

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТОКОВЫХ ЗАЩИТ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ РУДОТЕРМИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА С ОДНОФАЗНЫМИ ТРАНСФОРМАТОРАМИ



Министерство науки и высшего образования
Республики Казахстан

Некоммерческое акционерное общество
«Торайгыров университет»

А. Н. Новожилов, Д. М. Рахимбердинова

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ
ТОКОВЫХ ЗАЩИТ
ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ
РУДОТЕРМИЧЕСКОГО
ПРОИЗВОДСТВА С
ОДНОФАЗНЫМИ
ТРАНСФОРМАТОРАМИ**

Монография

Павлодар
Toraighyrov University
2026

УДК 621.316.92:621.365.2
ББК 31.27-05
Н74

**Рекомендовано к изданию Учёным советом
НАО «Торайгыров университет»
(Протокол № 10/2, от 31 марта 2026 года)**

Рецензенты:

М. Я. Клецель – д-р техн. наук, профессор;
С. И. Олейник – канд. техн. наук, ТОО «ЭНЭКО»;
Н. Ш. Жуматаев – д-р PhD, ТОО «KSP Steel».

Новожилов А. Н., Рахимбердинова Д. М.

Н74 Совершенствование токовых защит электрооборудования
рудотермического производства с однофазными
трансформаторами: монография / А. Н. Новожилов,
Д. М. Рахимбердинова. – Павлодар : Toraighyrov University,
2026. – 137 с.

ISBN 978-601-345-746-8

В монографии представлены методы моделирования режимов работы печных трансформаторов с короткой сетью рудотермического производства, с учетом которых разработаны устройства защит электрооборудования печей. Представленные защиты не только выявляют электрические повреждения, но и определяют их вид. Осуществлена экспериментальная проверка работоспособности разработанных устройств. Книга представляет интерес для студентов, магистрантов, докторантов и преподавателей высших учебных заведений специальности «Электроэнергетика», а также для технического персонала рудотермических производств.

УДК 621.316.92:621.365.2
ББК 31.27-05

ISBN978-601-345-746-8

© Новожилов А. Н.,
Рахимбердинова Д. М., 2026
© Торайгыров университет, 2026

За достоверность материалов, грамматические и орфографические ошибки ответственность несут
авторы и составители

Введение

Особенностью рудотермического производства является использование в нем однофазных и трехфазных печных трансформаторов с расщепленной вторичной обмоткой и короткой сети, каждая фаза которой состоит из параллельных линий, число которых равно числу этих расщеплений. В зависимости от мощности печи число расщеплений может колебаться от двух до восьми.

Как показал многолетний опыт эксплуатации однофазных печных трансформаторов и короткой сети рудотермических производств республики Казахстан, значительная часть коротких замыканий (КЗ) в этих электроустановках приходится на витковые замыкания (ВЗ) в первичной обмотке, а также на КЗ и обрывы в параллельных линиях короткой сети. При этом до 45 % замыканий в обмотках однофазного трансформатора составляют ВЗ.

Традиционно для защиты печных трансформаторов от КЗ используют токовую отсечку (ТО) и максимальную токовую защиту (МТЗ), а для защиты от ВЗ в первичной обмотке трансформатора – газовую защиту. Дифференциальная защита на печные трансформаторы с расщепленной вторичной обмоткой не устанавливается из-за сложности установки и дороговизны требуемого количества трансформаторов тока (ТТ), рассчитанных на токи 20–40 кА.

Однако, токовые защиты малочувствительны к ВЗ в первичной обмотке. В свою очередь газовая защита обладает временем срабатывания, которое зависит от температуры масла и числа замкнувшихся витков. Поэтому, практически всегда печной трансформатор при ВЗ отключают не в момент возникновения повреждения, а тогда, когда его размеры вызовут срабатывание токовой или газовой защиты. В результате при таком подходе к построению защиты трансформатора стоимость его ремонта может достигать порядка 60–65 % от оптовой стоимости.

Короткая сеть на рудотермическом производстве работает в условиях достаточно высоких температур при наличии в окружающей среде большого количества абразивной металлической и угольной пыли. При этом отдельные элементы короткой сети являются подвижными и в процессе эксплуатации могут перемещаться. Так как токовые защиты нечувствительны к КЗ и обрывам в параллельных линиях короткой сети, то от КЗ в параллельных линиях короткой сети, как правило, защищаются с помощью электрической изоляции. Такая изоляция под воздействием абразивной пыли довольно быстро

истирается, а наличие угольной пыли приводит к созданию токопроводящих мостиков. В случае возникновения дуги полное разрушение, например, дорогостоящего шинного пакета при токах в трубошинах порядка 20-40 кА происходит за очень короткое время. При этом своевременное отключение этого КЗ позволяет значительно сократить размеры повреждения и, следовательно, время и стоимость ремонта.

Значительной части этих недостатков лишены защиты трансформатора с токопроводом, измерительные преобразователи которых выполнены в виде магнитных трансформаторов тока (МТТ). Большой вклад в разработку защит на МТТ внесли Засыпкин А. С., Гаген А. Ф., Чечушков Г. А., Пястолов А. А., Новожилов А. Н., Новожилов Т. А., Казанский В. Е. и многие их коллеги. Однако чувствительность некоторых из этих защит зависит от места расположения замкнутых витков в обмотке трансформатора. Другие нечувствительны к КЗ и разрывам фаз в параллельных линиях короткой сети. Изготовление, установка и эксплуатация МТТ третьих сопряжена со значительными техническими трудностями.

Таким образом, совершенствование токовых защит, например, однофазного печного трансформатора от ВЗ в первичной обмотке, а также короткой сети от КЗ и обрывов в параллельных линиях, является актуальным.

1 Особенности конструкции комплекса «рудотермическая печь» и его защит

1.1 Особенности электроснабжения рудотермического производства

В настоящее время одной из основных проблем в электроснабжении промышленных предприятий типа рудотермическое производство является бесперебойное обеспечение электроэнергией необходимого качества. Это вызвано в значительной мере и ухудшением технического состояния кабельных линий электропередачи, печных трансформаторов и коротких сетей. Дело в том, что значительная часть этого оборудования в связи с переходом к рыночной экономике выработала свой ресурс или близка к этому. В результате вероятность и частота возникновения аварийных ситуаций резко возросла [1].

Как известно, конструкция и схема сети в основном зависят от характера размещения нагрузки, ее мощности, а также требования к надежности электроснабжения. В соответствии с последним требованием распределение электроэнергии в кабельных сетях напряжением 6–10 кВ рудотермического производства промышленных предприятий выполняется по магистральной схеме, которая в данном случае является наиболее экономичной. Как правило, такие сети выполняются с изолированной или с компенсированной нейтралью [2]. Фрагмент сети с изолированной нейтралью приведен на рисунке 1.1.

Из опыта эксплуатации [1] известно, что на однофазные замыкания на землю (ОЗЗ) в сети с изолированной нейтралью приходится примерно до 65 % от общего числа повреждений в этой сети. При этом на двухфазные и трехфазные КЗ приходится примерно 30 и 5 % от всех замыканий.

Если происходит замыкание одного из кабеля на землю в сети с изолированной нейтралью, то величина тока зависит от емкости данной сети. Как известно [3], в сетях с изолированной нейтралью токи замыкания фазы на землю невелики и не требуют немедленного отключения.

Однако нельзя допускать ошибочной недооценки опасности однофазных замыканий из-за возможности возникновения перемежающихся дуговых замыканий фазы на землю, которая сопровождается большой кратностью перенапряжений на элементах сети.

Согласно ПУЭ [3] в целях обеспечения безопасности персонала корпуса электрических машин и аппаратов заземляют. Поэтому особое место в этом виде повреждений занимают однофазные замыкания обмотки на корпус (ОЗК). По [1] именно на них приходится большая часть повреждений первичной обмотки печного трансформатора. В этом случае в результате воздействия тока замыкания на корпус может повредиться сталь сердечника, а ОЗК перейти в ВЗ или междуфазное КЗ.

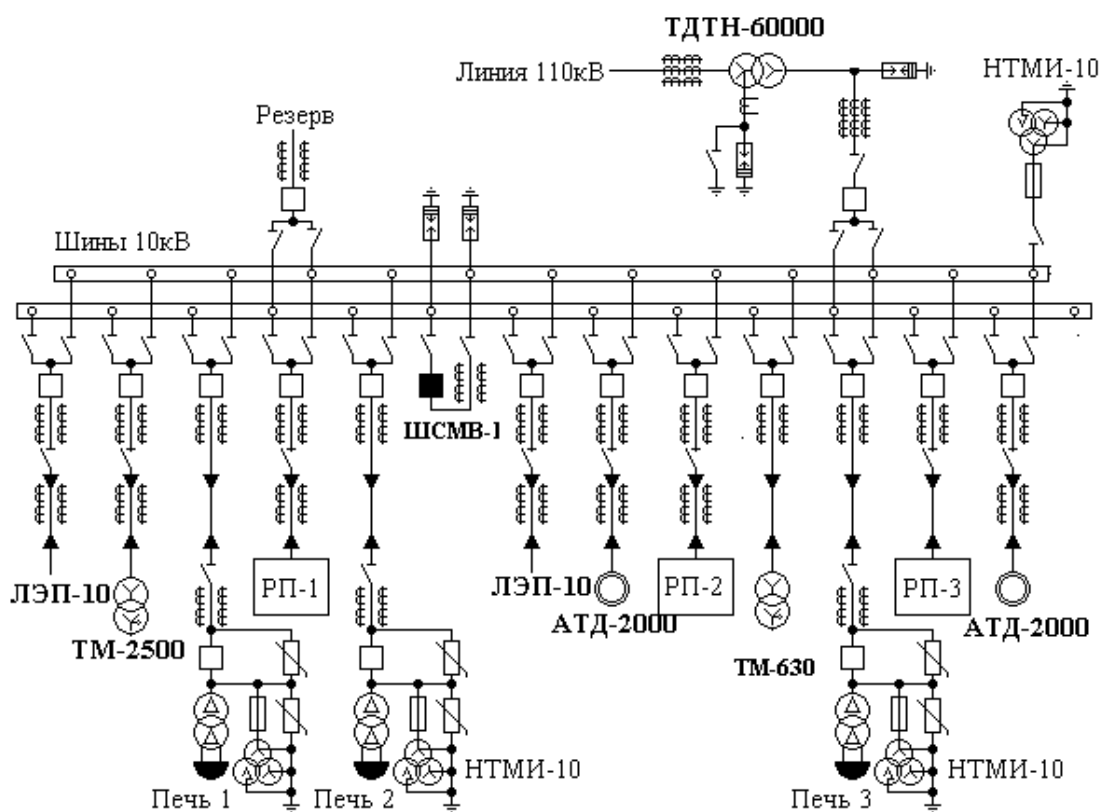


Рисунок 1.1 – Фрагмент кабельной сети с изолированной нейтралью напряжением 10 кВ в виде одной распределительной подстанции

Как показал многолетний опыт эксплуатации однофазных печных трансформаторов и короткой сети рудотермических производств республики Казахстан, основной причиной аварий является КЗ. При этом до 52 % от всех повреждений приходится на КЗ в обмотках трансформатора. При этом до 25–45 % от всех этих КЗ составляют ВЗ.

В рудотермических печах осуществляется переработка рудных материалов посредством восстановления оксидов до элементов или

карбидов [4]. При этом металлы получают в виде сплавов. Сернистые руды, которые впоследствии были переработаны на сульфиды металлов (штейны), являются исходным сырьём [4].

Рудотермические печи – это мощные потребители энергии, удельный расход электроэнергии которых для ряда процессов составляет [4]:

- 10000÷16000 кВт·ч/т – при производстве фосфора;
- 8800÷9700 кВт·ч/т – при производстве 75 % ферросилиция;
- 4700÷4800 кВт·ч/т – при производстве 45 % ферросилиция;
- 4100÷4700 кВт·ч/т – при производстве силикомарганца;
- 3000÷3500 кВт·ч/т – при плавке огнеупоров «на блок»;
- 2800 кВт·ч/т – при плавке нормального электрокорунда;
- 720 кВт·ч/т – при производстве медно-никелевого штейна.

При производстве материалов, получение которых другими методами не столь эффективно, рекомендуется использовать электрический нагрев и особенный дуговой способ нагрева [4]. Помимо этого, рудотермические печи целесообразно применять в тех производствах, где используются печи сопротивления или топливные печи. Если учесть, что стоимость 1 кВт·ч электроэнергии меньше стоимости 0,25 кг кокса, то электротермический способ производства чугуна может успешно конкурировать с доменным способом [4].

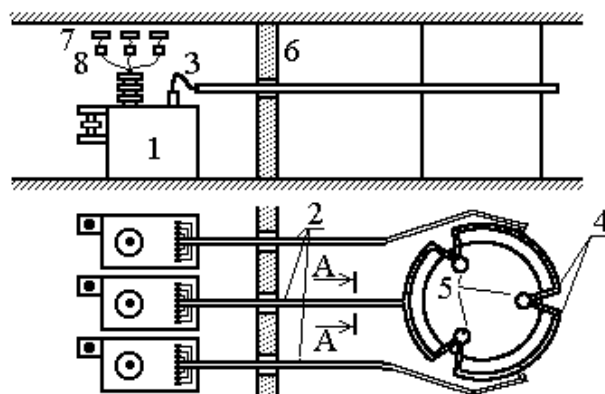


Рисунок 1.2 – Упрощенный вариант схемы комплекса «рудотермическая печь»

В рудотермических печах преобразование электрической энергии в тепло осуществляется как в дуговом разряде, так и за счёт прохождения тока через слой электропроводной шихты или

электропроводного расплава [4]. Один из вариантов схемы комплекса «рудотермическая печь» приведен на рисунке 1.2. По этой схеме: 1 – печной однофазный трансформатор; 2 – компенсатор; 3 – шинный пакет; 4 – гибкие связи; 5 – электроды рудотермической печи; 6 – стена между печными трансформаторами и печью; 7 – шины высокого напряжения; 8 – трансформаторы тока для релейной защиты и измерительных приборов.

1.2 Конструкционные особенности печных трансформаторов

Печной трансформатор – это статическое электромагнитное устройство, которое преобразует одну систему переменного тока в другую [1]. Для такого преобразования обычно используют трехфазные и однофазные трансформаторы. Выбор и установка однофазного или трехфазного трансформаторов обуславливается множеством факторов. Одним из таких факторов является невозможность транспортировки и установки трехфазного трансформатора из-за большого веса и габаритов, и, как следствие, невозможность монтажа в помещении. Однофазные трансформаторы легче и имеют меньшие габаритные размеры. В связи с этим, как правило, на рудотермическом производстве используют группы однофазных трансформаторов. В остальных случаях предпочтение отдается трехфазным трансформаторам, так как они при той же передаваемой мощности имеют более высокие технико-экономические показатели.

