На правах рукописи

НОВОЖИЛОВ ТИМОФЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ ПОСТРОЕНИЯ ЗАЩИТ ОДНОФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ОТ ВИТКОВЫХ ЗАМЫКАНИЙ

Специальность 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Омск 2015

Работа выполнена на кафедре «Электроснабжение промышленных предприятий» **Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Омский государственный технический университет»**, г. Омск

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Горюнов Владимир Николаевич

Официальные оппоненты: **Манусов Вадим Зиновьевич**
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Системы электроснабжения предприятий» Новосибирского государственного технического университета

Прохоров Антон Викторович
кандидат технический наук, доцент кафедры «Электроэнергетические системы» Национального исследовательского Томского политехнического университета

Ведущая организация: **Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирский федеральный университет»**, г. Красноярск

Защита состоится 24 декабря 2015г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 212.178.12 при Омском государственном университете (ОмГТУ) по адресу: 644050, г. Омск, пр. Мира, корп. 6, ауд. 340.

Тел./факс (8-3812) 65-34-07, e-mail: dissov_omgtu@omgtu.ru

С диссертацией можно ознакомится в библиотеке Омского государственного университета по адресу: г.Омск, пр. Мира 11 и на сайте ОмГТУ: www.omgtu.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2015 года

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук Д.С. Осипов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Как известно трехфазные трансформаторы в сравнении с группой однофазных трансформаторов при одинаковой передаваемой мощности имеют значительно меньшую стоимость. Однако однофазный трансформатор этой группы в сравнении с трехфазным имеет значительно меньший вес и габариты. Поэтому группу однофазных трансформаторов используют там, где транспортировка, перемещение и установка трехфазных трансформаторов сопряжена со значительными трудностями. Именно эти обстоятельства и определили их область использования в виде мощных трансформаторов связи в энергосистемах и печных трансформаторов на ферросплавном производстве и в металлургии.

Из мировой практики эксплуатации однофазных трансформаторов известно, что на витковые замыкания (ВЗ) в них приходится до 25-45% от всех повреждений трансформатора в зависимости от мощности и условий эксплуатации, а затраты на их ремонт сопоставимы со стоимостью самих трансформаторов. При этом традиционно используемые защиты трансформатора обладают низкой чувствительностью к ВЗ. Поэтому, в большинстве случаев после ВЗ трансформатор отключают только тогда, когда размеры повреждения достигнут той величины, при которой поврежденный трансформатор будет отключен максимальной токовой, дифференциальной или газовой защитой. В свою очередь газовая защита обладает большим временем срабатывания при замыкании малого числа витков. Кроме того, ее невозможно использовать для защиты «сухих» трансформаторов. В результате размеры повреждения обмотки увеличиваются с нескольких витков до 15-50% обмотки. Иногда трансформатор полностью выходит из строя.

Более чувствительны к ВЗ защиты на встраиваемых индукционных преобразователях, которые в релейной защите называют магнитными трансформаторами (МТ). Значительный вклад в разработку защит на МТ внесли Засыпкин А.С., Гаген А.Ф., Шабад М.А., Новожилов А.Н., Чечушков Г.А. и Пястолов А.А. Однако часть этих защит имеют зону нечувствительности в середине обмотки, другие предназначены для защиты трехфазных трансформаторов, а крепление и эксплуатация МТ остальных, как правило, сопряжены со значительными техническими трудностями.

Таким образом, развитие теории построения защит однофазных трансформаторов от ВЗ на МТ, которое позволит разрабатывать высокочувствительные защиты трансформаторов без зоны нечувствительности является актуальным.

Объектом исследования являются защиты от ВЗ мощных однофазных трансформаторов связи в энергосистемах и печных трансформаторов на ферросплавном производстве и в металлургии.

Предметом исследования является развитие теории построения защит однофазных трансформаторов от ВЗ на МТ.

Связь темы диссертации с общенаучными (государственными) программами. Работа выполнена в соответствии с научным направлениям рабочей группы B4 «Релейная защита и автоматика» Международной конференции по большим энергетическим системам (СИГРЭ), с научной темой «Замена традиционных трансформаторов тока и напряжения новыми датчиками тока и напряжения, а также влияние их на проектирование подстанций».

Целью работы является развитие теории построения защит однофазных трансформаторов от ВЗ на МТ, которые позволят разрабатывать защиты однофазных трансформаторов с высокой чувствительностью, которые не имеют зон нечувствительности, просты в изготовлении и эксплуатации.

Для достижения этой цели были поставлены и решены **следующие основные задачи**:

-выявлены достоинства и недостатки в теории построения известных устройств защиты трехфазных и однофазных трансформаторов от ВЗ на МТ;

-предложены новые методы моделирования и экспериментальной проверки токов при ВЗ в эксплуатационных режимах работы простых и составных однофазных трансформаторов, а также в группах однофазных трансформаторов с различными схемами их соединения;

-разработаны новые методы моделирования магнитных полей рассеяния обмоток однофазных трансформаторов с прямоугольными и круглыми стержнями при ВЗ в эксплуатационных режимах работы;

- разработаны новые типы МТ и методы расчета их параметров;

-на основе новых методов моделирования токов в обмотках и их магнитных полей рассеяния разработан целый ряд способов защиты однофазного трансформатора от ВЗ на МТ, которые позволяют конструировать простые и высокочувствительные устройства защиты от ВЗ без зоны нечувствительности.

Методы исследования. Для решения поставленных задач в диссертационной работе широко применялись методы математического моделирования с использованием методов решения линейных уравнений в комплексном виде, а также экспериментальные исследования. При моделировании токов в различных режимах работы однофазного трансформатора и его полей рассеяния использовались программы разработанные в Turbo-basic и Delphi, а также система схемотехнического моделирования Electronics Workbench.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций сформулированных в работе подтверждается корректным использованием фундаментальных положений теоретических основ математики и электротехники, электрических машин и теории релейной защиты, а также методов математического моделирования токов и магнитных полей в электрических машинах, натурного эксперимента.

Научная новизна работы заключается в том, что разработаны:

-математические модели однофазного трансформатора для моделирования токов при ВЗ в эксплуатационных режимах однофазного

простого и составного трансформатора, в группе однофазных трансформаторов с различными схемами соединений, а также обоснован новый метод экспериментальной проверки токов в трансформаторах при ВЗ без повреждения изоляции;

-методы математического моделирования магнитных полей рассеяния первичной и вторичной обмоток, а также короткозамкнутых витков однофазного трансформатора с прямоугольным и круглым сердечниками при отсутствии масляного бака, в промежутке между обмотками и стенкой масляного бака, между стержнями сердечника;

-теоретические основы построения защит от ВЗ в однофазных простых и составных трансформаторах на МТ, где приведены конструкции МТ, методы расчета их параметров и погрешностей измерения, предложены способы защиты однофазных трансформаторов от ВЗ на этих МТ, а также предложены математические выражения для определения параметров срабатывания устройств защит на МТ.

Практическая значимость работы заключается в том, что разработанные:

-математические модели однофазного трансформатора позволяют с достаточной для релейной защиты точностью осуществлять моделирование токов в первичной и вторичной обмотках однофазного простого и составного трансформатора, а также в группах однофазных трансформаторов с различными схемами соединений при ВЗ во всех эксплуатационных режимах. Для моделирования токов в обмотках однофазных трансформаторов на ЭВМ разработан комплект из 11 программ;

-методы математического моделирования магнитных полей рассеяния первичной и вторичной обмоток однофазного трансформатора при ВЗ во всех эксплуатационных режимах позволяют с достаточной для релейной защиты точностью рассчитывать величины этих полей в трансформаторах с прямоугольным и круглым сердечниками при отсутствии масляного бака в промежутке между обмотками и стенкой бака, между стержнями сердечника. Для моделирования магнитных полей рассеяния на ЭВМ разработан комплект из 21 программы;

-теоретические основы построения защит от ВЗ позволяют конструировать МТ с заданными характеристиками, определять их место размещения, параметры и погрешности измерения, оценивать эффективность МТ и рекомендовать меры по снижению погрешности измерения, а также рассчитывать порог срабатывания защит и определять ее чувствительность.

