийся режим в тепловой модели (ключ разомкнут). Данные рассчитанные в тепловой модели сведем в таблицу 3.1. Коэффициент перегрузки определим как:

$$K_2 = \sqrt{\frac{P}{P_{\text{кз}}}}\text{, где}$$

P – определяется, как сумма токов источников тока I_1 и I_3;

$P_{\text{кз}} = 0{,}6$ кВт.

Таблица 3.1 – Допустимые кратности перегрузки при различных температурах

K_2	Температура, °С
0,95	+40
1,05	+30
1,14	+20
1,23	+10
1,30	0
1,38	-10
1,45	-20
1,52	-30
1,59	-40

По данным таблицы 3.1 построим график зависимости коэффициента перегрузки трансформатора ТМ-25/10 от температуры окружающей среды (рисунок 3.1).

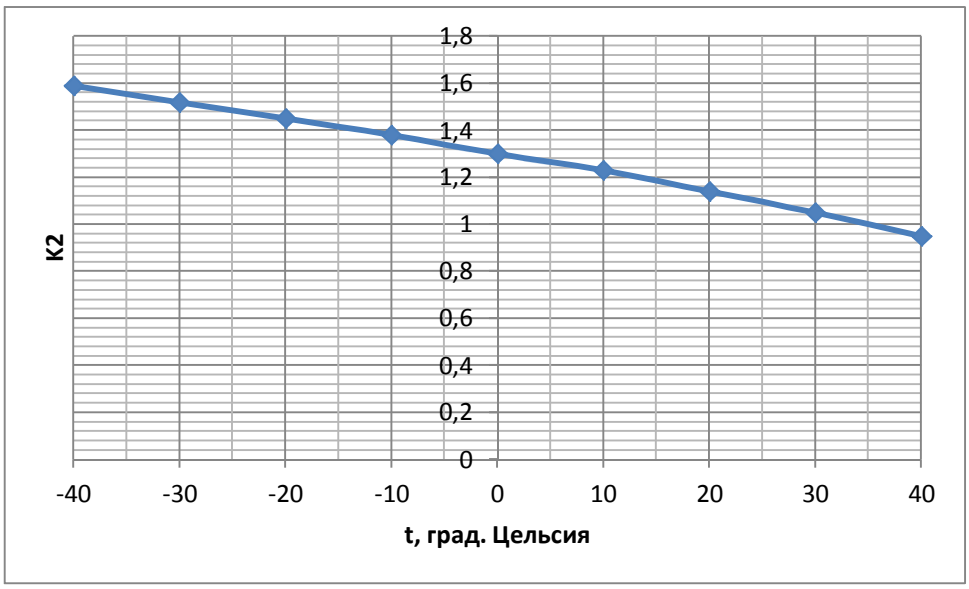

Рисунок 3.1 – График зависимости коэффициента перегрузки трансформатора ТМ-25/10 от температуры окружающей среды

Для оценки возможностей защиты сравним перегрузки, полученные в модели с нормальной допустимой – $K_2 = 1$. Для этого примем следующее распределение средних температур за год: зима -10 °С, весна +10 °С, лето +20 °С, осень 10 °С. Пусть каждое время года длится 3 месяца.

Таблица 3.2

время года	ЗИМА	ВЕСНА	ЛЕТО	ОСЕНЬ
t , °С	-10	10	20	10
стандарт	1	1	1	1
модель	1,38	1,23	1,14	1,23

При условии, что номинальная мощность тр-ра равна 25 кВт получим:

$\Delta P = 25 \cdot (0{,}38 \cdot 91 + 0{,}23 \cdot 91 + 0{,}14 \cdot 91 + 0{,}23 \cdot 92) = 2235{,}25$ (кВт), где

ΔP – мощность недогрузки трансформатора за год.

То есть, защита трансформатора, основанная на тепловой модели позволяет сохранить нагрузку при этом уменьшая ущерб и недоотпуск электроэнергии.

3.2 Оценка износа изоляции в зависимости от температур обмотки

Имея при себе систематизированные в течение дня, месяца или года данные о температуре обмоток трансформатора можно оценить износ изоляции по методике, изложенной в ГОСТ 14209-85 п. 2. Для витковой изоляции класса нагревостойкости А базовая условно постоянная температура наиболее нагретой точки обмотки, при которой скорость расчетного износа витковой изоляции соответствует сроку службы трансформатора принимается 98 °С.

Графики нагрузки, при которых $F \leq 1$, при этом нагрузки не превышают допустимые значения для режима систематических нагрузок, относятся к графикам допустимых систематических нагрузок. Графики нагрузки, при которых $F > 1$, при этом нагрузки не превышают допустимые значения для режима аварийных перегрузок, относятся к графикам допустимых аварийных перегрузок.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В научно-исследовательской работе рассмотрена тепловая модель трансформатора ТМ-25, на основании которой в дальнейшем будет составлена защита от перегрузки трансформаторов для различных коэффициентов его загрузки и температуры окружающей среды. Был проведен анализ тепловой модели, ее расчет в среде Multisim, в результате чего, опираясь на данные в ГОСТ для соответствующих загрузок и температур, модель функционирует в соответствии с ними и по тем же законам с определенной погрешностью.

Приведен алгоритм работы защиты, в основе которого лежит тепловая модель трансформатора ТМ-25, в дальнейшем возможна реализация данной защиты, опираясь на него. Практическая значимость защиты заключается в том, что в зависимости от температуры окружающей среды трансформатора может быть загружен на большую нагрузку при низких температурах, также по данным графиков нагрузки и температур нагрева трансформатора можно прогнозировать износ изоляции по представленной в ГОСТ 14209-85 методике. Применение данной защиты, основанной на данной методике косвенного измерения температуры частей трансформатора, облегчает ее установку, поскольку она не требует изменения его конструкции и монтажа датчиков измерения температуры внутрь трансформатора.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Защита трансформаторов распределительных сетей / М.А. Шабад – Ленинград: Энергоиздат. Ленинградское отделениение, 1981 – 136 с.

2. Обмотки силовых трансформаторов / ООО "Электротехнический завод Снабэнерго". http://www.snabenerg.ru/pz1.shtml.

3. Свойства алюминия: плотность, теплопроводность, теплоемкость Al. http://thermalinfo.ru/svojstva-materialov/metally-i-splavy/teploprovodnost-i-teploemkost-alyuminiya-teplofizicheskie-svojstva-al.

4. Свойства трансформаторного масла: плотность, вязкость, теплопроводность. http://thermalinfo.ru/svojstva-zhidkostej/toplivo-i-masla/svojstva-transformatornogo-masla-plotnost-vyazkost-teploprovodnost.

5. Удельная теплоемкость стали. http://specural.com/articles/5/udelnaya-teploemkost-stali.html.

6. ГОСТ Р 52719 – 2007 Москва Стандартинформ 2007. http://esistems.ru/wp-content/uploads/2016/08/%D0%93%D0%9E%D0%A1%D0%A2-%D0%A0-52719-2007.pdf.

7. Цифровые реле защиты / В.Я. Шмурьев. – М: НТФ «Энергопрогресс», 1999 – 56 с.

8. Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем: Конспект лекций. Часть 1 / А.Н. Садовников, А.Н. Андреев. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2013. – 224с.

9. Нагрев и охлаждение трансформаторов / Л. Киш. – Москва: Энергия, 1980. – 180с.

10. Принцип действия плавких предохранителей – Защита трансформаторов распределительных сетей. http://leg.co.ua/knigi/rzia/zaschita-transformatorov-raspredelitelnyh-setey-6.html.