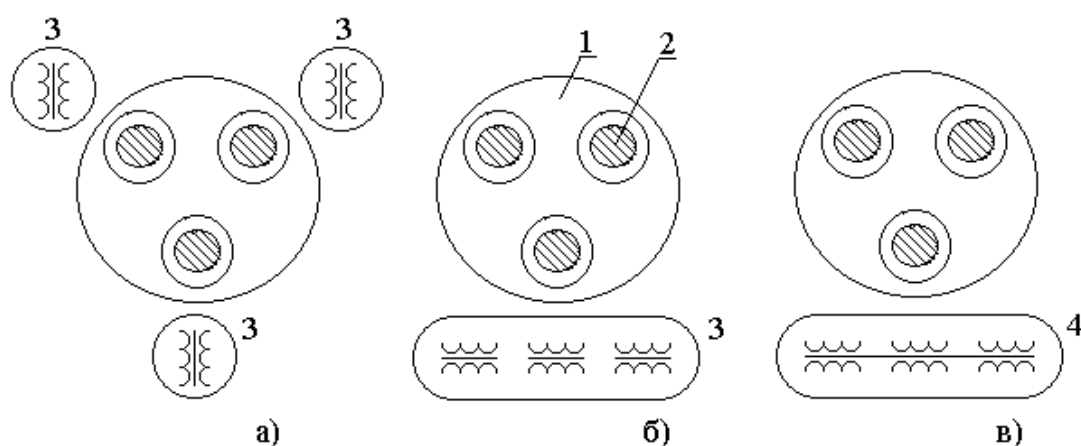
В связи с этим выбор печного трансформатора и схемы его расположения относительно печи зависит от мощности печи, структуры производственных помещений, минимизации потерь электроэнергии и удобств эксплуатации короткой сети и т.д. [5].

Наряду с этим, существуют требования, которым должны соответствовать печные трансформаторы [6]:

- большая механическая прочность крепления обмоток и отводов, необходимая в связи с частыми бросками тока и эксплуатационными короткими замыканиями, особенно в период плавления шихты;
- значительная перегрузочная способность, позволяющая выдерживать в течение 5–10 с частые эксплуатационные короткие замыкания и подводить к печи в период плавления мощность, превышающую номинальную на 20–25 %;
- широкий диапазон изменения ступеней вторичного напряжения в соответствии с требованиями технологического

процесса в отдельные периоды плавки, а также возможность их переключения под нагрузкой.

Как показано в [6], рудотермические печи могут выполняться с симметричной или асимметричной короткой сетью. Для реализации симметричной короткой сети используются три однофазных трансформатора, размещаемых в отдельных камерах вокруг печи, как показано на рисунке 1.3,а. Реализация печи с асимметричной короткой сетью может осуществляться с помощью трех однофазных трансформаторов, размещаемых в одной камере, или одного трехфазного трансформатора.



а – схема с симметричной короткой сетью; б – схема с асимметричной короткой сетью с однофазными трансформаторами: 1 – ванна печи; 2 – электроды; 3 – однофазные печные трансформаторы; 4 – трехфазный печной трансформатор; в – схема с асимметричной короткой сетью с трехфазным трансформатором

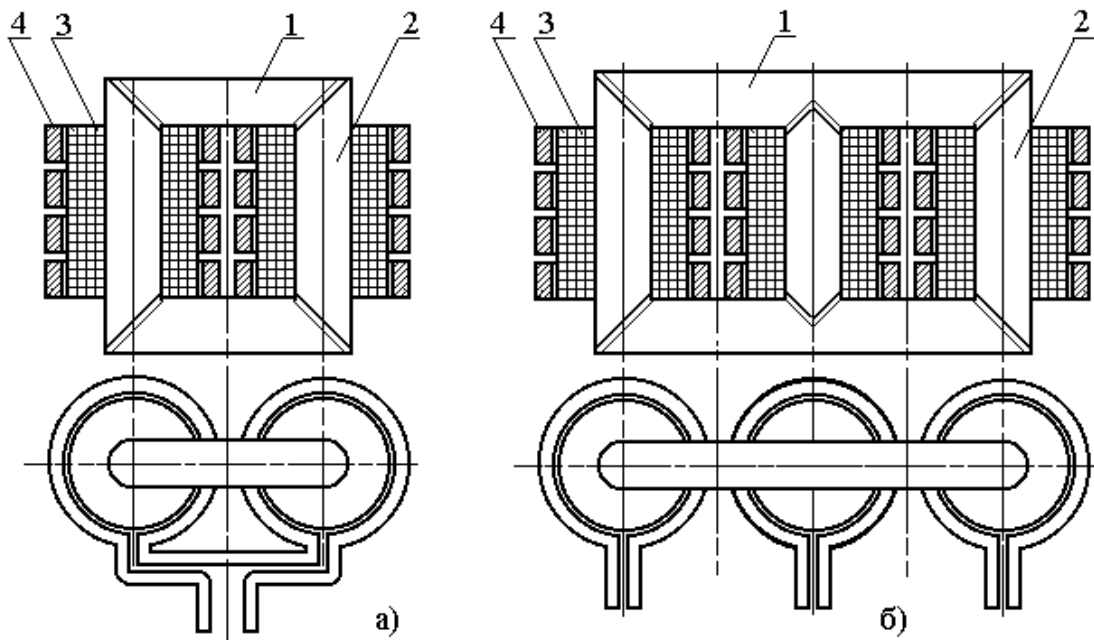
Рисунок 1.3 – Схема расположения трансформаторов относительно печи

Размещение их в камеры относительно печи приведено на рисунках 1.3,б и 1.3,в [4].

Как правило, печные трансформаторы выполняются масляными [7]. Масляный трансформатор состоит из ферромагнитного сердечника, обмоток высокого и низкого напряжения и бака с маслом, на котором размещены вводы в виде проходных изоляторов и расширитель.

Конфигурация сердечника магнитной системы может быть различной. Однако наибольшее распространение получили сердечники с магнитной системой стержневого типа [8]. Вид

магнитной системы стержневого типа однофазного и трехфазного трансформаторов приведен на рисунках 1.4, а и 1.4,б, где 1 и 2 – ярмо и стержень магнитопровода; 3 и 4 – обмотки высокого и низкого напряжения.



а – однофазный трансформатор; б – трехфазный трансформатор

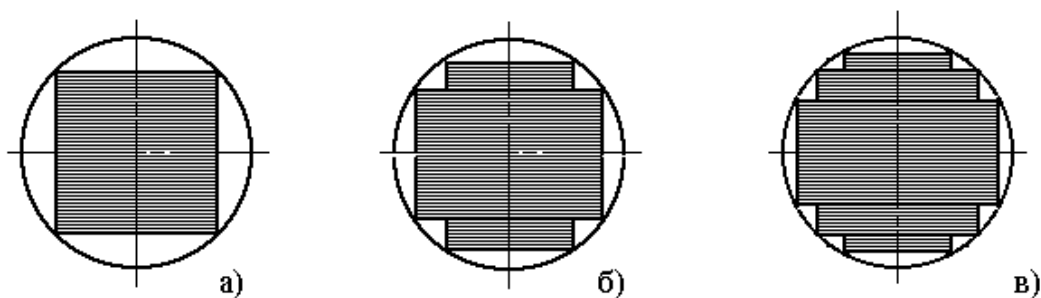
Рисунок 1.4 – Однофазный и трехфазный трансформаторы стержневого типа с шинными вторичными обмотками

Форма поперечного сечения стержня сердечника в значительной мере определена формой катушек обмоток. А так как круглые катушки более устойчивы к воздействию электродинамических сил, которые возникают при коротких замыканиях в обмотках, то наибольшее распространение получили формы сечения стержня, приведенные на рисунке 1.5.

Форма стержня с прямоугольным сечением приведена на рисунке 1.5, а. Такие стержни более просты в изготовлении, так как листы электротехнической стали, идущие на его изготовление, имеют одинаковые размеры. Однако при одинаковой площади витка обмотки они имеют меньшую площадь поперечного сечения. Изготовление стержня с круглым сечением проблематично, потому что для этого необходимы листы с постепенно уменьшающейся шириной. В связи с этим чаще всего стержни трансформатора набираются из отдельных пакетов пластин разной ширины, которые в совокупности дают

стержень, приближающийся к цилиндрической форме. Варианты форм и размеров сечений приведены на рисунке 1.5,б и 1.5,в.

Степень округлости сечения стержня у разного типа трансформаторов неодинакова и, как правило, зависит от мощности трансформатора. У трансформаторов малой и средней мощности сечение стержня имеет форму, приведенную на рисунке 1.5,б.



а – прямоугольное сечение; б – полукруглое сечение; в – круглое сечение

Рисунок 1.5 – Форма сечений стержня

Трансформаторы высокой мощности имеют сечение стержня почти круглой формы, например, такой, которая изображена на рисунке 1.5,в. Отношение площади железа к площади, охватывающей его окружности [8] называют коэффициентом заполнения железом сечения сердечника. Ядро сердечника трансформатора с целью упрощения и удешевления конструкции и сборки обычно имеет прямоугольное сечение.

В печных трансформаторах средней и большой мощности обычно используются стыковые магнитопроводы. В магнитопроводах стержни и яра собирают отдельно из листов трансформаторной стали, скошенной под углом 45° , и скрепляют их между собой. В соответствии с [1] для этого в трансформаторах стержни и яра магнитопроводов из холоднокатаной анизотропной стали стягивают бандажами из стеклоленты или стальной ленты с помощью деревянных или пластмассовых планок, а также стальных опорных балок. В магнитопроводах из горячекатаной стали стержни и яра стягивают стальными шпильками. При этом шпильки изолируются относительно стержней и яр трубами из изоляционного материала. Такой способ опрессовки стержней и яр из холоднокатаной стали недопустим.

Это вызвано тем, что магнитные силовые линии в этом случае должны огибать отверстия в стальных листах. То есть отклоняться от направления проката стали магнитопровода [1].

Затем из стержней и ярм собирают магнитопровод, как это показано на рисунке 1.4. При этом магнитопровод вместе с опорными балками и другими прессующими деталями образует остов трансформатора. Как известно, во время работы силового трансформатора магнитопровод и другие стальные части находятся в сильном электрическом поле, вследствие чего они приобретают значительный электрический заряд. Поэтому остов заземляют с помощью медных лент.

В месте стыков стержней и ярм во избежание замыкания листов трансформаторной стали устанавливают изоляционные прокладки. После сборки магнитопровода его верхнее ярмо снимается, а на стержни устанавливают катушки обмоток. Затем ярмо снова устанавливают на место. После этого остов трансформатора стягиваются сжимными плитами и болтами [8]. В виду простоты такое соединение применяется практически во всех типах трансформаторов.

Катушки обмоток изготавливают отдельно на особых станках. В электропечных трансформаторах обмотки высокого и низкого напряжения на стержнях располагают концентрически. При этом обмотка низкого напряжения находится снаружи. Такое расположение объясняется тем, что рабочий ток в обмотке порой достигает нескольких сотен килоампер. В связи с этим при внутреннем расположении обмотки конструкция отводов оказалась бы сложной, а коммутация большого количества массивных отводов была бы трудоемкой. Регулировочная обмотка с выводами, как правило, находится между стержнем остова и первичной обмоткой. Эти выводы с помощью существующей системы переключения ступеней напряжения позволяют обеспечить несколько ступеней напряжения.

Обмотка высокого напряжения печного трансформатора подключается к сети переменного тока напряжением 6–35 кВ. В связи с этим и учетом формы стержня магнитопровода трансформатора она выполняется цилиндрической и многослойной, намотанной проводом прямоугольного сечения на бумажно-бакелитовых или стеклотекстолитовых цилиндрах толщиной 6–12 мм. Большое количество клиньев на остове и цилиндре делают обмотку прочной, что, в свою очередь, защищает элементы обмотки от смещения и разрушения при воздействии радиальных сил.

Обмотка низкого напряжения печного трансформатора может выполняться листовой или шинной [8]. Листовые обмотки

изготавливают способом вальцовки в виде цилиндра из листовой меди или алюминия. Конструкция такой обмотки приведена на рисунке 1.6. Как видно из рисунка 1.6, на один стержень помещается одна такая обмотка.

Шинную вторичную обмотку обычно изготавливают расщепленной из медных или алюминиевых шин большого поперечного сечения. При этом на одном стержне магнитопровода размещают от двух до восьми таких расщеплений. Конструкция вторичной обмотки из четырех расщеплений ($G=4$) приведена на рисунке 1.4.

Необходимо отметить, что согласно [8] изоляционные детали обмоток трансформатора выполняют из малоусадочного картона. Обмотки обрабатывают лаком и осуществляют термовакуумную обработку по специальному режиму с дополнительной прессовкой в процессе обработки. Для прочности на них накладывают бандаж из стеклоленты и принимают некоторые другие меры.

Вводы обмотки высокого напряжения выполняются так же, как и у трансформаторов общего назначения. Токи через вводы низкого напряжения могут составлять 15–40 кА при напряжении 129–250 В.

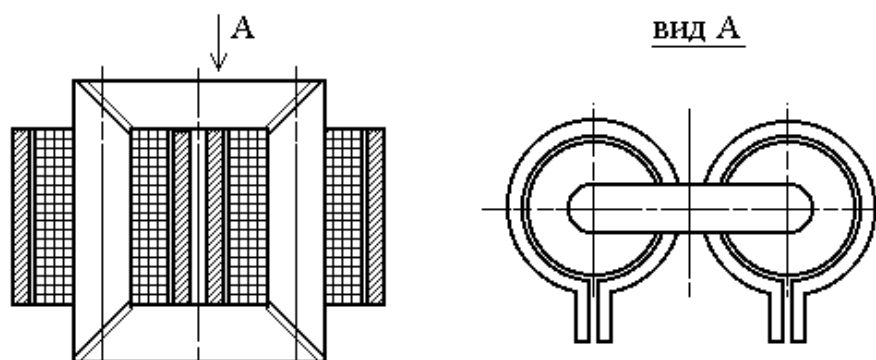


Рисунок 1.6 – Конструкция листовой обмотки

В связи с этим применяют шинные вводы, а при больших токах – трубчатые, поскольку у них в процессе эксплуатации предусмотрено охлаждение водой.

Конструкция шинного ввода показана на рисунке 1.7. В соответствии с [9] шинный ввод – это медная прямоугольная шина 1 толщиной 8–14 мм с припаянной к ней латунной обоймой 2. Эта обойма крепится двумя стальными шпильками 3 к гетинаксовой плите 4. Плиту 4, показанную на рисунке 1.7, которая содержит шинные

ввода и уплотняющие резиновые прокладки, крепят к фланцу 5 крышки 6 бака трансформатора шпильками 7. При этом количество шинных вводов равняется удвоенному количеству витков шинной обмотки [9].