На защиту выносится:

-новые математические модели однофазных простого и составного трансформаторов, позволяющие рассчитывать токи в их обмотках при ВЗ в эксплуатационных режимах работы с различными схемами соединения группы однофазных трансформаторов;

-новые методы математического моделирования магнитных полей рассеяния первичной и вторичной обмоток однофазного трансформатора с

прямоугольным и круглым сердечниками при ВЗ во всех эксплуатационных режимах при отсутствии масляного бака в промежутке между обмотками и стенкой бака, между стержнями сердечника;

-теоретические основы построения защит от ВЗ, которые позволяют конструировать МТ с заданными характеристиками, определять их параметры и погрешности измерения, оценивать эффективность и выбирать методы по снижению погрешности измерения, а также рассчитывать порог срабатывания защит и определять их чувствительность;

-результаты теоретических и экспериментальных исследований.

Реализация результатов работы. Произведены производственные испытания устройств защиты от ВЗ на однофазном трансформаторе ТТ-6 и печном трансформаторе ЭОЦНК 16000/10-К по патенту РФ №2422965 и патентам РК № 25737 и №27097. Получен акт приема в опытную эксплуатацию устройства защиты печного трансформатора от ВЗ по патентам РК № 25737 и №27097.

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на двух международных конференциях в г.Павлодар в 2005 и 2012г, на заседании кафедры «Электроэнергетика» Павлодарского государственного университета им. С.Торайгырова, и на заседании Ученого совета ОмГТУ в г.Омск в 2014г.

Личный вклад. Определение задач исследования, выбор способов их решения, экспериментальные и теоретические исследования, полученные научные результаты и выводы принадлежат автору.

Публикации. Содержание работы нашло отражение в 20 печатных работ, в том числе в ж. Электричество - 2, в ж. Электротехника - 3, в журналах рекомендованных ВАК РФ и РК – 6, имеется один патент РФ и пять патентов РК.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, изложенных на 151 страницах машинописного текста. Содержит 63 рисунков, девять таблиц, список использованных источников из 70 наименований и два приложения, относящиеся к практической реализации и внедрению результатов работы.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели и задачи исследования, отражена научная новизна и практическая ценность работы, очерчен круг задач решаемых в ней.

В первой главе показано, что однофазные трансформаторы используются в основном там, где транспортировка и установка трехфазных трансформаторов сопряжена со значительными проблемами. Обычно это мощные трансформаторы связи в энергосистемах и печные трансформаторы в металлургическом производстве. Исследованы конструктивные особенности простых и составных однофазных трансформаторов.

Рассмотрены эксплуатационные и анормальные режимы работы однофазных трансформаторов. Констатируется, что основными электрическими повреждениями в однофазных трансформаторах является ВЗ и однофазные замыкания на корпус (ОЗК). Выяснено, что в основном ВЗ и ОЗК в обмотках возникают под действием грозовых, коммутационных и иные перенапряжений. Другой причиной появления ВЗ и ОЗК является недостаточная электродинамическая стойкость обмоток при внешних коротких замыканиях, которая приводит к пробою изоляции и электрическому повреждению в месте деформации. В результате на ВЗ приходится до 25-45% от всех повреждений трансформатора, при этом затраты на их ремонт сопоставимы со стоимостью самих трансформаторов.

Рассмотрена модель возникновения ВЗ в обмотках различного типа, а также этапы развития математического моделирования ВЗ в трансформаторах. Выяснено, что:

-при ВЗ ток в поврежденной обмотке увеличивается незначительно, а в поврежденных витках возрастает в десятки раз по сравнению с его до аварийным значением;

-точность моделирования токов при ВЗ в значительной мере зависит от точности определения сопротивления дуги;

-рассмотренные методы моделирования нуждаются в совершенствовании из-за того, что часть из них предназначена для моделирования токов при ВЗ в трехфазных трансформаторах, а другая – для ориентировочной оценки токов в обмотках трансформатора при этом виде повреждения.

Сделан анализ традиционных защит от электрических повреждений в обмотках трансформатора. Выяснено, что незначительное изменение тока в поврежденной обмотке трансформатора при ВЗ и необходимость отстройки от бросков тока намагничивания и токов при коротком замыкании за трансформатором делают невозможным использование максимальной токовой и дифференциальной защит для выявления этого вида повреждения. При этом время срабатывания газовой защиты резко возрастает при уменьшении числа замкнувшихся витков, особенно на холодном трансформаторе.

В тоже время известные защиты на магнитных трансформаторах (МТ), обладают высокой чувствительностью к ВЗ, однако имеют зону нечувствительности.

Вторая глава посвящена развитию теории математического моделирования токов при ВЗ в однофазных трансформаторах.

При моделировании ВЗ простой однофазный трансформатор с двумя обмотками (рисунок 1,а) представляется в виде трехобмоточного, схема которого приведена на рисунке 1,б, где первичная и вторичная обмотки имеют w_1 и w_2 витков, а замкнувшиеся витки - $w_к$ витков. Для такого однофазного трансформатора математическую модель можно представить в виде системы уравнений

$$\left.\begin{aligned} U_1 &= \dot{I}_1(R_1 + jX_1) + j\dot{I}_2X_{21} + j\dot{I}_кX_{к1}; \\ 0 &= j\dot{I}_1X_{12} + \dot{I}_2(R_2 + R_н + jX_2 + jX_н) + j\dot{I}_кX_{к2}; \\ 0 &= j\dot{I}_1X_{1к} + j\dot{I}_2X_{2к} + \dot{I}_к(R_к + R_д + jX_к), \end{aligned}\right\} \qquad (1)$$

где U_1 - напряжение сети; $Z_1 = R_1 + jX_1$ и $Z_2 = R_2 + jX_2$ - сопротивления первичной и вторичной обмоток; $Z_к = R_к + jX_к$ - сопротивление дополнительной обмотки; $Z_н = R_н + jX_н$ - сопротивление нагрузки; $X_{к1} = X_{1к}$, $X_{к2} = X_{2к}$ и $X_{12} = X_{21}$ - сопротивления взаимоиндукции обмоток; $\dot{I}_1$, $\dot{I}_2$ и $\dot{I}_к$ - комплексы действующего значения токов в обмотках трансформатора.

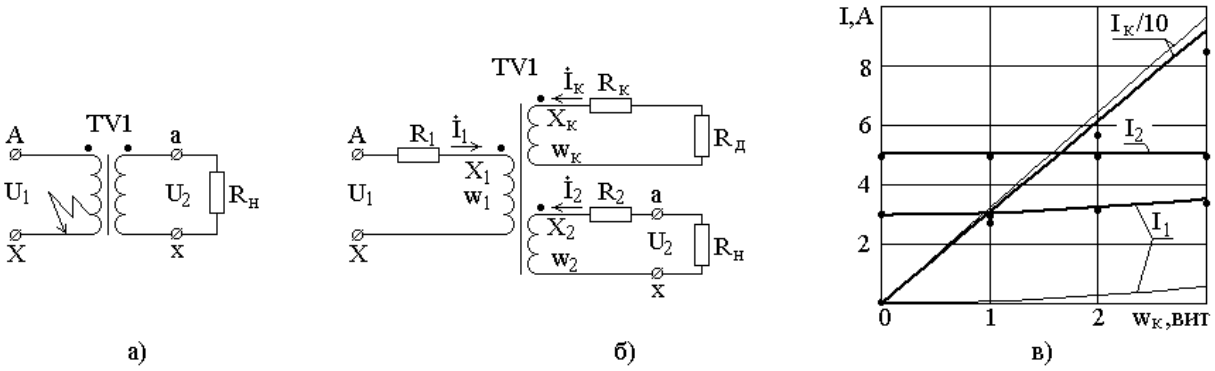

Рисунок 1. Схема для моделирования ВЗ с помощью дополнительной обмотки в однофазном трансформаторе и результаты моделирования.