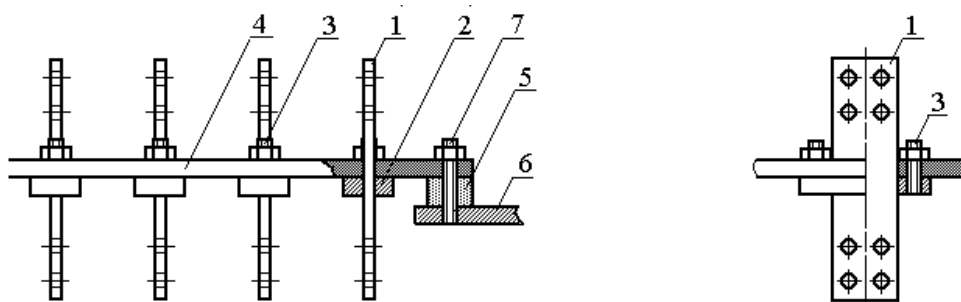


Рисунок 1.7 – Шинный ввод и его крепление на крышке бака трансформатора

1.3 Конструкционные особенности коротких сетей

Короткая сеть является важным элементом комплекса «рудотермическая печь». Этим элементом называют совокупность проводников, соединяющих печной трансформатор с электродами. Сюда входит также система изоляции, охлаждения и крепления этих проводников. Короткая сеть состоит из компенсаторов, шинного пакета, гибких связей, а также системы башмаков, контактной щеки и электродов. Пример схемы короткой сети с группой однофазных трансформаторов приведен на рисунке 1.8, где 1 – печной трансформатор в камере; 2 – компенсатор; 3 – шинный пакет; 4 – система башмаков и контактной щеки; 5 – гибкие связи; 6 – электроды; 7 – рудотермическая печь.

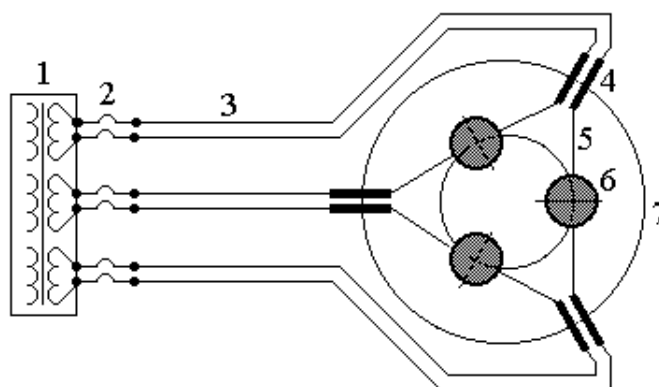


Рисунок 1.8 – Схема несимметричной короткой сети трехэлектродной, круглой рудотермической печи

Вариантов конфигураций коротких сетей рудотермических печей – множество [4]. Существуют схемы коротких сетей для печей малой, средней и большой мощности, для расположения в вертикальной и горизонтальной плоскости, для круглых и прямоугольных трехэлектродных и шестиэлектродных печей и так далее. На сегодняшний день не существует установленных норм и правил по выбору определенного типа печи или схемы короткой сети. Однако наибольшее распространение получили круглые трехэлектродные печи, оснащенные короткими сетями со схемой соединения «треугольник на электродах». В свою очередь в данной конфигурации короткой сети целесообразно выделить три основных варианта:

- схема с несимметричной короткой сетью с одним трехфазным трансформатором;
- схема с несимметричной короткой сетью с группой однофазных трансформаторов, представленная на рисунке 1.8;
- схема с симметричной короткой сетью с группой однофазных трансформаторов, представленная на рисунке 1.9.

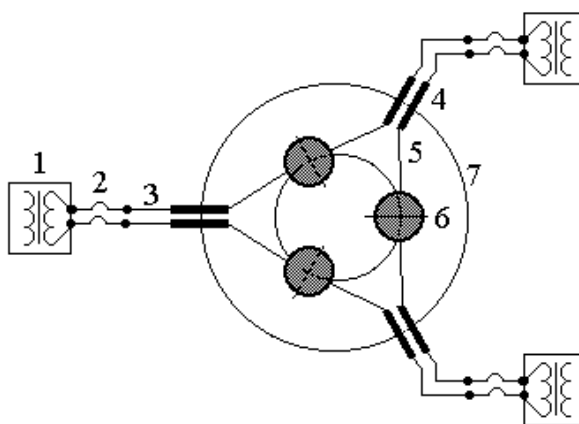


Рисунок 1.9 – Схема симметричной короткой сети трехэлектродной, круглой рудотермической печи

Схема рисунка 1.9 иллюстрирует симметричное расположение однофазных трансформаторов вокруг печи. У такой схемы электрические параметры фаз симметричны и обладают наименьшим реактивным сопротивлением жестких пакетов. Однако при этом требуется прокладка линии высокого напряжения внутри цеха. В то же время камеры трансформаторов занимают значительное место и затрудняют обслуживание печи [10]. Данная схема используется на фосфорных электропечах. Протяженность короткой сети, изображенной на рисунке 1.9, невелика, и электрические повреждения

в ней происходят редко. Поэтому далее эта конфигурация симметричной короткой сети с точки зрения защиты от повреждений не рассматривается.

Чаще всего компенсаторы выполняют в виде гибких медных лент. Они соединяют выводы низшего напряжения электропечного трансформатора с неподвижной частью короткой сети. Неподвижная часть короткой сети представляет собой трубчатый или шинный пакет. Гибкие ленты компенсатора компенсируют изменения линейных размеров проводников неподвижной части короткой сети. Колебания этих линейных размеров возникают при колебании их температуры, что позволяет ликвидировать механические нагрузки на систему уплотнений выводов низшего напряжения электропечного трансформатора [6]. Таким образом, компенсаторы выполняют две основные функции [6]:

1) облегчают установку шин или труб пакета жесткого участка токопровода, учитывая наличие погрешностей проектных размеров при изготовлении;

2) разгрузка выводов трансформатора от дополнительных механических нагрузок, которые возникают в результате термических расширений жесткого участка токопровода в эксплуатационном режиме печи.

Самой длинной и самой напряженной неподвижной частью короткой сети рудотермических электропечей является шинный пакет [6].

В связи с тем, что наибольшая повреждаемость происходит на этом участке, рассмотреть эту часть короткой сети следует более подробно. Шинный пакет выполняют в виде пакета из плоских шин или трубошин. Пример схемы соединения печного трансформатора и электродов печи посредством трубошин приведен на рисунке 1.10.

На этом рисунке 1.10 обмотки трансформаторов обозначены следующим образом:

- $w_{вн}$ – обмотка высокого напряжения главного трансформатора;

- $w_{ор}$ – обмотка регулирования главного трансформатора с пятнадцатью отводами;

- $w_{нн1}$ и $w_{нн2}$ – расщепленные обмотки низкого напряжения главного трансформатора;

- $w_{вд}$ – обмотка высокого напряжения вольтодобавочного трансформатора;

- $w_{вдн1}$ и $w_{вдн2}$ – расщепленные обмотки низкого напряжения вольтодобавочного трансформатора.

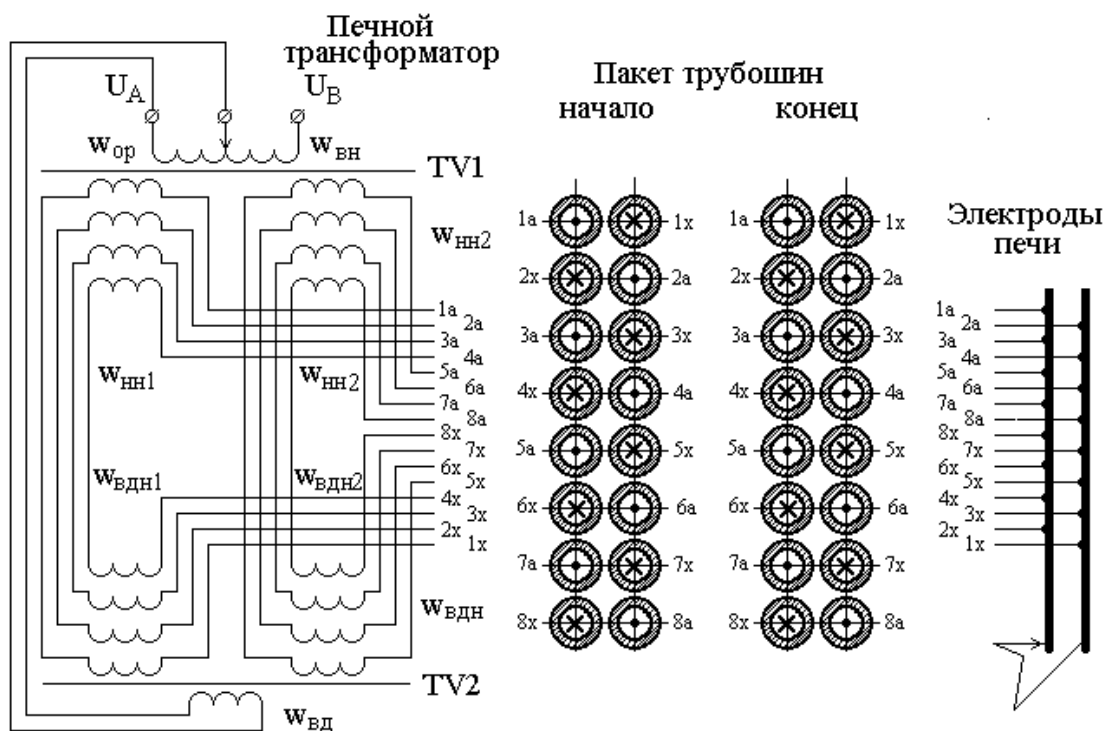


Рисунок 1.10 – Схема соединения печного трансформатора и электродов печи посредством трубошин

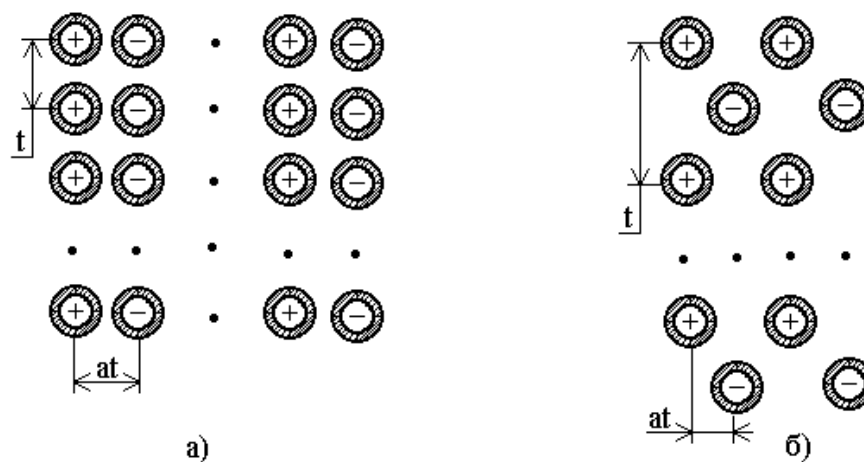
Как правило, шинный пакет из прямоугольных шин имеет естественное охлаждение, а пакет из трубошин охлаждается водой. При такой его конструкции шинный пакет имеет малое активное сопротивление и значительное реактивное. Что в основном и определяет КПД и электрические характеристики комплекса «рудотермическая печь». Большое реактивное сопротивление шинного пакета, а, следовательно, и короткой сети в целом, определяет рост падения напряжения между питающими трансформаторами и печью. Что, несомненно, приводит к росту перегрузки сети и необходимости компенсации большой реактивной мощности. В связи с этим возникает необходимость использования таких конструкций шинных пакетов, которые позволяют снизить величину индуктивного сопротивления [11].

Известно, что трубошины в отличие от прямоугольных шин обладают повышенной индуктивностью. Несмотря на это они пользуются большей популярностью из-за возможности

использования водяного охлаждения. Что позволяет использовать рудотермические печи большой мощности.

Изготавливают эти шинные пакеты в основном из меди. Были попытки применения трубошин из алюминиевого сплава. Однако такие конструкции не получили широкого применения в связи сложностью их изготовления.

В схемах «треугольник на электродах», приведенных на рисунках 1.8 и 1.9, коммутация проводников короткой сети осуществляется на электродах. При этом токи в проводниках короткой сети имеют противоположные направления. Такое расположение проводников в шинном пакете называется бифилярным и в значительной мере компенсирует магнитные потоки и существенно снижает реактивное сопротивление короткой сети. Практически бифиляции проводников добиваются путем определенного расположения их в шинном пакете. На рисунке 1.11 приведено несколько вариантов такого расположения проводников.



а – шинный пакет коридорного типа; б – шинный пакет шахматного типа

Рисунок 1.11 – Варианты перешихтовки трубчатых пакетов для схем короткой сети «треугольник на электродах»

Конструкция шинного пакета, как правило, определяется [10]:

- внешним диаметром и толщиной стенки трубчатого проводника,
- методом их размещения;
- расстоянием между осями проводников в горизонтальной плоскости t и между осями трубошин в вертикальной плоскости at ;

- количеством проводников в горизонтальных и вертикальных рядах;

- длиной фаз шинного пакета l_1, l_2, l_3 .

В таблице 1.1 приведены конструктивные данные некоторых типов шинных пакетов, применяемых в рудотермических печах [10].

Таблица 1.1 – Конструктивные данные коротких сетей рудотермических печей с трубчатыми проводниками

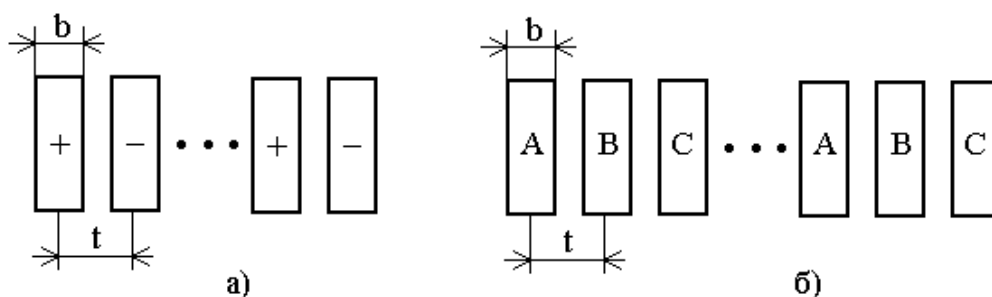
Тип печной установки	Количество, сечение на полюс-фазу, мм	Шинный пакет				
		l_1	l_2	l_3	t	at
РПО-11,0	8(Ø50×10)	5000	4300	5000	110	135
РКО-11,5	4(Ø50×10)	14000	21000	21000	80	60
РПЗ-63,0/у	16(Ø60×10)	12400	12400	12400	85	85
РКЗ-75,0/уп	12(Ø75×10)	16200	9000	16200	110	95
РКЗ-80,0/у	16(Ø60×10)	22040	10780	22040	80	80
РПЗ-80,0/у	20(Ø80×10)	18600	18200	18600	100	105
РПО-10,0 к	8(Ø50×10)	7800	5400	7800	70	70
РПО-15,0 к	8(Ø50×10)	7800	5400	7800	70	70
РПО-40,0 к	20(Ø50×10)	12400	10000	7600	110	37,5
РПО-40,0 к	12(Ø50×10)	12100	10900	13300	220	37,5
РПО-60,0 к	20(Ø50×10)	12400	10000	7600	110	37,5
РКЗ-80,0 к/у	16(Ø60×10)	20500	10500	20500	120	47,5
РКЗ-48,0 ф	8(Ø60×10)	4600	4500	4600	80	80
РКЗ-50,0 ф	6(Ø60×10)	4000	4000	4000	90	70
РКО-16,5 эк	6(Ø50×10)	12500	5500	12500	110	37,5

По условиям изоляции расстояние между трубами в шинном пакете должно быть не менее 25 мм [10]. При этом трубы разной полярности могут располагаться в коридорном или шахматном порядке.