Далее в работе предлагается метод определения активных и реактивных сопротивлений для системы (1) расчетным путем и экспериментально.

Эффективность данной математической модели проверялась на однофазном экспериментальном трансформаторе ТТ-6 с непрерывными катушечными обмотками в один провод. Замкнувшиеся витки заменялись дополнительной обмоткой.

Результаты моделирования и эксперимента токов в обмотках трансформатора ТТ-6 при ВЗ в режиме нагрузки приведены на рисунке 1,б, где первые показаны утолщенными линиями, а вторые – точками. Результаты моделирования этих же токов в обмотках ТТ-6 при ВЗ на холостом ходу на рисунке .1,в показаны тонкими линиями.

Анализ этих результатов показывает, что математическую модель можно считать адекватной, так как погрешность моделирования токов в обмотках трансформатора при ВЗ не превышает 5-10%. То есть, принятый метод построения математической модели ВЗ в однофазном трансформаторе при малом числе замкнувшихся витков можно считать вполне удовлетворяющим нужды его релейной защиты. Поэтому он ложится в основу математического моделирования ВЗ в главном и вольтодобавочном трансформаторах составного однофазного трансформатора.

Схемы составного однофазного трансформатора при ВЗ в главном трансформаторе приведены на рисунке 2. Моделирование его работы осуществляется с допущением того, что между трансформаторами разных фаз отсутствует магнитная связь, а обмотки трансформаторов заменяются на эквивалентные им, но более простые следующим образом:

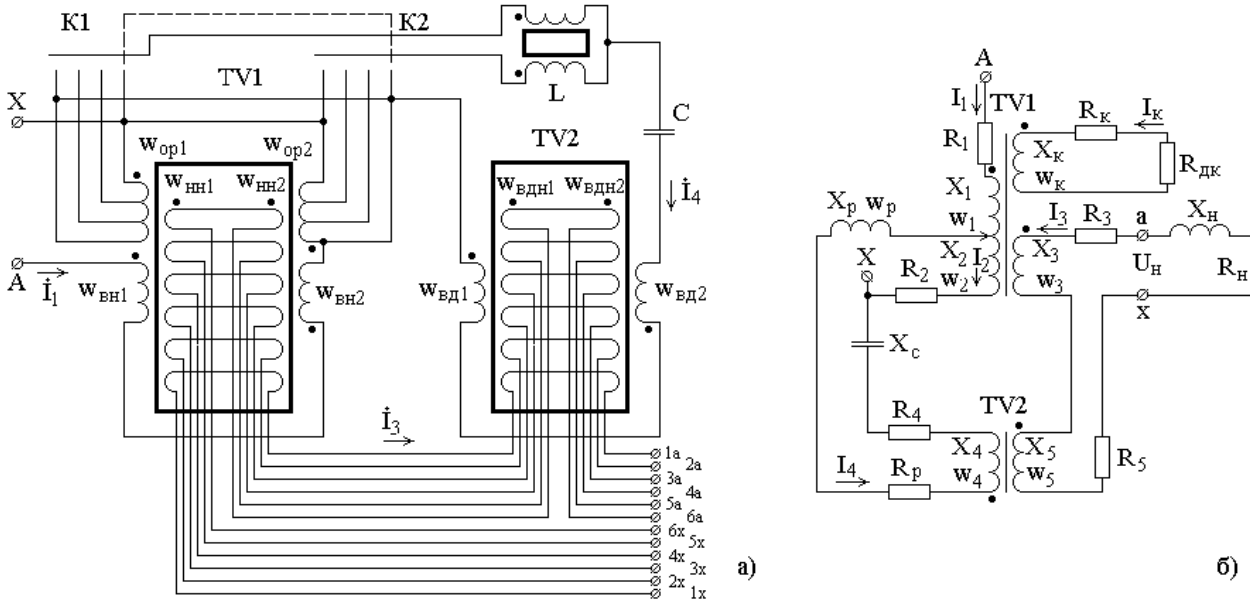

Рисунок 2 Схемы составного трансформатора

1. Одинаковые последовательно соединенные обмотки высокого напряжения главного трансформатора с числом витков $w_{вг1}$ и $w_{вг2}$ заменяются одной обмоткой с числом витков $w_{10} = w_{вг1} + w_{вг2}$;

2. Высоковольтные регулирующие обмотки главного трансформатора с числом витков $w_{вр1}$ и $w_{вр2}$ заменяются обмоткой $w_{20} = w_{вр1}$ имеющей N_{c0} отводов, у которой индуктивное сопротивление равно сопротивлению обмотки $w_{вр1}$, а активное – вдвое меньше;

3. Обмотки низкого напряжения главного трансформатора с числом витков $w_{нг1}$ и $w_{нг2}$ заменяются обмоткой с числом витков $w_3 = w_{нг1}$, у которой индуктивное сопротивление равно сопротивлению обмотки с числом витков $w_{нг1}$, а активное – вдвое меньше;

4. Обмотки высокого напряжения вольтодобавочного трансформатора с числом витков $w_{вв1}$ и $w_{вв2}$ заменяются обмоткой с числом витков $w_4 = w_{вв1} + w_{вв2}$;

5. Обмотки низкого напряжения с числом витков $w_{нв1}$ и $w_{нв2}$ вольтодобавочного трансформатора заменяются обмоткой с числом витков $w_5 = w_{нв1}$, у которой индуктивное сопротивление равно сопротивлению обмотки с числом витков $w_{нв1}$, а активное – вдвое меньше.

6. Замкнувшиеся витки $w_к$ при ВЗ образуются из обмоток с числом витков $w_{вг1}$ и $w_{вг2}$, которые замыкаются через сопротивление дуги $R_д$.

В результате этих преобразований расчетная схема для моделирования токов в обмотках составного трансформатора примет вид схемы на рисунке.2,б. Из него видно, что у неповрежденного трансформатора первичная обмотка имеет $w_1 + w_2$ витков с отводами, а вторичная w_3. При этом в зависимости от номера N_c ступени регулирования число витков в первичной обмотке определяется как

$$w_1 = w_{10} + (w_{20}/N_{c0})(N_c - 1) \text{ и } w_2 = w_{20} - (w_{20}/N_{c0})(N_c - 1). \qquad (2)$$

При ВЗ поврежденные витки $w_к$ в расчетной схеме представляется в виде отдельной обмотки. В этом случае принимается

$$w_1 = w_{10} + (w_{20}/N_{c0})(N_c - 1) - w_к. \qquad (3)$$

Следует добавить, что положение переключателей $К_1$ и $К_2$ на рисунке 2 соответствует первой ступени регулирования. При таком их положении напряжение на первичной обмотке вольтодобавочного трансформатора и ток I_3 в цепи нагрузки максимальны. С увеличением ступени регулирования это напряжение ступенчато уменьшается до нуля, а ток I_3 - до своего минимального значения. Токи в главном трансформаторе при изменении ступени регулирования ограничиваются традиционно с помощью реактора L.

С учетом рисунка 2,б уравнения для моделирования будут иметь вид

$$\left.\begin{aligned}
\dot{U}_1 &= \dot{I}_1(Z_1 + jX_{12}) + \dot{I}_2(Z_2 + jX_{21}) - j\dot{I}_3(X_{13} - X_{23}) - j\dot{I}_к(X_{1к} - X_{2к});\\
0 &= j\dot{I}_1X_{21} + \dot{I}_2Z_2 - j\dot{I}_3(jX_{23} - jX_{45}) - j\dot{I}_кX_{2к} - \dot{I}_4(Z_4 + Z_р - jX_c);\\
0 &= -j\dot{I}_1X_{31} - j\dot{I}_2X_{32} + \dot{I}_3(Z_3 + Z_5 + R_н + Z_л) + j\dot{I}_кX_{3к} + j\dot{I}_4X_{54};\\
0 &= -j\dot{I}_1X_{к1} - j\dot{I}_2X_{к2} + j\dot{I}_3X_{к3} + \dot{I}_к(Z_к + R_{дк});\\
0 &= \dot{I}_1 - \dot{I}_2 - \dot{I}_4,
\end{aligned}\right\} \qquad (4)$$

где $Z_1 \div Z_5$ - полное сопротивление первой $\div$пятой обмотки; $R_1 \div R_5$ - активное сопротивление первой $\div$пятой обмотки; $jX_1 \div jX_5$ - собственные индуктивные сопротивление первой $\div$пятой обмоток; $Z_к = R_к + jX_к$ - полное, активное и индуктивное сопротивления замкнувшихся витков; $X_{12} \div X_{53}$ - взаимные индуктивные сопротивления обмоток; $X_{1к} \div X_{5к}$ - взаимные индуктивные сопротивления обмоток с замкнувшимися витками, при этом у обмоток m и n взаимные индуктивные сопротивления X_{mn} и X_{nm} равны между собой; $Z_р = R_р + jX_р$ - полное, активное и индуктивное сопротивления обмотки реактора; $Z_л = R_л + jX_л$ - полное, активное и реактивное сопротивления короткой сети; $-jX_c$ - емкостное сопротивление

компенсационной емкости; $R_н$ - сопротивлении нагрузки печи, которое определено сопротивление дуги в печи.

Точный расчет сопротивлений главного и вольтодобавочного трансформаторов сложен. Поэтому они определяются упрощенно по разработанной методике.

Оценка пригодности предлагаемой математической модели осуществляется путем сопоставления результатов расчета и эксперимента. В качестве экспериментального использовался составной трансформатор марки ЭОЦНК 16000/10-К с семнадцатью ступенями регулирования. Главным и вольтодобавочным в нем являются трансформаторы ЭОТЦ 10100/10 и ЭОЦ 5700/10.

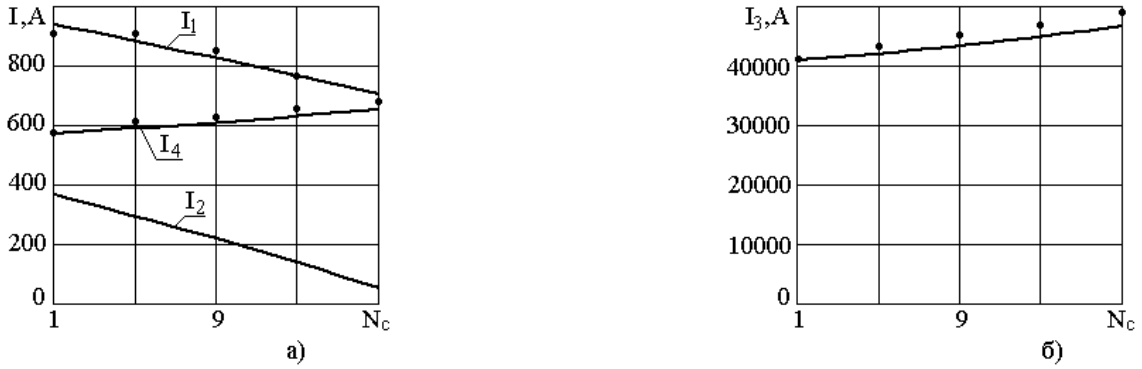

Рисунок 3 Токи в обмотках трансформатора ЭОЦНК 16000/10К в режиме нагрузки в зависимости от номера ступени

Результаты расчета и эксперимента токов в обмотках трансформатора ЭОЦНК 16000/10К в режиме нагрузки в зависимости от номера ступени приведены на рисунке 3, где расчетные значения токов показаны сплошной линией, а результаты эксперимента - точками. Токи I_1 и I_4 в процессе эксперимента снимались с имеющихся у ЭОЦНК 16000/10К трансформаторов тока.

Сопоставление результатов расчетов и эксперимента на рисунке 4, что в рассмотренных режимах погрешность расчета не превышает 10-15%. Это дает основание полагать, что и при ВЗ она будет примерно такой же.

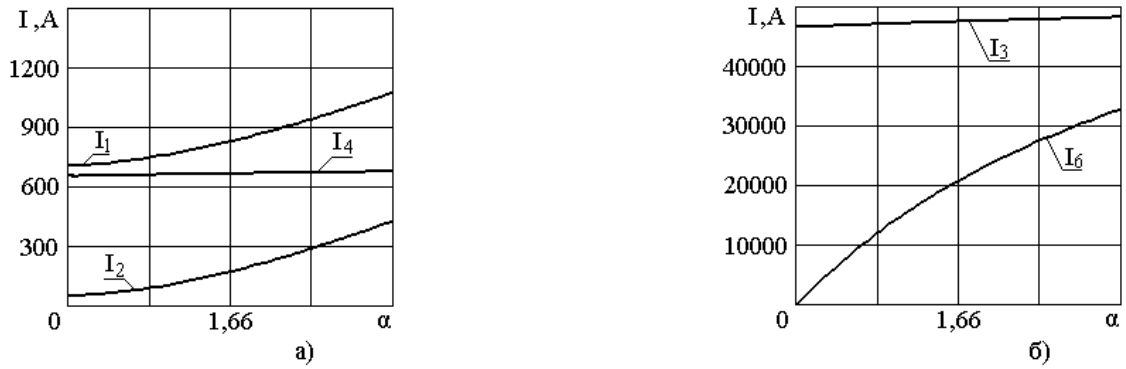

Рисунок 4 Токи в обмотках трансформатора ЭОЦНК 16000/10К при ВЗ на семнадцатой ступени регулирования

Результаты моделирования токов в трансформаторе ЭОЦНК 16000/10К при ВЗ в режиме нагрузки на семнадцатой ступени регулирования приведены на рисунке 5, где $\alpha = w_к/(w_{10}+w_{20})\times 100,\%$.

Далее в этом разделе рассматривается моделирование токов в вольтодобавочном трансформаторе, а также в группах однофазных трансформаторов при ВЗ с различными группами соединений из обмоток.

Третья глава посвящена развитию теории математического моделирования магнитных полей рассеяния обмоток трансформатора. В ней последовательно рассматривается моделирование магнитного поля рассеяния от витка с током, обмоток на одном стержне и всей обмотки трансформатора с прямоугольными и круглыми стержнями при ВЗ в одной из обмоток.

Моделирование аксиальной составляющей магнитного поля замкнувшихся витков на прямоугольном стержне предлагается свести к моделированию магнитного поля проводника длиной l_x с током $I_x = I_в$ в нем. На рисунке 5,а этот проводник изображен в заштрихованном виде, а его место расположения задано координатами x_0, y_0 и z_0. При этом аксиальная составляющая индукции магнитного поля рассеяния витка с током на левом стержне в точке A с координатами x, y и z определяется как

$$B_{ул,вит} = (I_x\mu_0/4\pi b)\left(r_1/d_1 - r_2/d_2\right)\left|z_0 - z\right|/b\ ; \qquad (5)$$

где $r_1 = x + l_x/2$; $r_2 = x - l_x/2$; $b = \sqrt{(y-y_0)^2 + (z-z_0)^2}$; $d_1 = \sqrt{r_1^2 + b^2}$; $d_2 = \sqrt{r_2^2 + b^2}$.