Конструкция шинного пакета коридорного типа показана на рисунке 1.11,а. Она более дешева и проста в исполнении. Конструкция с шахматным расположением трубошин показана на рисунке 1.11,б. Она сложнее в изготовлении и дороже, но имеет более низкое индуктивное сопротивление. Несмотря на преимущества шахматного расположения, на практике чаще применяется коридорное расположение труб.

Наибольшее применение получили двухрядные и четырехрядные бифилярные пакеты коридорного типа. Согласно [6] четырехрядный пакет имеет чередующиеся ряды труб разной полярности или два средних ряда одной полярности. Первый и второй варианты пакетов равнозначны, а их выбор зависит от удобства присоединения труб пакета к смежным элементам токопровода.

Прямоугольные шинные пакеты имеют естественное охлаждение. Поэтому их применяют только в условиях несущественного тепловыделения токопровода рудотермической печи [6]. Возможные варианты перешихтовки прямоугольного шинного пакета для соединения «треугольник на электродах» показаны на рисунках 1.12,а и 1.12,б. Перешихтовка прямоугольных шин подразумевает чередование проводников разной полярности как на рисунке 1.12,а, или полуфаз как на рисунке 1.12,б.



а – чередование проводников разной полярности; б – чередование полуфаз

Рисунок 1.12 – Конфигурации сечений шинного пакета

Упрощенное изображение элемента короткой сети представлено на рисунке 1.13.

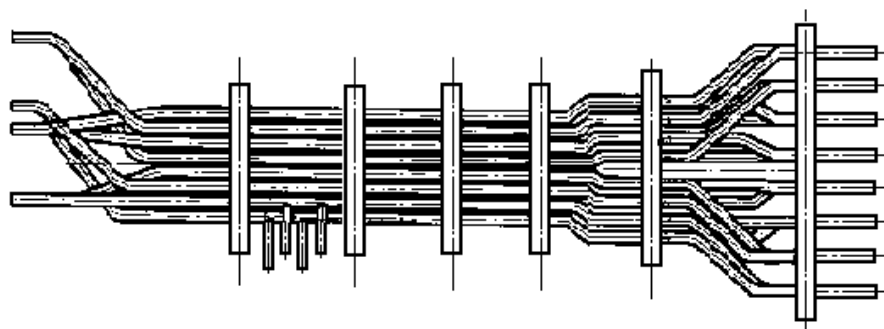


Рисунок 1.13 – Элемент короткой сети

Шинный пакет короткой сети к электродам рудотермической печи присоединяется с помощью пакета гибких связей, системы башмаков и контактных щек.

Неподвижные башмаки связывают шинный пакет с пакетом гибких связей и передают ток от проводников шинного пакета к гибким проводникам короткой сети. Выполняются неподвижные башмаки из медных шин с естественным охлаждением или из медных досок с водяным охлаждением [6].

Пакет гибких связей в виде голых кабелей с водяным охлаждением или гибких лент с естественным охлаждением связывает неподвижный башмак с подвижным башмаком. В случаях малой нагрузки для этих целей могут использоваться изолированные кабели с естественным охлаждением. Просты в изготовлении и надежны в эксплуатации голые медные кабели [6]. Следует добавить, что на гибких связях иногда могут устанавливаться закоротки.

Подвижный башмак передает ток от пакета гибких связей к электрододержателю. Затем он через контактные щęki электрододержателей передается к электродам.

1.4 Сопротивления короткой сети комплекса

Так как именно с помощью короткой сети в комплексе «рудотермическая печь» осуществляется передача электрической энергии от печного трансформатора к электродам печи, то именно ее электрические параметры в значительной мере влияют на ее технико-экономические показатели. Особую роль в этом играет величина активного и реактивного сопротивлений шинного пакета.

Очевидно, для определения сопротивлений шинного пакета из группы шин большого сечения с большими значениями тока в них потребуются специальные методы. В настоящее время известно довольно большое число методов определения сопротивлений короткой сети. Их условно можно разделить на расчетные и экспериментальные методы, а также методы физического моделирования.

В соответствии с [6] рассчитать активные сопротивления шинного пакета короткой сети не сложно. Значительно труднее рассчитать его индуктивное сопротивление, которое определено не только конфигурацией шинного пакета и расположением шин в нем, но и размещением металлических элементов конструкции печи вокруг этого пакета, которые в значительной степени искажают распределение магнитного поля токов в этих шинах. В соответствии с [12; 13] для всех расчетных методов используются допущения:

- при расчете считается, что ток номинальный и чисто синусоидальный;
- распределение тока в шине равномерно по ее сечению;
- для учета влияния ферромагнитных конструкций на реактивное сопротивление используется дополнительный коэффициент;
- проводники выполняются из алюминия или меди, а их магнитную проницаемость принимают равной магнитной проницаемости вакуума.

При вычислении активных и реактивных сопротивлений используется следующий порядок действий [6; 13]:

- для упрощения короткая сеть разбивается на участки, подвергаемые расчету;
- составляется расчетная схема с указанием всех геометрических размеров и количества проводников в пакете;
- составляется электрическая схема замещения, приведенная ко вторичному напряжению трансформатора;
- рассчитываются все активные и индуктивные сопротивления схемы замещения, включая контактные;
- путем преобразования схемы замещения определяются фазные активные и индуктивные сопротивления;
- определяются сопротивления всех трех фаз и степень асимметрии.

В классическом расчетном методе, применяемом в основном до 1960 годов, по формулам Максвелла определяется собственная индуктивность каждого проводника короткой сети и взаимная индуктивность данного проводника со всеми другими проводниками [6; 14]. В связи с большим числом собственных и взаимных индуктивностей классический метод расчета реактивных сопротивлений является очень трудоемким. В настоящее время классический метод определения не применяется.

Следующий метод обобщающих выражений, рассмотренный впервые в [15], основывается на формулах Максвелла, затем выводятся обобщенные выражения, позволяющие рассчитать индуктивность отдельных участков. Полученные обобщенные выражения для различных схем и конфигураций коротких сетей упрощают определение реактивных сопротивлений коротких сетей. На их основе созданы таблицы и нормалы для расчета их реактивных сопротивлений, которые представлены в [6]. Использование обобщенных формул, таблиц и нормалей позволяет относительно просто и быстро рассчитать несколько вариантов коротких сетей. Данный метод имеет недостатки, среди которых можно выделить [6]:

- обобщенные выражения и полученные на их основе таблицы и нормали рационально применять для тех конструкций коротких сетей, для которых эти данные были получены. А расчет параметров коротких сетей других конструкций требует вывода новых обобщенных формул, а также составления новых таблиц и нормалей;
- временные затраты, обусловленные необходимостью ручного счета.

Также для определения реактивных сопротивлений применяют ЭВМ. Этот способ заметно ускоряет расчеты и делает их более точными. Высокая точность расчетов объясняется тем, что программа вычисляет не только собственные и взаимные индуктивности, но и учитывает сдвиг фаз и направления тока в отдельных проводниках [6]. Данный метод имеет определенные недостатки:

- необходимость написания индивидуальной программы для каждой новой конструкции короткой сети;
- отсутствие сборника необходимых программ.

Определение сопротивлений осложняется близким расположением параллельных проводников с токами с разными сдвигами фаз. Иногда удается получить аналитические выражения для индуктивностей с учетом конкретной формы поперечного сечения проводников. Форма поперечного сечения также учитывается при расчете собственных индуктивностей, а также при определении взаимных индуктивностей параллельных проводников одинаковой длины. В более сложных случаях реальные проводники заменяются линиями тока, проведенными через центры их сечений [13].

Взаимная индуктивность двух линейных контуров l_1 и l_2 , обтекаемых токами i_1 и i_2 , определяется следующим образом:

$$M = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{l_1} \int_{l_2} \frac{dl_1 \cdot dl_2}{l}, \quad (1.1)$$

где dl_1 и dl_2 – элементы длины контуров l_1 и l_2 ;

l – расстояние между ними;

μ_0 – магнитная проницаемость вакуума.

Собственная индуктивность контура считается аналогичным образом, но в этом случае r представляет собой расстояние между трубками тока в контуре.

Расчет активного сопротивления производится с учетом увеличения сопротивлений из-за поверхностного эффекта, эффекта

близости и неравномерного распределения токов по параллельным проводникам в пакете. Поправочный коэффициент, принятый для всего токоподвода, учитывает влияние близко расположенных металлических конструкций. Активное сопротивление любого одиночного проводника определяется как:

$$R_i = K_d \cdot R_0, \quad (1.2)$$

где $K_d = K_n \cdot K_{\delta ik}$ – коэффициент добавочных потерь;

K_n – коэффициент поверхностного эффекта;

$K_{\delta ik}$ – коэффициент близости;

R_0 – сопротивление проводника постоянному току, Ом.

Эти коэффициенты представлены в [6] и определяются с помощью графиков и таблиц в зависимости от формы поперечного сечения проводников и их количества. Многолетний опыт применения вышеописанного метода расчета активного сопротивления короткой сети доказывает целесообразность его применения.

Точные расчетные методы параметров короткой сети сложны и трудоемки. А использование приближенных расчетных методов составляет погрешность порядка 10–15 %.

Экспериментальные методы основываются на измерениях, осуществляемых на действующих печах. Это позволяет выбрать рациональные электрические и технологические режимы работы этих печей. Точное экспериментальное определение параметров электропечных контуров сопряжено со значительными трудностями из-за сложной конфигурации трехфазных контуров с большими токами. Особые трудности вызывает определение параметров несимметричных рудотермических печей, отнесенных к одной фазе. Вместе с тем для несимметричных печей определение параметров каждой фазы является совершенно обязательным.

В [6] указывается, что задача точного измерения активного сопротивления проводов большого сечения при больших токах даже в лабораторных условиях является непростой задачей. В связи с тем, что удельные активные и реактивные сопротивления в шинных пакетах составляют порядка 10^{-4} – 10^{-5} Ом, для измерений следует использовать очень чувствительные измерительные приборы. Кроме того, необходимо применять меры, чтобы эти приборы имели хорошую защиту от воздействия сильных магнитных полей. При этом

коммутационные провода при измерениях необходимо располагать так, наводки от мощных магнитных полей были минимальными.

Разработке методов экспериментального определения параметров электропечных контуров в технической литературе посвящено достаточно много публикаций. В них при выборе метода экспериментального определения параметров рудотермических печей рекомендуется учитывать особенности, присущие электрическим параметрам этих печей. Известно, например, что при определении электрических характеристик рудотермических печей решающее значение имеют значения реактивных сопротивлений. Значения же активных сопротивлений, определяющих потери мощности, оказывают значительно меньшее влияние.

При исследовании параметров коротких сетей весьма часто невозможно применять трансформаторы тока либо в виду их отсутствия на токи более 20000 А, либо в виду невозможности их использования по конструктивным соображениям. Например, при определении распределения тока по отдельным проводникам шинных или трубчатых пакетов. В таких случаях весьма удобным оказывается применение магнитного пояса Роговского. Его принцип действия основан на законе полного тока. При охвате магнитным поясом проводника с током I в нем наводится ЭДС, действующее значение которой прямо пропорционально току:

$$E = -2\pi fSWI, \quad (1.3)$$

где W – число витков на длине 1 см, строго постоянное по всей длине;

S – сечение витка, см²;

f – частота тока, Гц.

Следует добавить, что точность измерения магнитным поясом повышается с уменьшением S и увеличением W . При этом магнитный пояс не реагирует на магнитные поля расположенных рядом проводников с током, а результаты измерения не зависят от формы контура магнитного пояса. Магнитные пояса могут быть изготовлены в лабораторных и производственных условиях.

Измерительная схема для экспериментального определения электрических параметров действующих электропечных установок приведена на рисунке 1.14. При реализации этой схемы измерения измерительные контуры следует располагать таким образом, чтобы наводки на них были наименьшими [6]. Как правило, исключить эти

наводки практически полностью невозможно. При этом трудности исключения наводок заключаются в следующем:

1. Экранирование измерительных проводов не дает эффективных результатов. Специально поставленные эксперименты по экранированию измерительных проводов с помощью однослойных и многослойных экранов из различных материалов привели к снижению наводимых ЭДС лишь на 10–12 %.

2. Вследствие сложных конфигураций короткой сети не представляется возможным расположить измерительные провода цепей напряжения таким образом, чтобы они оказались перпендикулярными всем ее участкам.

3. Нельзя выделить и измерить в проводниках цепей напряжения, наводимые ЭДС.