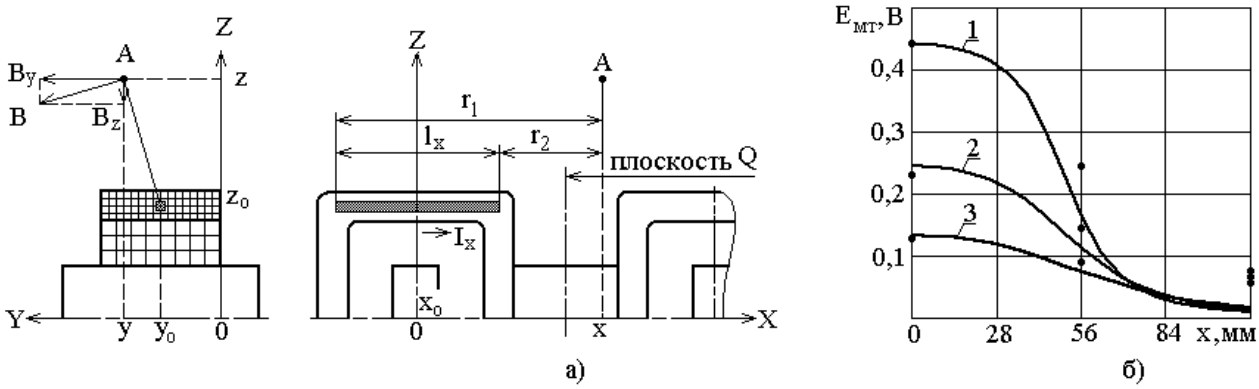

Рисунок 5 Расчетная схема и результаты их моделирования

Оценка достоверности математической модели осуществлялась путем сопоставления результатов расчета и эксперимента аксиальной составляющей индукции магнитного поля рассеяния от одного витка дополнительной обмотки с током $I_к = 26\,А$ на трансформатора ТТ-6. Результаты расчетов и измерений в виде $E_{мт} = k_{мт}\,B_{ул,вит}$ представлены на рисунке 6,а линиями 1-3 и точками, которые получены при координате $z = 0{,}0078м$, $z = 0{,}091м$ и $z = 0{,}109\,м$, где $E_{мт}$ и $k_{мт}$ - ЭДС и коэффициент МТ равный 1802,5.

При моделировании не учитывалось магнитное поле рассеяния от тангенциальной составляющей тока в витке дополнительной обмотки. Что привело к различию между результатами расчета и эксперимента в 20%.

Аксиальная составляющая магнитного поля рассеяния трансформатора при ВЗ представляется в виде суммы полей первичной и вторичной обмоток с комплексами тока $\dot{I}_1$ и $\dot{I}_2$ на его левом и правом стержнях, а также замкнувшихся витков с током $\dot{I}_к$. Поэтому

$$\dot{B}_{ул} = \sum_{i=1}^{w_1/2} \dot{B}_{ул,i1} + \sum_{j=1}^{w_2/2} (\dot{B}_{ул,j2} + \sum_{i=1}^{w_1} \dot{B}_{уп,i1} + \sum_{j=1}^{w_2} (\dot{B}_{уп,j2} + \sum_{k=1}^{w_к} (\dot{B}_{ул,к}), \qquad (6)$$

где $B_{ул,i1}(B_{уп,i1})$ и $B_{ул,j2}(B_{уп,j2})$ - аксиальная составляющая магнитного поля рассеяния i-го витка однослойной первичной и j-го витка вторичной обмоток на левом (правом) стержне; $\dot{B}_{ул,к}$ - и k-го витка вторичной поврежденной обмотки на левом стержне.

Результаты экспериментов и моделирования ЭДС МТ от токов в обмотках однофазного трансформаторов ТТ-6 в нормальном режиме и при замыкании трех витков на левом стержне сердечника в режиме нагрузке приведены на рисунке 6,б. Линиями 1-3 на нем показаны зависимости $E_{мт}(x)$ от полей обмоток на левом и правом стержнях, а также их сумма. При этом экспериментальное значение суммы $\dot{E}_{мт}(x)$ помечено точками.

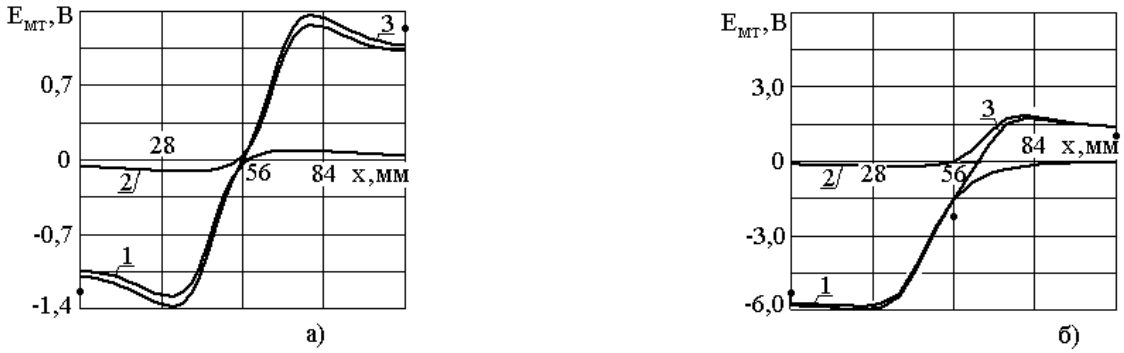

Рисунок 6 Результаты моделирования аксиальной составляющей магнитного поля рассеяния трансформатора при ВЗ

Из рисунков 5 и 6 видно, что в неповрежденном трансформаторе поле рассеяния от токов в обмотках симметрично относительно плоскости Q. При ВЗ эта симметрия нарушается. При этом погрешность моделирования $E_{мт}(x)$ не превышает 25%, а потому предлагаемый метод вполне подходит для расчета параметров МТ.

Аналогичным образом осуществляется моделирование магнитных полей трансформаторов с круглыми стержнями, при этом что погрешность моделирования несколько меньше и не превышает 5-7%.

В четвертой главе рассматриваются вопросы конструирования МТ и построения на них защит однофазных трансформаторов от ВЗ.

Конструктивно МТ прост. Он имеет несущую рейку из текстолита длиной H_c, на которой размещают обмотку. Эта рейка крепится к трансформатору. Обмотка МТ может быть сосредоточенной в нескольких местах или распределенной по всей длине рейки. Вид сосредоточенной и распределенной обмоток МТ показан на рисунках 7,а и 7,в.

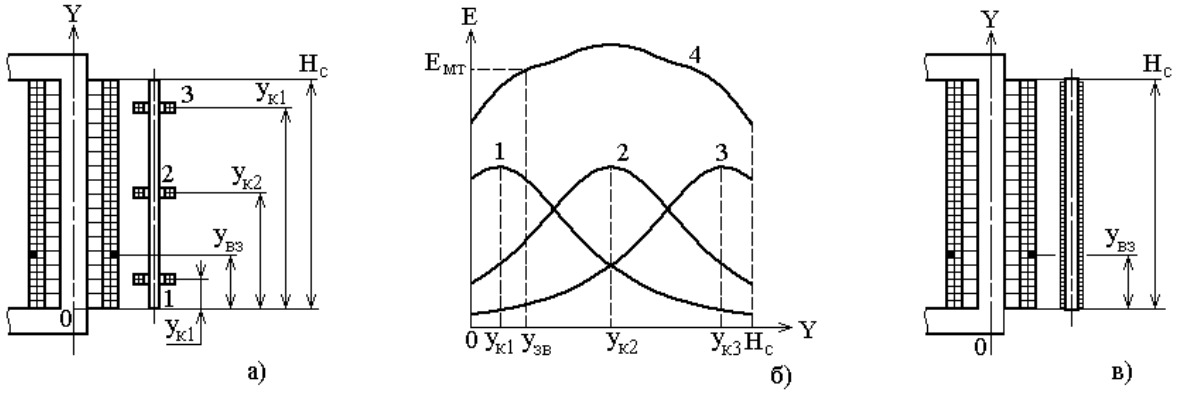

Рисунок 7. МТ с сосредоточенной и распределенной обмотками

Число катушек сосредоточенной обмотки, витков на них, а также место их размещение следует выбирают так, чтобы максимально снизить изменение по величине ЭДС МТ $E_{вз}$ в зависимости от места расположения ВЗ. Что обеспечит защите чувствительность, мало зависящую от места расположения ВЗ. На рисунке 7,б это место определено координатой $y_{вз}$. Так при трех катушках с равным числом витков и координатой $y_{к1} = 0{,}1H_c$, $y_{к2} = H_c/2$ и $y_{к3} = (1-0{,}1)H_c$ изменение их суммарной ЭДС МТ будет иметь вид кривой 4 на рисунке 7,б. В тоже время при координатах $y_{к1} = 0$, $y_{к2} = H_c/2$ и $y_{к3} = H_c$ это изменение уменьшится в три раза. Такой же результат можно получить при сохранении координат, но уменьшении витков средней катушки в два раза. У распределенной обмотки этого эффекта добиваются изменением шага обмотки.

Размеры катушек МТ a_x и a_z вдоль осей X и Z малы в сравнении с размерами обмоток защищаемого трансформатора. Поэтому изменение индукции магнитного поля в их пределах незначительно. В результате, в произвольной точке поля рассеяния ЭДС $n-$й катушки МТ

$$E_{кат,n} = 2\pi f_1 w_{кат,n} a_x a_z B_y. \qquad (7)$$

Комплексное сопротивление обмотки МТ из n катушек при значительном расстоянии между ними определится как

$$Z_{мт} = \sum_n R_{кат,n} + jX_{кат,n};\ R_{кат,n} = \rho 2a_x a_z w_{кат,n}/s_{пр}; \qquad (8)$$

где $R_{кат,n}$ и $X_{кат,n}$ - активная и реактивная составляющие сопротивления n-ой катушки МТ; $s_{пр}$ - сечение провода катушки.

Индуктивное сопротивление катушки МТ

$$X_{кат,n} = 11\mu_0 f\, w_{кат,n}^2 (a_x + a_z)/2. \qquad (9)$$

В качестве реагирующего органа защиты в зависимости от мощности МТ можно использовать реле РТ-40/0,2. Однако более чувствительны защиты на МТ с реле типа РН1-П/0,15 или РН2-П/0,2, разработанные Новожиловым Т.А. в соавторстве. Их конструкция и параметры приведены в диссертации.

Защиты трансформатора на МТ основаны на особенностях конструкции однофазного трансформатора. Если МТ расположить как показано на рисунке 8,а, то, например, в режиме нагрузки их ЭДС $E_{мт1}$ и $E_{мт2}$ в зависимости от координаты x можно представить линиями 1 и 2 на рисунке 8,б. При ВЗ в первичной обмотке на левом стержне эти зависимости можно представить линиями 1 и 2 на рисунке 8,в.

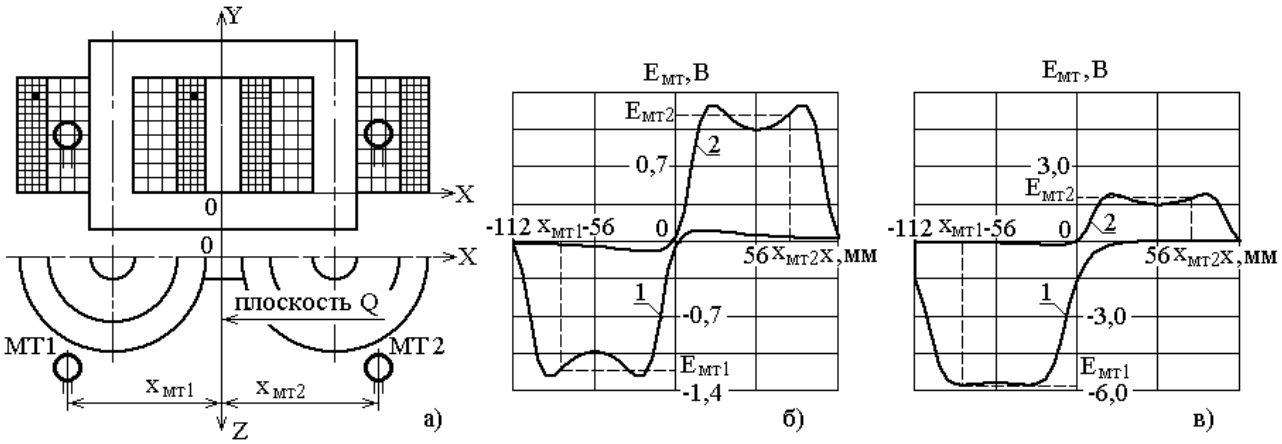

Рисунок 8. Взаимное расположение элементов обмоток трансформатора и двух МТ, а также их ЭДС при номинальной нагрузке и ВЗ

Из этого рисунка видно, что при одинаковых МТ и обмотках на стержнях зависимости $E_{мт1}(x)$ и $E_{мт2}(x)$ по абсолютной величине симметричны относительно плоскости симметрии Q трансформатора. Поэтому в любом эксплуатационном режиме работы защищаемого трансформатора эти ЭДС должны быть равны по величине. То есть $E_{мт1} = E_{мт2}$. Однако из-за неточности изготовления и установки катушек трансформатора и МТ $E_{мт1} \approx E_{мт2}$, а их разность $E_{мт1} - E_{мт2}$ будет равна ЭДС небаланса $E_{нб}$.

При возникновении ВЗ, например, в обмотке высокого напряжения на левом стержне как показано на рисунке 8,в ток в замкнувшихся витках $w_к$ значительно превысит свое до аварийное значение. В результате симметрия полей рассеяния от обмоток левого и правого стержней нарушится, а ЭДС $E_{мт1} \neq E_{мт2}$.

В результате ток в цепи реагирующего органа определяется как

$$I_{ро} = (E_{мт1} - E_{мт2})/(Z_{ро} + Z_{мт}). \qquad (10)$$

где $Z_{ро}$ и $Z_{мт}$ - полное сопротивление реагирующего органа и МТ.

Из рисунка 8,а ясно, что симметрия полей сохранится и при координате МТ $x = 0$. В этом случае МТ совмещаются и их можно заменить одним МТ, как показано на рисунке 9,а. Величины его ЭДС $E_{мт}$ в зависимости от координат x и z при замыкании $0 \div 3$ витков в режиме номинальной нагрузки трансформатора ТТ-6 на рисунках 9,б и 9,в показаны линиями $1 \div 4$. Из этих рисунков видно, что в точке с координатой $x = 0$ при $w_к = 0$ $E_{мт} = 0$. А при $w_к \neq 0$ $E_{мт} \neq 0$ и возрастает по мере уменьшения координаты z, как это показано на рисунке 9,в..

Ток в цепи реагирующего органа этой защиты

$$I_{ро} = E_{мт}/(Z_{ро} + Z_{мт}) \qquad (11)$$

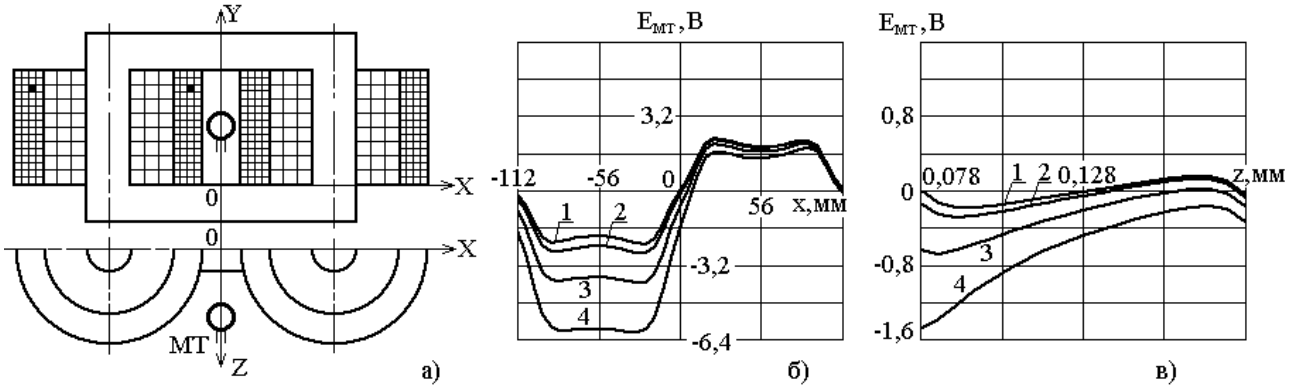

Рисунок 9 Взаимное расположение элементов обмоток трансформатора и МТ, а также зависимостей $E_{мт}(x)$ и $E_{мт}(z)$ при ВЗ в режиме номинальной нагрузки

Оценка эффективности этих защит осуществляется на базе однофазного трансформатора ТТ-6 и упрощенного МТ, который представлен катушкой от реле РП-11 с $w_п$=12500 витков. Он располагается между стержней с обмотками трансформатора, а его катушка находится на высоте, соответствующей их середине. Ток в цепи реагирующего органа при таком МТ в зависимости от $w_к$ приведен на рисунке 10.