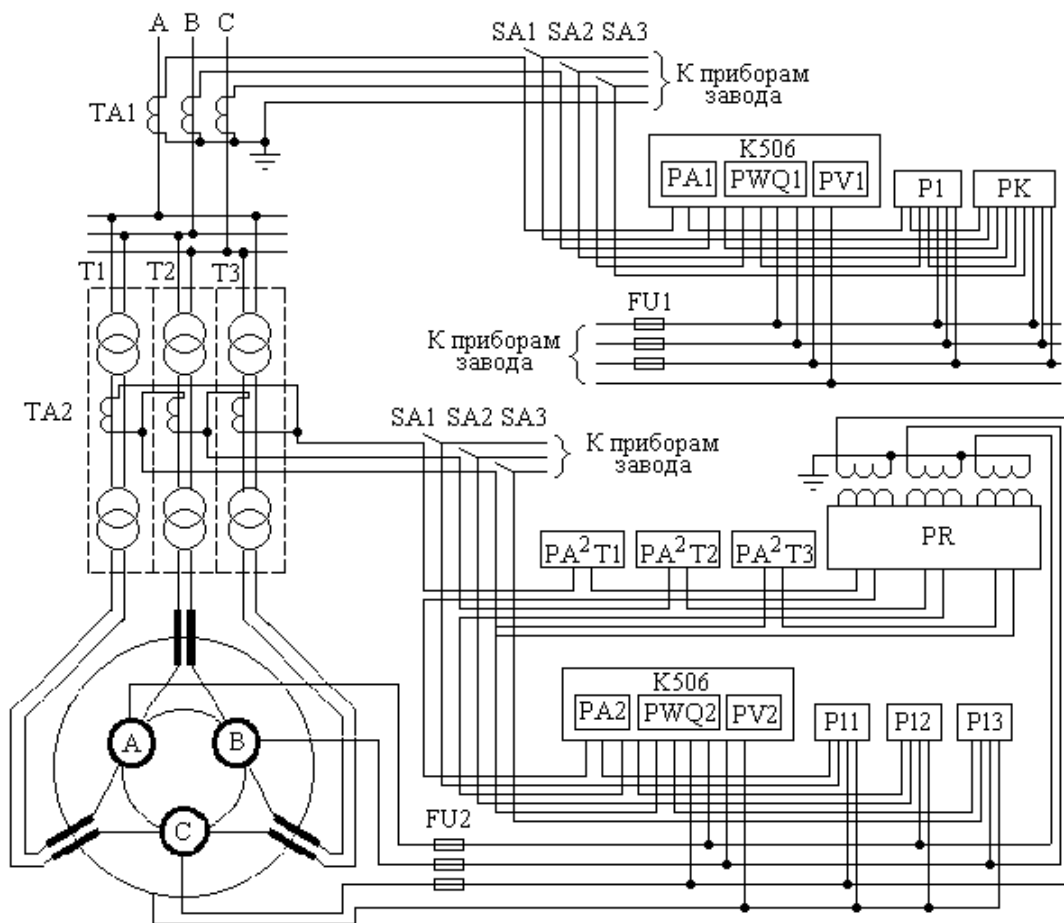


Рисунок 1.14 – Схема включения измерительных приборов

Приведенная на рисунке 1.14 схема включения измерительных приборов позволяет измерить [6]:

- 1) токи в электродах;
- 2) суммарную активную и реактивную мощности со стороны высшего напряжения трансформатора и на ванне печи;
- 3) средний ток каждого электрода за некоторый промежуток времени при помощи электросчетчиков (A^2h), измеряющих произведение квадрата тока на время;
- 4) расход активной и реактивной энергии за тот же промежуток времени со стороны высшего напряжения печного трансформатора и на ванне печи;
- 5) напряжение измеряемого участка с помощью магнитного пояса и детекторного вольтметра с малым потреблением типа Ц-56 [6].

Для уменьшения влияния электромагнитных полей на показания измерительных приборов последние должны располагаться достаточно далеко от печей. Электромагнитные поля фазных токов печи наводят в измерительных проводах электродвижущую силу. ЭДС, наводимые на измерительные провода цепей напряжения, при неудачном расположении последних могут достигать значений, соизмеримых с исследуемыми напряжениями, что может вызвать значительную ошибку в определении параметров фаз короткой сети. Вследствие сложной конфигурации короткой сети не представляется возможным расположить измерительные провода цепей напряжения так, чтобы они оказались перпендикулярными всем ее участкам. При определении параметров по участкам короткой сети измерительные контуры должны располагаться таким образом, чтобы наводимая ЭДС была наименьшей.

С помощью этой схемы, например, легко реализуется метод определения сопротивлений короткой сети на действующем производстве, который называют метод короткого замыкания [6]. Точность метода короткого замыкания печи при соответствующих рабочих напряжениях составляет ± 5 .

Иногда для определения активных (r) и реактивных (x) сопротивлений короткой сети по участкам используют метод, при котором измеряется падение напряжения (ΔU) на участке, ток (I) и угол сдвига фаз между ними (φ). Расчет производится по формулам (1.4):

$$x = \Delta U \sin \varphi / I \text{ и } r = \Delta U \cos \varphi / I. \quad (1.4)$$

В связи с тем, что измерение параметров по отдельным участкам затруднено из-за значительных наводок на измерительный контур, расчеты которых очень громоздки, распределение реактивных

сопротивлений по участкам короткой сети часто удобнее производить расчетным путем.

Более точно определить параметры коротких сетей можно на физических моделях в лабораторных условиях. Однако этот метод подходит для определения электрических параметров новых печных установок, которые только разрабатываются. При проектировке печной установки разрабатывают геометрическую модель короткой сети [6]. Экспериментальным путем при помощи этой модели рассчитывают реактивные и активные сопротивления короткой сети. Преимуществом данного метода является соблюдение подобия электромагнитных полей, что, в свою очередь, обеспечивает подобие электрических явлений в сходственных точках. При создании модели используются те же материалы, что и у оригиналов.

Согласно [6] в качестве источников питания моделей применяются вращающиеся трехфазные преобразователи с током частотой 400-500 Гц. Между моделью и источником питания устанавливается понижающий трансформатор с первичным напряжением 380/220 В и со вторичным 10–20 В [6]. Также в качестве источника питания могут использоваться однофазные преобразователи, однако этот метод дает удовлетворительную точность лишь для симметричных схем короткой сети.

Определение сопротивлений при помощи модели тождественно определению сопротивлений на оригинальной короткой сети. Однако применение физических моделей обуславливает необходимость выбора приборов с необходимой точностью при токах повышенной частоты. Например, часто определение тока осуществляется с помощью трансформаторов тока типа УТТ-6М2 с классом точности 0,2 или катушек высоковольтных трансформаторов типа ТШВ-15Р/0,5 с классом точности 0,5 [6]. Эмпирическим путем была вычислена погрешность работы данных трансформаторов, которая не выходит за пределы класса точности 0,5–1,0.

Измерение тока вторичной стороны трансформаторов тока реализуется на электромагнитном амперметре типа Э-526 с классом точности 0,5. Падение напряжения на участках фаз моделей составляет 0,2–2,5 В и измеряется вольтметром типа Э-531 с классом точности 0,5.

По измеренным значениям фазного тока I_{ϕ} , падения напряжения $U_{\phi,к.с}$ и активной мощности $P_{\phi,к.с}$ производится расчет для каждой фазы короткой сети:

- общее сопротивление:

$$Z_{\text{ф.к.с.}} = U_{\text{ф.к.с.}} / I_{\text{ф}}, \quad (1.5)$$

- активное сопротивление:

$$r_{\text{ф.к.с.}} = P_{\text{ф.к.с.}} / I_{\text{ф}}^2, \quad (1.6)$$

- реактивное сопротивление:

$$X_{\text{ф.к.с.}} = \sqrt{Z_{\text{ф.к.с.}}^2 - r_{\text{ф.к.с.}}^2}, \quad (1.7)$$

- коэффициент мощности:

$$\cos \varphi = r_{\text{ф.к.с.}} / Z_{\text{ф.к.с.}}. \quad (1.8)$$

Погрешности измерительных приборов при расчете величин активного и реактивного сопротивлений не превышают $\pm 5-8\%$ [6]. Точность метода физического моделирования является достаточной, поскольку она позволяет правильно решать инженерные задачи, возникающие при проектировании коротких сетей большой мощности.

Рассмотренные выше методы определения сопротивлений короткой сети имеют свои особенности и недостатки, однако необходимо отметить, что погрешность этих методов является допустимой. Наряду с этим, при использовании перечисленных методов, сделано допущение, что по короткой сети течет синусоидальный ток промышленной частоты. На практике в разные периоды плавки ток может обладать несинусоидальностью, что воздействует на электрические характеристики рудотермических печей.

1.5 Токи в нормальных и аварийных режимах работы комплекса

Известно, что в процессе эксплуатации комплекса «рудотермическая печь», основная масса электрических повреждений приходится на печной трансформатор и короткую сеть. Однако построение их защит невозможно без оценки токов в них в нормальном, аномальном и аварийном режимах работы этого комплекса.

Классификация режимов работы комплекса «рудотермическая печь» приведена на рисунке 1.15. Силовые трансформаторы в комплексе «рудотермическая печь» являются одним из основных и дорогостоящих элементов. В зависимости от величины сопротивления нагрузки, напряжения на обмотках, температуры масла, обмоток, условий окружающей среды и других параметров различают режимы работы трансформатора, представленные на рисунке 1.15.



Рисунок 1.15 – Режимы работы комплекса «рудотермическая печь»

Нормальными режимами работы трансформатора считаются режимы, когда при номинальном напряжении и нагрузке, не превышающей номинальную, ток в обмотках трансформатора не превышает номинальный. В таких режимах трансформатор может проработать весь гарантированный заводом-изготовителем срок службы. При этом ток в обмотках трансформатора может колебаться от тока I_{xx} холостого хода до тока $I_{ном}$ номинальной нагрузки [16].

Аномальные режимы работы трансформатора часто характеризуются появлением токов в его обмотках, превышающих номинальные. Такие токи обычно возникают при перегрузках, перенапряжениях, КЗ за трансформатором и при включении трансформатора в сеть.

Перегрузки трансформатора, как правило, разделяют на перегрузки определяемые графиком нагрузок и аварийные

перегрузки. Аварийные перегрузки вызываются, например, внезапным отключением параллельно работавшего трансформатора [17].

В соответствии с инструкцией по эксплуатации каждого трансформатора определяются его длительные допустимые перегрузки. Например, у масляных трансформаторов длительная перегрузка составляет 5 %. В тоже время по [18] в аварийных режимах допускается кратковременная перегрузка, значения которой представлены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Кратность перегрузки трансформатора

Кратность перегрузки $I_{\text{наг}} / I_{\text{ном}}$	1,3	1,6	1,75	2	3
Допустимое время перегрузки $t_{\text{доп}}$, мин	120	45	20	10	1,5

Согласно [19] режим перевозбуждения трансформатора возникает в результате повышения напряжения питания или понижения частоты сети. В этом режиме возрастает магнитная индукция в магнитопроводе, а также намагничивающий ток трансформатора и вихревые токи. Что может привести к нагреву обмоток и сердечника, а затем и к повреждению изоляции обмоток и «пожару в стали».

Короткое замыкание за трансформатором возникает при КЗ на шинах вторичной обмотки. При КЗ за трансформатором по его обмоткам протекают токи, многократно превышающие номинальные токи [18]. Эти токи достаточно быстро нагревают обмотки трансформатора и могут привести к их повреждению в виде КЗ в обмотках и смещения обмоток.

Как известно [18], при включении печного трансформатора в сеть в его первичной обмотке возникает резкий бросок тока $I_{\text{нам}}$ намагничивания. Этот ток носит затухающий характер и изменяется так, как это показано на рисунке 1.16. Максимальное значение этого тока может в 6–8 [17] раз превышать номинальный ток трансформатора.

Скачок тока намагничивания объясняется насыщением магнитопровода трансформатора из-за того, что в момент включения печного трансформатора в сеть магнитный поток в сердечнике трансформатора устанавливается не сразу.

Основные аварийные режимы в однофазных печных трансформаторах на рудотермическом производстве обусловлены особенностями их конструкций и размещения, а также условиями

эксплуатации. Эти режимы работы печного однофазного трансформатора возникают в результате витковых замыканий в первичной обмотке, однофазного и двухфазного замыкания на корпус, а также при обрыве одного из расщеплений вторичной обмотки и при КЗ в нем.

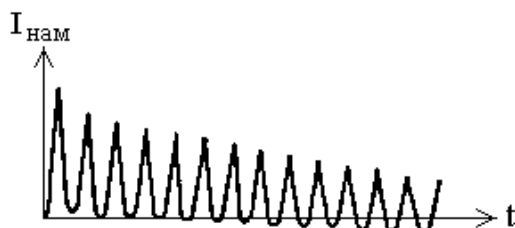


Рисунок 1.16 – Изменение тока намагничивания в зависимости от времени

Витковое замыкание обычно возникает в результате разрушения витковой изоляции из-за ее старения в результате длительных перегрузок при недостаточном охлаждении, а также из-за механических повреждений, возникающих в основном по причине деформации обмоток при внешних КЗ [20]. При замыкании малого числа витков возникает небольшое увеличение фазного тока и многократное увеличение тока в замкнувшихся витках по сравнению с его номинальным значением.

Как правило, однофазные печные трансформаторы на рудотермическом производстве подключаются к кабельной сети 6–10 кВ с изолированной или компенсированной нейтралью. В таких сетях в соответствии с ПУЭ [3] при однофазном замыкании на землю допускается эксплуатация этой сети в течении двух часов.

Если нейтраль сети компенсирована, то ток однофазного замыкания на корпус (ОЗК) не превышает 2–5 А и не представляют опасности. Основная опасность при работе сети в таком режиме заключается в том, что неповрежденные фазы оказываются под напряжением $\sqrt{3} U_{\text{н}}$ по отношению к земле. Что негативно сказывается на состоянии их изоляции и может вызвать их замыкание на землю. В этом случае ОЗК переходит в междуфазное КЗ.

Если нейтраль сети изолированная, то токи ОЗК могут достигать десятков ампер. В связи с этим при использовании вакуумных выключателей появляется опасность возникновения коммутационных перенапряжений, величина которых может составлять $5 - 7 U_{\text{н}}$. А, следовательно, резко возрастает вероятность возникновения ОЗК с

автоматическим переходом однофазного замыкания в междуфазное КЗ и повреждением печных трансформаторов.

Короткая сеть также является важным и дорогостоящим элементом комплекса «рудотермическая печь», с помощью которого соединяется печной трансформатор с электродами.

Если в однофазном трансформаторе во вторичной обмотке число расщеплений принять равным четырем ($G = 4$), то при электрических повреждениях в одном из расщеплений вторичной обмотки ему будет соответствовать схема, приведенная на рисунке 1.17, где \dot{U}_1 – напряжение на первичной обмотке; \dot{I}_i – токи в обмотках; R_i и X_i – активные индуктивные сопротивления в обмотках; $Z_{iл}$ и Z_H – полное сопротивление короткой сети и нагрузки. При этом для первичной обмотки принимается $i=1$, а для расщеплений вторичной обмотки $i = 2 - 5$.

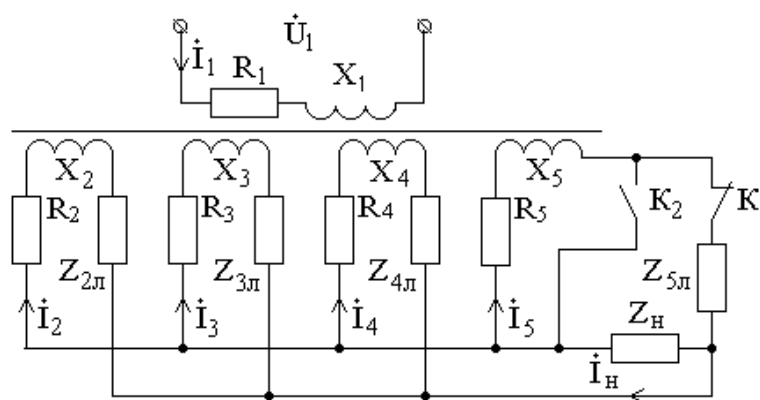


Рисунок 1.17 – Схема электрических повреждений в одном из расщеплений вторичной обмотки однофазного печного трансформатора

В соответствии с рисунком 1.17 нормальный режим работы короткой сети характеризуется тем, что токи $I_2 - I_5$ в расщеплениях вторичной обмотки равны между собой и не превышают их максимально допустимые значения для этого типа комплекса.