Аналогично токовым защитам ток срабатывания реагирующего органа

$$I_{ср} = k_н I_{нб,к}, \qquad (12)$$

где $I_{нб,к}$ - максимальный ток в реагирующем органе, при коротком замыкании за защищаемым трансформатором; $k_н$ - коэффициент надежности отстройки равный 1,3-1,6.

Однако на ферросплавном производстве трансформаторы работают в режиме короткого замыкания. В этом случае ток срабатывания реле

$$I_{ср} = k_н I_{нб,нам}, \qquad (13)$$

где $I_{нб,нам}$ - максимальное значение намагничивающего тока.

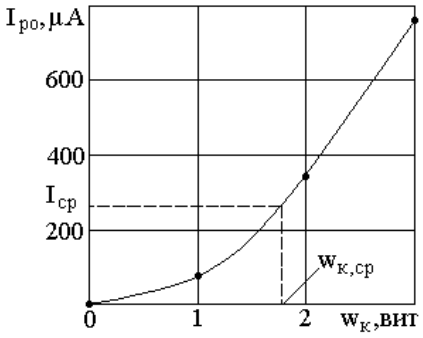

Рисунок 10. Экспериментальная зависимость $I_{ро}(w_к)$ защиты однофазного трансформатора ТТ-6.

В лабораторном трансформатора ТТ-6 при коротком замыкании за ним токи в первичной и вторичной обмотках составили $I_1 = 80{,}42А$ и $I_2 = 136{,}93А$, а ток $I_{ср}$ - $285\mu А$. В соответствии с рисунком 10 защита с реле РН1-П/0,15 УХЛ-4 должна срабатывать при замыкании двух и более витков, что составляет $\alpha = w_к 100\% / w_1 = 2\ 100\% / 504 = 0{,}397$.

Результаты экспериментального исследования защиты трансформатора ТТ-6 в виде осциллограмм тока $I_{1ф}$ в первичной обмотке однофазного трансформатора и ЭДС $E_{мт}$ МТ приведены на рисунке 11.

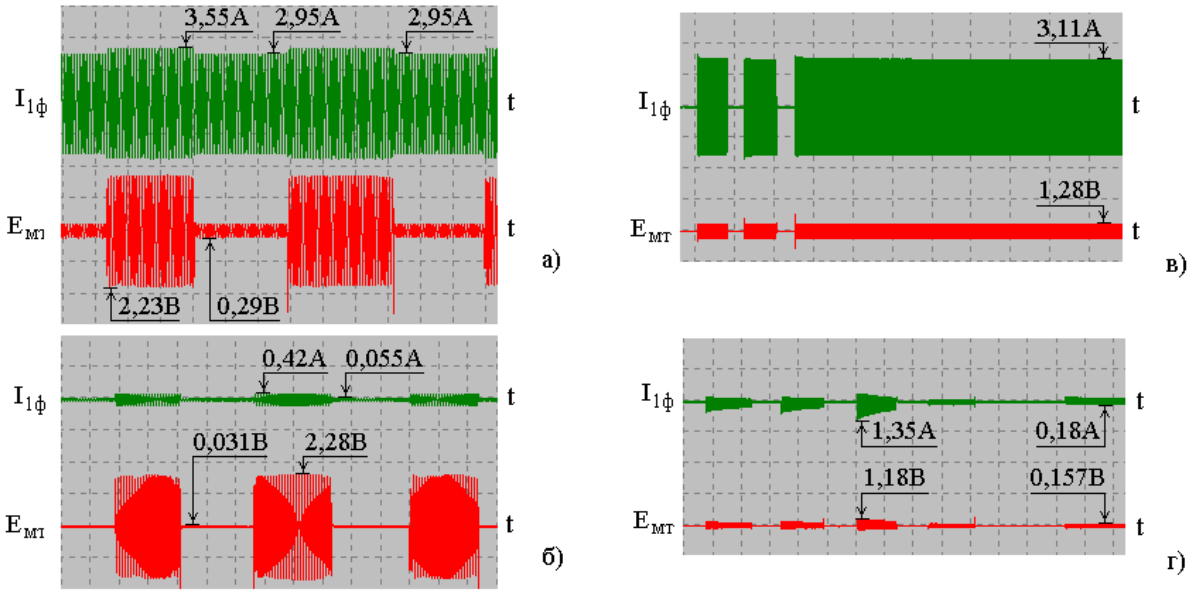

Рисунок 11 Осциллограммы тока в первичной обмотке и в МТ

Так на рисунках 11,а и 11,б осциллограммы $I_{1ф}$ и $E_{мт}$ получены при замыкании двух витков в первичной обмотке в режимах нагрузки и холостого хода, а на рисунках 11,в и 11,г – при включении трансформатора в сеть с номинальной нагрузкой и без нагрузки.

Из осциллограмм видно, что замыкание малого числа витков приводит к незначительному увеличению тока в первичной обмотке. В данном случае на 20%. В тоже время при замыкании за трансформатором этот ток возрастает в 27 раз, а при включении в сеть – в 5-7 раз. Именно по этому максимальная токовая и дифференциальная защиты в трансформаторах не могут использоваться для защиты трансформатора от ВЗ.

Экспериментальные исследования защиты от ВЗ на МТ проводились на стенде, смонтированном в экспериментальной лаборатории Павлодарского государственного университета им. С. Торайгырова при поддержке ОмГТУ. Внешний вид этого стенда приведен на рисунке 11.

Рисунок 11 Экспериментальный стенд

Заключительным этапом диссертационной работы является разработка комплексной защиты составных трансформаторов с короткой сетью, которая позволяет с высокой чувствительностью защищать составной трансформатор от ВЗ в главном и вольтодобавочном трансформаторах, а короткую сеть от коротких замыканий между элементами сети и обрывов этих элементов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе сделан глубокий анализ теоретических исследований и технических решений в области построения защит трансформаторов от ВЗ, выявлены их недостатки и дано новое решение актуальной научной задачи – развитие теории построения защит однофазных трансформаторов от ВЗ. Основные научные и практические результаты, полученные в работе, заключаются в следующем:

1. При анализе теоретических исследований и технических решений в области построения защит трансформаторов от ВЗ выявлено, что:

- максимальная токовая и дифференциальная защиты к ВЗ имеют низкую чувствительность;

- газовая защита обладает большим временем срабатывания при малом числе замкнувшихся витков;

- защиты на МТ имеют зону нечувствительности при ВЗ в той части обмотки, которая расположена вблизи средней части стержня;

- МТ этих защит сложны в установке и эксплуатации.

2. Предложен новый метод моделирования токов в обмотках однофазного трансформатора, позволяющий с точностью до 15% определять их при ВЗ в эксплуатационных режимах работы.

3. Предложен и обоснован метод экспериментального определения токов в трансформаторе при ВЗ без повреждения изоляции обмоток.

4. Разработан новый метод моделирования токов при ВЗ в обмотках главного и вольтодобавочного трансформаторов в эксплуатационных режимах, позволяющий определять их на всех ступенях регулирования с точностью до 15%.

5. Предложен и осуществлен метод моделирования токов в группе однофазных трансформаторов при ВЗ в одном из них.

6. Разработанные методы математического моделирования магнитных полей рассеяния обмоток однофазного трансформатора при ВЗ в эксплуатационных режимах работы позволяют с точностью до 5-7% рассчитывать величины этих полей в трансформаторах с прямоугольным и круглым сердечниками при отсутствии масляного бака, в промежутке между обмотками и стенкой бака, а также между стержнями сердечника.

7. Предложены теоретические основы построения МТ для защит трансформаторов от ВЗ, которые позволяют конструировать их с заданными характеристиками, а также определять их параметры и погрешности измерения.