Обрыв в одном из расщеплений вторичной обмотки может возникнуть из-за:

- некачественной пайки отдельных элементов короткой сети;
- отгорания внутренних резьбовых соединений и выводных концов вторичной обмотки вследствие ослабления креплений в процессе эксплуатации;

- разрывов гибких связей из-за многочисленных перемещений электродов в процессе эксплуатации.

Имитация разрыва цепи четвертого расщепления вторичной обмотки на рисунке 1.17 осуществляется размыканием ключа K_1 . В результате ток \dot{I}_5 в расщеплении становится равным нулю, а ток I_H уменьшится на 25 %. Что приводит к недогреву в рудотермической печи и необходимости с помощью РПН повышать токи $\dot{I}_2 - \dot{I}_4$ в неповрежденных расщеплениях.

Режим короткого замыкания в шинном пакете короткой сети, как правило, возникает из-за повреждения изоляции трубошин под воздействием окружающей среды. Имитация короткого замыкания в цепи расщепления вторичной обмотки на рисунке 1.17 осуществляется замыканием ключа K_2 . В результате ток \dot{I}_5 в расщеплении резко возрастает. Очевидно, наибольшей величины ток короткого замыкания достигнет при замыкании на выводах в области компенсатора. Если известен ток в расщеплении до возникновения короткого замыкания, то ориентировочно этот ток при коротком замыкании можно рассчитать как:

$$\dot{I}_{5к} = \dot{I}_5 (Z_5 + Z_{л} + Z_H) / Z_5. \quad (1.9)$$

С учетом того, что сумма $(Z_5 + Z_{л} + Z_H)$ значительно больше Z_5 , есть все основания полагать, что при КЗ на выводах обмотки поврежденного расщепления ток возрастает в десятки раз.

1.6 Релейная защита комплекса

Релейная защита комплекса «рудотермическая печь» строится с учетом классификации режимов работы этого комплекса, приведенной на рисунке 1.15.

В силу того, что однофазный печной трансформатор имеет расщепленную вторичную обмотку с низким входным напряжением и токами порядка 30–150 кА, установка трансформаторов тока в ней не представляется возможной. Поэтому построение релейной защиты печных трансформаторов в значительной степени отличается от построения релейной защиты сетевых трансформаторов. С учетом этого для обеспечения надежной эксплуатации печного трансформатора предусматривается [21]:

- а) защита от КЗ;
- б) защита от ОЗК;

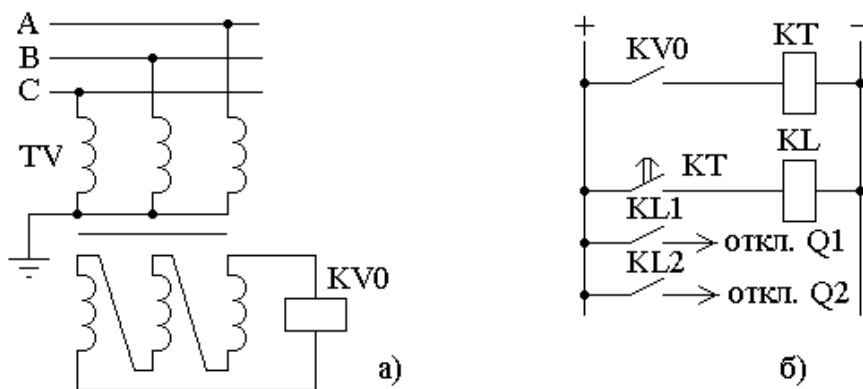
- в) газовая защита;
- д) защита от перегрузок;
- е) защита короткой сети.

При этом к защита́м печного трансформатора предъявляются следующие требования:

- а) отключение трансформатора от сети при его повреждении или прохождении через него сверхтоков;
- б) подача сигнала обслуживающему персоналу при перегрузке трансформатора, понижении уровня масла или при повышении его температуры [21].

В соответствии с разделом 1.1 и [21] при ОЗЗ и ОЗК в кабельной сети токи замыкания на землю невелики, так как определены емкостью линий по отношению к земле. В связи с этим правила технической эксплуатации электрических станций и сетей устройства электроустановок [3] допускают работу с таким видом повреждения в течение двух часов. Этого времени, как правило, оказывается достаточно для определения места повреждения и отключения поврежденного элемента. Появление в сети ОЗЗ или ОЗК определяется с помощью неселективной или селективной сигнализации.

Наиболее простым способом выявления ОЗЗ или ОЗК является использование устройства общей сигнализации без указания поврежденного участка. Вариант схемы такого устройства приведен на рисунке 1.18,а.



а – устройство общей сигнализации без указания поврежденного участка; б – схема оперативных цепей сигнализации

Рисунок 1.18 – Схема неселективной сигнализации

В этой схеме сигнализация имеет одно реле напряжения, которое подключается к фильтру напряжения нулевой последовательности (ФННП). В высоковольтных сетях наибольшее распространение получили фильтры нулевой последовательности, выполняемые на базе измерительных трансформаторов напряжения типа ЗНОМ или НТМИ. Схема оперативных цепей сигнализации приведена на рисунке 1.18,б.

При появлении ОЗЗ сигнализация дает сигнал, а затем дежурный персонал посредством поочередного отключения присоединений определяет поврежденный элемент.

Достоинством неселективной сигнализации от ОЗЗ является простота реализации и способность защитить все присоединения одновременно.

Однако в разветвленной сети с большим количеством присоединений – это устройство не позволяет достаточно быстро отыскать поврежденную линию. В этом случае каждая линия должна иметь индивидуальную селективную сигнализацию от ОЗЗ, как это показано на рисунке 1.19.

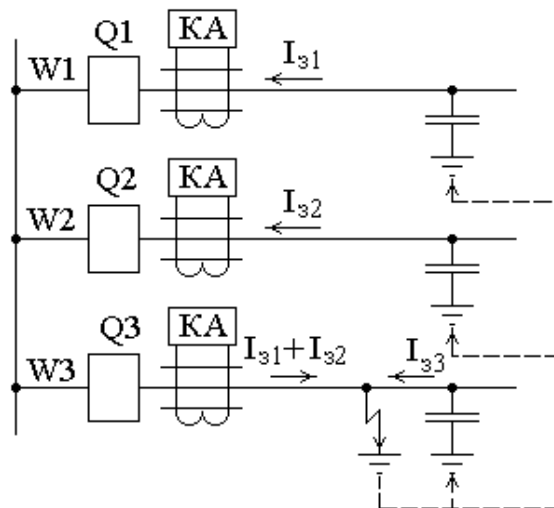


Рисунок 1.19 – Токи ОЗЗ в сети с изолированной нейтралью

Такая сигнализация должна отстраиваться от тока небаланса при максимальном токе нагрузки линии, а также от собственного емкостного тока при ОЗЗ на соседнем присоединении. Так, например, для первой линии на рисунке 1.19 ток срабатывания сигнализации выбирается как:

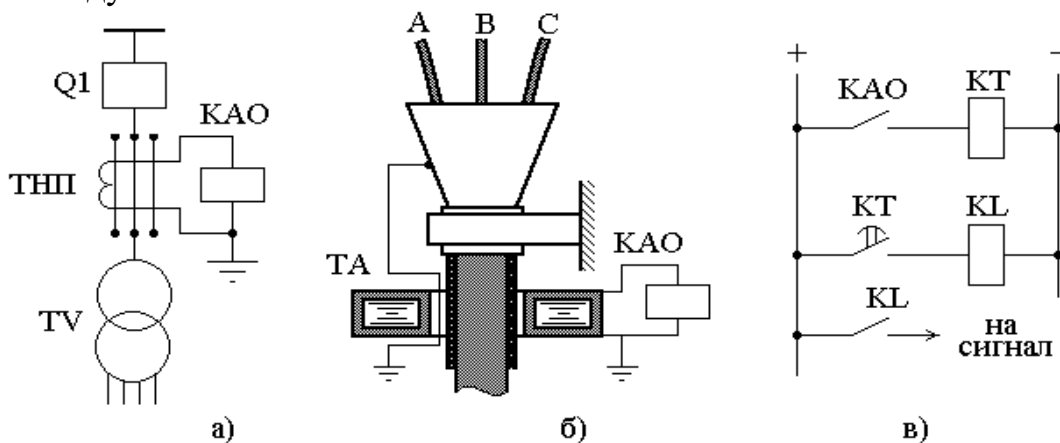
$$I_{c,3} = k_H I_{31} / K_I, \quad (1.10)$$

где $k_H=4-5$ – коэффициент надежности;
 I_{31} – собственный емкостной ток линии.

Следует отметить, что отстройка от собственного емкостного тока, практически всегда обеспечивает отстройку от тока небаланса при максимальном токе нагрузки линии.

Схема токовой сигнализации нулевой последовательности [18] приведена на рисунке 1.20,а. Она реагирует на ток $3I_0$, появляющийся при ОЗЗ. Защита имеет токовое реле КАО, подключенное к токовому фильтру нулевой последовательности $3I_0$ в виде трансформатора тока нулевой последовательности (ТТНП). Конструкция ТТНП и его размещение на кабеле показано на рисунке 1.20б. Схема оперативных цепей приведена на рисунке 1.20,в. Такая сигнализация срабатывает при первичных токах ОЗЗ порядка 3–5А, а при сочетании ТНП со слаботочным реле РТЗ-50 чувствительность защиты можно повысить до 1–2А.

Сигнализация при металлическом замыкании на землю должна иметь коэффициент чувствительности $k_q=1,25$ для кабельных и $k_q=1,5$ для воздушных линий.

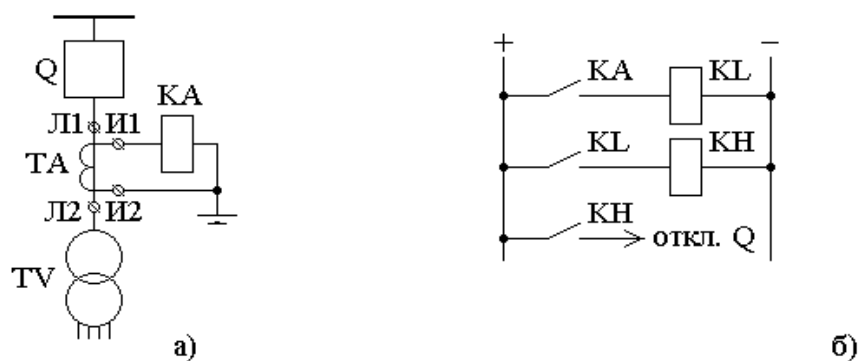


а – схема токовой сигнализации нулевой последовательности; б – конструкция ТТНП и его размещение на кабеле; в – схема оперативных цепей

Рисунок 1.20 – Схема селективной сигнализации

Как известно, рассмотренные технические решения обладают относительной селективностью, что значительно затрудняет определение места повреждения в сложных электрических сетях. Выходом из положения является использование устройства с абсолютной селективностью.

В качестве защиты от междуфазных КЗ в однофазных печных трансформаторах обычно используют токовую отсечку. Это вызвано невозможностью установки на выводах вторичной обмотки или короткой сети трансформаторов тока. Схема токовой отсечки приведена на рисунке 1.21, где КА – реле тока; КЛ и КН – промежуточное и указательное реле; Q – выключатель; YAT – катушка отключения выключателя; TV – печной трансформатор.



а – схема токовой отсечки; б – схема оперативных цепей;

Рисунок 1.21 – Схема мгновенной токовой отсечки

Селективность мгновенной токовой отсечки обеспечивается за счет ограничения зоны ее действия, как это показано на рисунке 1.22.

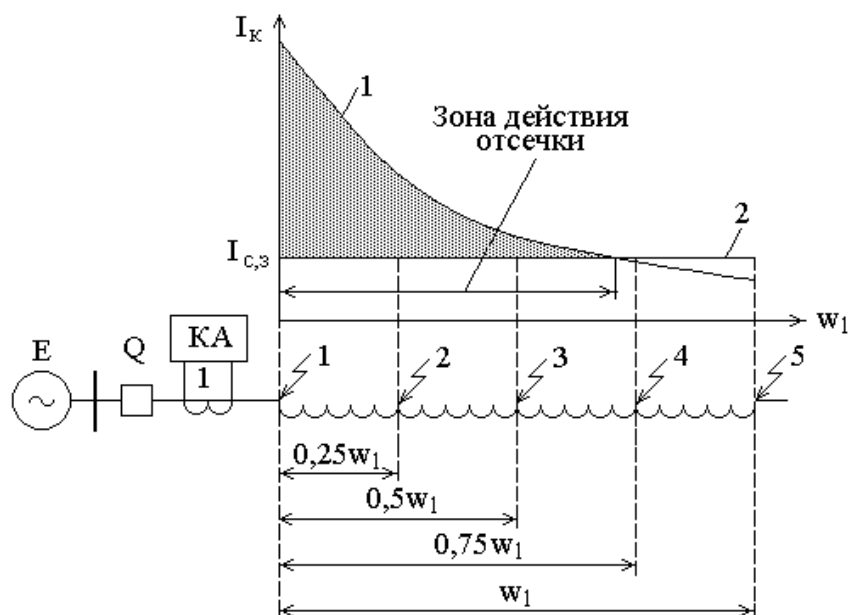


Рисунок 1.22 – Схема для определения зоны действия отсечки печного трансформатора

Для такой отсечки ток срабатывания определяется таким образом, чтобы она не срабатывала при коротком замыкании вне трансформатора:

$$I_{сз} = k_n I_{к,маx}, \quad (1.11)$$

где k_n – коэффициент надежности отстройки. Он равен 1,3–1,4 для реле типа РТ-40 и 1,5–1,6 для реле РТ-80;

$I_{к,маx}$ – максимальный ток, проходящий через трансформатор при КЗ на выводах трансформатора со стороны нагрузки, на чертеже это точка 5.

При этом ток срабатывания реагирующего реле определяется как:

$$I_{с,р} = k_n I_{к,маx} / K_I, \quad (1.12)$$

где K_I – коэффициент трансформации.

Параметром, определяющим чувствительность отсечки, является коэффициент чувствительности, который должен быть не меньше двух [21], который определяется как:

$$k_{ч} = I_{к1} / I_{с,р} / K_I, \quad (1.13)$$

где $I_{к1}$ – ток при коротком замыкании на вводах трансформатора со стороны источника питания.

Из этого становится ясно, что токовая отсечка обладает достаточной чувствительностью к междуфазным КЗ и практически нечувствительна к виковым замыканиям.