8. Разработаны реагирующие органы для защит трансформатора от ВЗ на МТ, обладающие малой потребляемой мощностью и напряжением срабатывания.

9. Предложены способ и устройство высокочувствительной защиты от ВЗ однофазного трансформатора на одном и двух МТ, которые не имеет зоны нечувствительности.

10. Предложено устройство защиты от ВЗ однофазного составного трансформатора, которое с высокой чувствительностью селективно позволят определять ВЗ в главном и вольтодобавочном трансформаторах составного трансформатора, а также электрические повреждения в короткой сети.

11. Разработанные теоретические основы построения защит однофазных трансформаторов на МТ позволяют создавать дешевые, простые в изготовлении и эксплуатации устройства, не имеющие зоны нечувствительности и способные надежно отключать трансформатор при замыкании 0,4-0,6% витков поврежденной обмотки трансформатора.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

По перечню рецензируемых изданий ВАК

1. Новожилов, Т.А. Анализ методов моделирования коммутационных переходных процессов в электрических сетях с изолированной нейтралью [Текст] / Новожилов А.Н., Колесников Е.Н., Кудабаев Д.А., Новожилов Т.А. // Электротехника. – 2013. – № 1. – С. 7- 10.

2. Новожилов, Т.А. Моделирование токов замыкания на землю обмотки статора асинхронного двигателя в сети с изолированной нейтралью [Текст] / Новожилов А.Н., Колесников Е.Н., Новожилов Т.А., Кудабаев Д.А. // Электротехника. - 2013. - №2. - С. 38- 42.

3. Новожилов, Т.А. Метод формирования системы уравнений математической модели электрических машин и трансформаторов в эксплуатационных режимах [Текст] / Новожилов А.Н., Андреева О.А., Воликова.М.П., Гаспарян А.Г., Новожилов Т.А. // Омский научный вестник. - 2006. -№ 9(46). -С108- 112.

4. Новожилов, Т.А. Определение токов в обмотках однофазного трансформатора для релейной защиты при витковом замыкании [Текст] / Новожилов А.Н., Новожилов Т.А. // Омский научный вестник. – 2014.- № 9(46). - С. 174- 177.

5. Новожилов, А.Н. Моделирование токов при витковом замыкании в трансформаторах руднотермических печей [Текст] / Новожилов А.Н., Горюнов В.Н., Новожилов Т.А., Крылов И.Ю., Никитин К.И. [Текст] // Электротехника. – 2013.- №4.- С. 27- 32.

6. Новожилов, А.Н. Моделирование магнитных полей методом зеркальных отражений с коррекцией токов для синтеза защит электрических машин [Текст] / Новожилов А.Н., Воликова М.П., Полищук В.И., Новожилов Т.А., Андреева О.А. // Электричество. - 2008. - № 11. – С. 44- 48.

7. Новожилов, Т.А. Особенности конструкции индуктивных преобразователей для релейной защиты и диагностики электрических машин переменного тока [Текст] / Новожилов Т.А., Воликова М.П., Андреева О.А., Новожилов Т.А. //Электричество. - 2009. - №4. – С. 19- 24.

Патенты

8. Пат. 2422965 Российская Федерация, МПК Н 02 Н 7/04. Способ защиты печного трансформатора с фазами, выполненными со стороны низшего напряжения в виде группы отдельных проводников [Текст] / Новожилов А.Н., Горюнов В.Н., Клецель М.Я., Майшев П.Н., Новожилов Т.А. - № 2010121050/07 ; заявл. 24.05.2010 ; опубл. 27.06.2011, Бюл. № 16. -6 с.: ил.

9. Инновационный пат. Республика Казахстан, МПК Н 02 Н 7/04. Устройство защиты трансформатора от витковых замыканий [Текст] /Новожилов А.Н., Понамарева Н.Ю., Новожилов Т.А. - № 19000 ; заявл. 22.08.2005 ; опубл. 18.12.2007, Бюл. № 12. - 3 с.: ил.

10.. Инновационный пат. Республика Казахстан, МПК Н 02 Н 7/04. Устройство защиты трансформатора от витковых замыканий [Текст] /Новожилов А.Н., Крюковский К.П., Новожилов Т.А., Крылов И.Ю. - № 19884 ; заявл. 06.02.2007 ; опубл. 15.08.2008, Бюл. № 8. - 3 с.: ил.

11. Инновационный пат. Республика Казахстан, МПК Н 02 Н 7/04. Устройство защиты однофазного трансформатора от замыканий в обмотках [Текст] /Новожилов А.Н., Колесников Е.Н.., Новожилов Т.А., Крылов И.Ю. № 26737 ; заявл. 12.04.2012 ; опубл. 15.08.2013, Бюл. № 3. - 3 с.: ил.

12. Инновационный пат. Республика Казахстан, МПК Н 02 Н 7/04. Устройство защиты однофазного трансформатора от витковых замыканий в обмотках [Текст] /Новожилов А.Н., Нефтисов А.В., Колесников Е.Н.., Новожилов Т.А. - № 27097 ; заявл. 19.10.2012 ; опубл. 14.06.2013, Бюл. № 6. - 3 с.: ил.

13. Инновационный пат. Республика Казахстан, МПК Н 02 Н 7/04. Устройство защиты трехфазного трансформатора от замыканий обмоток [Текст] / Новожилов А.Н., Новожилов Т.А., Колесников Е.Н., Крылов И.Ю. - № 26738 ; заявл. 12.04.2012 ; опубл. 15.03.2013, Бюл. № 3. - 3 с.: ил.

14. Инновационный пат. Республика Казахстан, МПК Н 02 Н 7/04. Способ защиты печного трансформатора с фазами, выполненными со стороны низшего напряжения в виде группы отдельных проводников [Текст] / Клецель М.Я., Новожилов А.Н., Новожилов Т.А., Майшев П.Н. - № 23241 ; заявл. 10.03.2009 ; опубл. 15.11.2010, Бюл. № 11. - 3 с.: ил.

Публикации в других изданиях

15. Новожилов, Т.А. Моделирование эксплуатационных режимов работы трансформаторов [Текст] / Новожилов А.Н., Кислов А.П., Пономарева Н.Ю., Новожилов Т.А. // Вестник ПГУ, серия Энергетическая. - 2005. - № 3. –С. 130-137.

16. Новожилов, Т.А. Анализ защит трансформаторов от виткового замыкания [Текст] / Новожилов А.Н., Новожилов Т.А., Колесников Е.Н., Шкреба Е.В. // Вестник ПГУ, серия Энергетическая, - 2012. - № 1- 2. - С. 96-100.

17. Новожилов, Т.А. Отчет по НИР на выполнение хоздоговорной научно-исследовательской работы № 35 «Разработка и внедрение новой защиты короткой сети печного трансформатора» [Текст] / Новожилов А.Н., Новожилов Т.А. // Павлодарский государственный университет им. С. Торагырова. – 2006.

18. Новожилов, Т.А. Моделирование эксплуатационных режимов работы трансформаторов [Текст] / Новожилов А.Н., Кислов А.П., Пономарева Н.Ю., Новожилов Т.А. // HSU named after S. Toraigyrov research papers, International Series, Publication. -2005 - №. 1. p. 3- 13.

19. Новожилов, Т.А. Защита трансформатора руднотермической печи от виткового замыкания [Текст] / Новожилов А.Н., Новожилов Т.А., Колесников Е.Н. // Материалы 5 международной научно – технической конференции «8

Шокинские чтения». - Павлодар: Павлодарский государственный университет им. С. Торагырова. - 2012. - С. 103- 107.

20. Новожилов, Т.А. Особенности конструкции индукционных преобразователей для релейной защиты и диагностики асинхронного двигателя [Текст] / Новожилов А.Н., Андреева О.А., Новожилов Т.А. // Вестник ПГУ, серия Энергетическая. - 2007. - № 4. С. 87- 102.

Личный вклад автора в опубликованных материалах составляет более 50%.