Газовая защита предназначена для защиты масляных трансформаторов от электрических повреждений внутри бака, от ВЗ и недопустимого снижения уровня масла [21]. В соответствии с ПУЭ [3] она устанавливается на трансформаторы мощностью более 6300 кВ·А, на трансформаторы мощностью 1000–4000 кВ·А без дифференциальной защиты или отсечки, а также, если их максимальная токовая защита имеет выдержку времени более одной секунды [21].

Работа газовой защиты основана на нагреве элементов

трансформатора в баке, в результате которого происходит разложение масла и выделение газа. Интенсивность и состав газа зависит от вида и масштаба повреждения. В случае медленного газообразования газовая защита подает оперативному персоналу предупредительный сигнал. В случае интенсивного газообразования, возникающего в следствии КЗ или ВЗ, газовая защита отключает трансформатор. Кроме того, газовая защита способна реагировать на критическое снижение уровня масла в баке трансформатора.

Известно большое количество конструкции газовых реле [21]. Конструкция одного из наиболее распространенных типов газового реле типа ПГ-22 [21] имеет верхний сигнальный и нижний отключающий поплавки, а также вращающиеся вокруг оси их подвижные контакты. Подвижные контакты при срабатывании реле, возникающем при опускании поплавков, замыкаются с неподвижными контактами.

В нормальном режиме реле заполнено маслом, верхний поплавок всплывает. При этом его контакт разомкнут. В случае повреждения в трансформаторе происходит медленное образование газа, который поднимается к расширителю и заполняет корпус реле. Уровень масла в корпусе реле понижается, и верхний поплавок начинает опускаться. Он поворачивается на оси и замыкает контакты предупредительной сигнализации. Аналогично реле работает и при медленном понижении уровня масла в баке.

Нижний поплавок располагают против отверстия маслопровода. При бурном газообразовании, возникающем при КЗ или ВЗ в обмотках трансформатора, происходит интенсивное газообразование и давление в баке скачкообразно повышается. Как следствие возникает сильный поток масла и газа через газовое реле в расширитель. При скорости масла более 0,5 м/с нижний поплавок, находящийся на пути масла опрокидывается и происходит замыкание его контактов. Эти контакты сформируют сигнал на отключение трансформатора от сети. Следует добавить, что отключающий элемент газового реле работает аналогично и при большом понижении масла в реле.

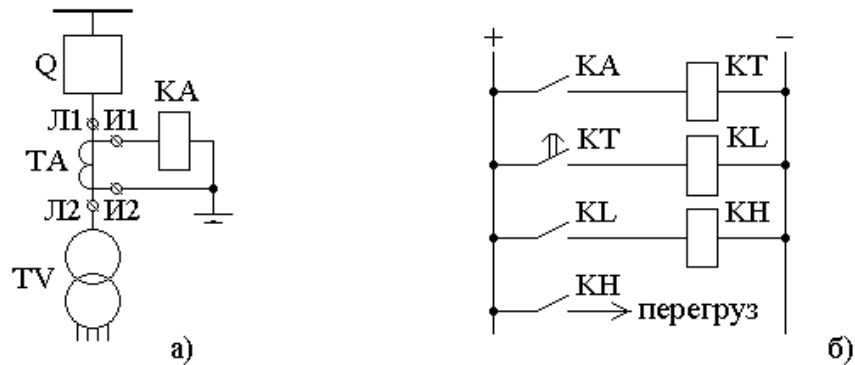
Существуют три порога срабатывания отключающего элемента газовой защиты. Для трансформаторов мощностью до 40 МВА с масляным охлаждением и естественной циркуляцией масла рекомендуется порог срабатывания, равный 0,6 м/с.

Для трансформаторов мощностью свыше 40 МВА с дутьем порог срабатывания должен составлять порядка 0,9 м/с. В тоже время для трансформаторов любой мощности с принудительной циркуляцией

масла рекомендуется порог срабатывания в 1,2 м/с [22]. При этом время срабатывания газового реле должно составлять 0,05–0,5 с.

Следует добавить, что недостатки газовой защиты в основном определены способом защиты, основанным на контроле состояния масла в трансформаторе в зависимости от температуры не только элементов трансформатора, но и температуры окружающей среды.

В качестве защиты от перегрузок в однофазных печных трансформаторах обычно используют максимальную токовую защиту (МТЗ), схема которой приведена на рисунке 1.23.



а – токовые цепи; б – цепи оперативного тока

Рисунок 1.23 – Схема защиты от перегрузки трансформатора

Защита действует с выдержкой времени на сигнал [21]. Ток срабатывания защиты можно определить:

$$I_{с,з} = k_H I_{НОМ} / k_B, \quad (1.14)$$

где k_H – коэффициент надежности отстройки, принимаемый равным 1,05;

k_B – коэффициент возврата, для реле РТ=40 принимаемый равный 0,85;

$I_{НОМ}$ – номинальный ток трансформатора.

С учетом (1.14) ток срабатывания реле:

$$I_{с,р} = k_H I_{НОМ} / k_B / K_I \quad (1.15)$$

Выдержка времени защиты должна обеспечивать отстройку этой защиты от длительности протекания токов эксплуатационных КЗ, которая определяется временем подъема электродов. Выдержка времени защиты от перегрузок принимается на ступень селективности больше, чем время срабатывания токовых защит отходящих линий:

$$t_{\text{сп}} = t_{\text{со}} + \Delta t, \quad (1.16)$$

где Δt – ступень селективности, обычно принимаемая равной 0,4–0,6с.

Обычно [21] принимается $t_{\text{сп}} = 10\text{с}$. Как известно [23], короткая сеть работает в условиях достаточно высоких температур при наличии в окружающей среде большого количества абразивной металлической и угольной пыли. При этом отдельные элементы короткой сети являются подвижными и в процессе могут перемещаться.

В связи с этим основными электрическими повреждениями в короткой сети являются обрывы и короткие замыкания отдельных расщеплений. При этом прямая сигнализация о появлении обрыва расщепления отсутствует, так как, видимо, отсутствуют простые и надежные способы его определения. Обычно на практике появлении обрыва расщепления определяют по различным косвенным признакам. Что является достаточно сложной процедурой с далеко неочевидными результатами.

От коротких замыканий в расщеплениях короткой сети, как правило, защищаются с помощью электрического изолирования всех шин [23]. Естественно, изоляция шинных пакетов различной конструкции короткой сети имеет свои особенности. Так в шинных пакетах с естественным охлаждением изолируются только места сжима шин и закрепления шинного пакета. Это вызвано тем, что сплошная изоляция шин может вызвать недопустимый их перегрев [6]. При этом в пакетах шин с одинаковой полярностью шины изолируются только от земли. В бифилярных пакетах шины изолируются как от земли, так и между собой.

Главным критерием электроизоляционных материалов, применяемых в рудотермическом производстве, является теплостойкость, т.е. способность этого материала выполнять свои функции в условиях рабочей температуры в течение длительного времени. Технические характеристики некоторых электроизоляционных материалов приведены в [6].

Как известно [6], для повышения надежности работы шинного пакета короткой сети рекомендуется обмотка трубошин по всей длине тонким слоем прочной электроизоляционной ткани. В частности, например, на электропечи РПЗ-48 трубошины выполнены из медных труб диаметром 60 мм, которые обмотаны двумя слоями липкой стеклотенты толщиной 0,2 мм с полуторным перекрытием при намотке каждого слоя. Но даже в этом случае обмотка токоведущих труб рассматривается как вспомогательное мероприятие.

Однако не всегда наличие изоляции спасает от коротких замыканий в расщеплениях. Это вызвано тем, что высокая температура окружающей среды и наличие в ней абразивной металлической и угольной пыли приводит к истиранию изоляции. В результате в месте механического разрушения изоляции между трубошинами или по изоляционным прокладкам могут образовываться токопроводящие мостики [23]. В результате через электрическую дугу возникает короткое замыкание между парой трубошин расщепления, которое сопровождается расплавлением не только этой пары шин расщепления, но и всего шинного моста.

Следует добавить, что своевременное отключение повреждения позволило бы значительно сократить размеры повреждения и стоимость ремонта. Однако в настоящее время устройства защиты короткой сети от короткого замыкания не устанавливаются, из-за отсутствия простого и дешевого технического решения.

2 Совершенствование теории моделирования параметров печного трансформатора и короткой сети

2.1 Моделирование токов в печном трансформаторе в нормальных эксплуатационных режимах работы

Расчет параметров срабатывания защит печного трансформатора комплекса «рудотермическая печь» невозможен без определения токов в нормальном, аномальном и аварийном режимах. Моделирование токов в печном трансформаторе в нормальном эксплуатационном режиме работы предлагается произвести следующим образом.

Как известно [24; 25], печные однофазные трансформаторы по известным причинам имеют расщепленную вторичную обмотку. Эта обмотка представляет собой g одновитковых изолированных обмоток, выполненных шиной большого сечения [24–27]. Их типовое расположение на магнитопроводе показано на рисунке 1.4. Такое выполнение вторичной обмотки в соответствии с разделом 1.2 вызвано сложностью изготовления вторичной обмотки, способной обеспечить передачу электрической энергии напряжением $u_2 = 120 - 250 \text{ В}$ при токе $i_2 = 30000 - 250000 \text{ А}$.

В соответствии с [17; 19; 28–32] известно большое количество методов моделирования токов в обмотках однофазного трансформатора в произвольном режиме работы. Однако все они предназначены для моделирования токов в трансформаторах, количество обмоток которого не больше трех. В наибольшей степени для данного случая подходит математическая модель, уравнения которой составлены по второму закону Кирхгофа [32–35].

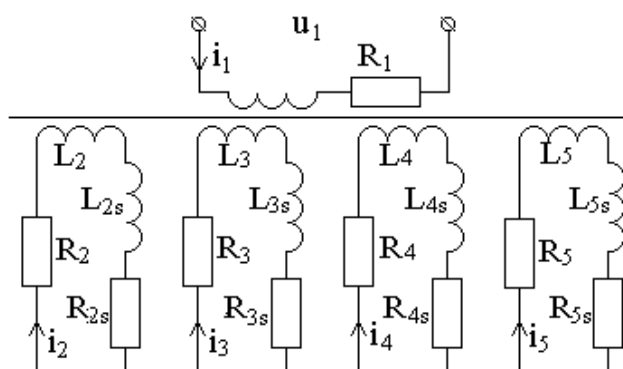


Рисунок 2.1 – Схема однофазного трансформатора с расщепленной вторичной обмоткой при $G=4$

Если для математической модели принять $G = 4$, то ей будет соответствовать схема однофазного трансформатора с расщепленной вторичной обмоткой, показанная на рисунке 2.1 [29], где u_1 – мгновенное значение напряжения на первичной обмотке; i_i – мгновенные значения токов в обмотках; $R_i(L_i)$ – активные сопротивления (индуктивности) обмоток; $R_{is} = R_{iЛ} + R_{iН}$ – активное сопротивление короткой сети и нагрузки; $L_{is} = L_{iЛ} + L_{iН}$ – индуктивность короткой сети и нагрузки. При этом для первичной обмотки, также как в разделе 1.5, следует принимать $i = 1$, а для расщеплений вторичной обмотки $i = 2 - 5$.

С учетом этой схемы в произвольном эксплуатационном режиме работы печного однофазного трансформатора с $g = 4$ процесс преобразования энергии можно описать с помощью системы уравнений [29]:

$$\left. \begin{aligned} u_1 &= R_1 i_1 + d\psi_1/dt; \\ 0 &= (R_2 + R_{2s} + L_{2s}) i_2 + d\psi_2/dt; \\ 0 &= (R_3 + R_{3s} + L_{3s}) i_3 + d\psi_3/dt; \\ 0 &= (R_4 + R_{4s} + L_{4s}) i_4 + d\psi_4/dt; \\ 0 &= (R_5 + R_{5s} + L_{5s}) i_5 + d\psi_5/dt. \end{aligned} \right\} \quad (2.1)$$

В соответствии с [27; 29] в этой системе уравнений потокосцепления обмоток определяются как:

$$\begin{aligned} \psi_1 &= L_{11} i_1 + L_{12} i_2 + L_{13} i_3 + L_{14} i_4 + L_{15} i_5; \\ \psi_2 &= L_{21} i_1 + L_{22} i_2 + L_{23} i_3 + L_{24} i_4 + L_{25} i_5; \\ \psi_3 &= L_{31} i_1 + L_{32} i_2 + L_{33} i_3 + L_{34} i_4 + L_{35} i_5; \\ \psi_4 &= L_{41} i_1 + L_{42} i_2 + L_{43} i_3 + L_{44} i_4 + L_{45} i_5; \\ \psi_5 &= L_{51} i_1 + L_{52} i_2 + L_{53} i_3 + L_{54} i_4 + L_{55} i_5. \end{aligned} \quad (2.2)$$

Согласно [35; 36] расчет индуктивных сопротивлений обмоток трехфазного трансформатора довольно сложен. В соответствии с [36], если пренебречь индуктивным сопротивлением рассеяния первичной обмотки, то в этом случае при известном напряжении фазы U_1 и токе холостого хода I_{xx} трансформатора главное индуктивное сопротивление фазы, а также ее индуктивность можно достаточно точно определить из математических выражений:

$$Z_m = \dot{U}_1 / \dot{I}_{xx}, X_m = \sqrt{Z_m^2 - R_1^2}, X_0 = X_m \text{ и } L_0 = X_0 / 2\pi f_c, \quad (2.3)$$

где f_c – частота тока в сети.

Известно [35; 36], что собственные индуктивности и взаимные индуктивности обмоток трансформатора пропорциональны квадрату их витков. Так как числа витков у вторичных обмоток одинаковы, то их собственные индуктивности:

$$L_2 = L_3 = L_4 = L_5 = L_0(w_2 / w_1), \quad (2.4)$$

где w_1 и w_2 – число витков в первичной и в расщеплениях вторичной обмотки. Обычно в печных трансформаторах $w_2 = 1$.

Взаимная индуктивность между первичной обмоткой и каждой из вторичных обмоток [29]:

$$L_{1,2} = L_{1,3} = L_{1,4} = L_{1,5} = L_{2,1} = L_{3,1} = L_{4,1} = L_{5,1} = L_0(w_2 / w_1) \quad (2.5)$$

Взаимная индуктивность между вторичными обмотками:

$$\begin{aligned} L_{2,3} = L_{2,4} = L_{2,5} = L_{3,2} = L_{4,2} = L_{5,2} = \\ L_{3,4} = L_{3,5} = L_{4,3} = L_{5,3} = L_{4,5} = L_{5,4} = L_0(w_2 / w_1) \end{aligned} \quad (2.6)$$

Активные сопротивления первичной обмотки и расщеплений вторичной обмотки проще всего получить путем их замера с помощью моста постоянного тока.

Из (2.1) и (2.2) видно, что параметры расщеплений вторичной обмотки, их линий и нагрузки, а также токи одинаковы. Если принять, что в системе уравнений (2.1) и потокосцеплений (2.2) все собственные индуктивности расщеплений обмоток равны L_2 , взаимные индуктивности между первичной обмоткой и каждым из расщеплений вторичной обмотки равны L_{12} , взаимные индуктивности между расщеплениями вторичной обмотки равны L_{23} , а активные сопротивления этих расщеплений равны R_2 , то математическое выражение (2.1) легко преобразуется в систему уравнений [29]:

$$\left. \begin{aligned} u_1 &= R_1 i_1 + d\psi_1/dt; \\ 0 &= (R_2 + R_{2Л} + R_{2Н}) i_2 + (L_{2Л} + L_{2Н}) \dot{i}_2 + d\psi_2/dt. \end{aligned} \right\} \quad (2.7)$$

в которой потокосцепления:

$$\psi_1 = L_1 i_1 + gL_{1,2} i_2 \text{ и } \psi_2 = L_{1,2} i_1 + L_2 i_2 + L_{2,3} i_2 (g-1) \quad (2.8)$$

Такая математическая модель проста и позволяет моделировать процессы в однофазном трансформаторе, как в стационарных, так и в переходных режимах работы. При этом токи во всех обмотках трансформатора получаются в естественном виде. Что, в свою очередь, значительно облегчает анализ поведения устройств релейной защиты в любых переходных процессах.

Процессы в трансформаторе в стационарном режиме моделируются с помощью системы неоднородных уравнений [35], получаемой из (2.7). В этой системе все напряжения считаются синусоидальными, а оператор дифференцирования d/dt заменяется на выражение $j\omega$. В результате система (2.7) преобразуется в:

$$\left. \begin{aligned} u_1 &= (R_1 + jX_1) i_{1п} + gX_{1,2} i_{2п}; \\ 0 &= X_{2,1} i_{1п} + (R_{\Sigma 2} + jX_{\Sigma 2}) i_{2п} + (X_2 + (g-1)X_{2,3}) i_{2п}. \end{aligned} \right\} \quad (2.9)$$

где $i_{1п}$ и $i_{2п}$ – периодическая составляющая тока в обмотках трансформатора;

X_{vw} – активные и индуктивные сопротивления индуктивностей L_{vw} в системе уравнений (2.7):

$$R_{\Sigma 2} = R_2 + R_{2s} \text{ и } X_{\Sigma 2} = X_2 + X_{2s}.$$

В переходном режиме ток в i -й обмотке трансформатора [35] определяется как сумма тока $i_{iп}$ периодической и i_{ia} аperiodической составляющих. Аperiodическую составляющую тока i_{ia} получают путем полного решения системы однородных дифференциальных уравнений [35]. Ее также получают из (2.7), приняв в ней $u_1=0$. При численном решении этой системы в ней dt и di заменяются на Δt и Δi . Затем в левую часть уравнений переносятся составляющие падений напряжений на активных и индуктивных сопротивлениях линии и нагрузки. В результате изменение токов Δi в элементах

схемы за интервал времени Δt определяется путем решения системы уравнений:

$$\left. \begin{aligned} -R_1 i_{1a} \Delta t &= L_1 \Delta i_{1a} + g L_{1,2} \Delta i_{2a}; \\ -(R_{\Sigma 2} + L_{\Sigma 2}) i_{2a} \Delta t &= L_{1,2} \Delta i_{1a} + (L_2 + (g-1)L_{2,3}) \Delta i_{2a}. \end{aligned} \right\} \quad (2.10)$$

В соответствии с [35] величины токов i_{1a} и i_{2a} на момент начала переходного процесса определяется типом моделируемого режима работы трансформатора, то есть начальными условиями. Например, при моделировании режима изменения нагрузки трансформатора установившиеся значения токов до начала и по завершению переходного процесса известны. Исходя из этого начальное значение тока апериодической составляющей в обмотках трансформатора принимается равным их разнице. При этом величина токов в i -ой обмотке трансформатора в интервале $q + 1$ будет определяться как:

$$i_{ia,q+1} = i_{ia,q} + \Delta i_{ia,q} \quad (2.11)$$

Таким образом, полученная математическая модель позволяют моделировать практически все стационарные и переходные процессы в неповрежденном печном однофазном трансформаторе с расщепленной обмоткой [29].

Таблица 2.1 – Параметры экспериментального трансформатора

Параметры экспериментального трансформатора	Обозначение	Величина
Напряжение питания, В	U_1	235
Ток холостого хода трансформатора, А	I_{xx}	0,11
Число витков в первичной обмотке, вит.	w_1	292
Число витков в расщеплении, вит	w_2	5
Число расщеплений во вторичной обмотке	G	4
Активное сопротивление первичной обмотки, Ом	R_1	0,8
Активное сопротивление расщепления, Ом	$R_2 \div R_5$	0,046
Активные сопротивления короткой сети, Ом	$R_{2л} \div R_{5л}$	0,045
Активные сопротивления нагрузки, Ом	$R_{2н} \div R_{5н}$	0,79

Проверка адекватности этой математической модели осуществлялась на экспериментальном однофазном трансформаторе, изготовленном из трехфазного трансформатора ТТ-6 мощностью 6,0 кВА путем сопоставления результатов моделирования и эксперимента. Параметры экспериментального трансформатора необходимые для моделирования токов в обмотках приведены в таблице 2.1.

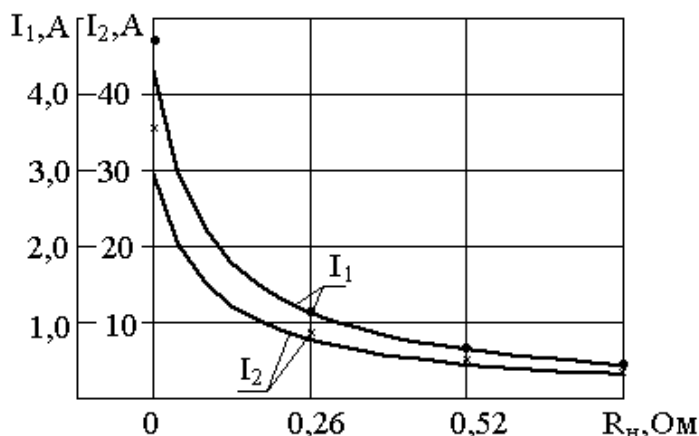


Рисунок 2.2 – Результаты моделирования и эксперимента токов в обмотках трансформатора ТТ-6 под нагрузкой

Результаты моделирования и эксперимента процессов при изменении нагрузке приведены на рисунке 2.2. Анализ результатов расчета и эксперимента показывает, что максимальная погрешность моделирования токов в нагрузочном режиме работы печного однофазного трансформатора с расщепленной обмоткой не превышает 10 %, что вполне удовлетворяет требованиям релейной защиты. При этом есть все основания полагать, что погрешность моделирования в переходных процессах будет аналогичной.

2.2 Моделирование токов в печном трансформаторе при витковом замыкании в первичной обмотке

Оценка чувствительности релейной защиты печного трансформатора комплекса «рудотермическая печь» невозможна без метода моделирования токов в его обмотках при ВЗ. В связи с тем, что характерной конструкционной особенностью однофазного трансформатора для рудотермического производства является наличие многовитковой первичной и расщепленной одновитковой вторичной обмоток витковое замыкание может произойти только в первичной обмотке. С учетом того, что релейная защита

трансформатора имеет время срабатывания значительно большее чем переходной процесс при ВЗ, то моделирование токов при витковом замыкании осуществляется для установившегося режима.

Если в математической модели, также как в разделе 2.1, принять число расщеплений вторичной обмотки $G=4$, то при ВЗ в первичной обмотке ей будет соответствовать схема однофазного трансформатора с расщепленной вторичной обмоткой, показанная на рисунке 2.3 [37], где \dot{U}_1 – напряжение на первичной обмотке; \dot{I}_i – токи в обмотках; X_i – индуктивные сопротивления в обмотках; $X_{is} = X_{ил} + X_{ин}$ – индуктивные сопротивления короткой сети и нагрузки; R_k и X_k – активное и индуктивное сопротивления замкнувшихся витков; R_d – сопротивление дуги [37–40].

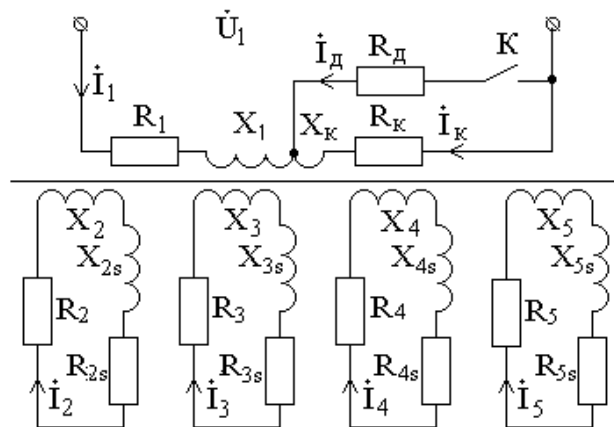


Рисунок 2.3 – Схема электрических повреждений в однофазном трансформаторе с расщепленной вторичной обмоткой

При этом для первичной обмотки следует принимать $i=1$, а для расщеплений вторичной обмотки $i=2-5$.

При замыкании ключа K по схеме на рисунке 2.3 в первичной обмотке печного однофазного трансформатора возникает ВЗ. В этом случае процесс преобразования энергии в этом трансформаторе можно описать системой уравнения [37]:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= R_1 \dot{I}_1 + \dot{\psi}_1; \\ 0 &= (R_2 + R_{2Л} + R_{2Н} + jX_{2Л} + jX_{2Н}) \dot{I}_2 + \dot{\psi}_2; \\ 0 &= (R_3 + R_{3Л} + R_{3Н} + jX_{3Л} + jX_{3Н}) \dot{I}_3 + \dot{\psi}_3; \\ 0 &= (R_4 + R_{4Л} + R_{4Н} + jX_{4Л} + jX_{4Н}) \dot{I}_4 + \dot{\psi}_4; \\ 0 &= (R_5 + R_{5Л} + R_{5Н} + jX_{5Л} + jX_{5Н}) \dot{I}_5 + \dot{\psi}_5; \\ 0 &= (R_k + R_d) \dot{I}_k + \dot{\psi}_k, \end{aligned} \right\} \quad (2.12)$$

В этой системе уравнения [37] потокосцеплений обмоток:

$$\begin{aligned} \dot{\psi}_1 &= jX_{11} \dot{I}_1 + jX_{12} \dot{I}_2 + jX_{13} \dot{I}_3 + jX_{14} \dot{I}_4 + jX_{15} \dot{I}_5 + jX_{1k} \dot{I}_k; \\ \dot{\psi}_2 &= jX_{21} \dot{I}_1 + jX_{22} \dot{I}_2 + jX_{23} \dot{I}_3 + jX_{24} \dot{I}_4 + jX_{25} \dot{I}_5 + jX_{2k} \dot{I}_k; \\ \dot{\psi}_3 &= jX_{31} \dot{I}_1 + jX_{32} \dot{I}_2 + jX_{33} \dot{I}_3 + jX_{34} \dot{I}_4 + jX_{35} \dot{I}_5 + jX_{3k} \dot{I}_k; \\ \dot{\psi}_4 &= jX_{41} \dot{I}_1 + jX_{42} \dot{I}_2 + jX_{43} \dot{I}_3 + jX_{44} \dot{I}_4 + jX_{45} \dot{I}_5 + jX_{4k} \dot{I}_k; \\ \dot{\psi}_5 &= jX_{51} \dot{I}_1 + jX_{52} \dot{I}_2 + jX_{53} \dot{I}_3 + jX_{54} \dot{I}_4 + jX_{55} \dot{I}_5 + jX_{5k} \dot{I}_k; \\ \dot{\psi}_k &= jX_{k1} \dot{I}_1 + jX_{k2} \dot{I}_2 + jX_{k3} \dot{I}_3 + jX_{k4} \dot{I}_4 + jX_{k5} \dot{I}_5 + jX_{kk} \dot{I}_k \end{aligned} \quad (2.13)$$

Так как [35] собственные индуктивные сопротивления и взаимные индуктивные сопротивления обмоток трансформатора пропорциональны квадрату их витков, то с учетом (2.3) собственные индуктивные сопротивления обмоток:

$$\begin{aligned} X_1 &= X_0 [(w_1 - w_k) / w_1]^2, \quad X_k = X_0 (w_k / w_1)^2 \text{ и} \\ X_2 &= X_3 = X_4 = X_5 = X_0 (w_2 / w_1)^2, \end{aligned} \quad (2.14)$$

где w_1 и w_2 – числа витков в первичной и расщеплениях вторичной обмотки;

w_k – число замкнувшихся витков в первичной обмотке.

Взаимные индуктивные сопротивления между первичной обмоткой и каждым из расщеплений вторичной обмотки:

$$X_{12} = X_{13} = X_{14} = X_{15} = X_0 [(w_1 - w_k) w_2 / w_1^2] \quad (2.15)$$

Взаимные индуктивные сопротивления между расщеплениями вторичной обмотки:

$$X_{23} = X_{24} = X_{25} = X_{34} = X_{35} = X_{45} = X_0(w_2/w_1)^2 \quad (2.16)$$

Взаимные индуктивные сопротивления между первичной обмоткой и замкнутыми витками:

$$X_{1к} = X_0[(w_1 - w_k)w_k/w_1]^2 \quad (2.17)$$

Взаимные индуктивные сопротивления между расщеплениями вторичной обмотки и замкнутыми витками:

$$X_{2к} = X_{3к} = X_{4к} = X_{5к} = X_0(w_2w_k)/w_1^2. \quad (2.18)$$

В уравнениях (2.13)–(2.18) считается, что взаимные индуктивные сопротивления $X_{m,n} = X_{n,m}$.

Если допустить, что активные сопротивления в произвольной обмотке пропорциональны числу витков, то активные сопротивления в первичной обмотке и замкнутых витках следует определять, как:

$$R_1 = R_0[(w_1 - w_k)/w_1] \text{ и } R_k = R_0(w_k/w_1). \quad (2.19)$$

где R_0 – активное сопротивление первичной обмотки, равное до виткового замыкания R_1 .

При этом активные сопротивления в расщеплениях вторичных обмоток:

$$R_2 = R_3 = R_4 = R_5. \quad (2.20)$$

На точность моделирования токов при ВЗ значительно влияет точность определения сопротивления дуги R_d . Это сопротивление зависит от целого ряда факторов в виде величины тока замыкания, длины дуги, давления и так далее. Поэтому существует достаточно много методов оценки сопротивления дуги, как, например, в [38]. В то же время в [1] при ВЗ в трансформаторах его рекомендуют принимать равным 0,13–0,15 Ом. В данной работе при проведении

экспериментальных исследований сопротивление дуги принималось равным 0,0325 Ом, то есть сопротивлению соединительных проводов и контактов коммутатора.

Если параметры расщеплений вторичной обмотки и их нагрузок одинаковы, то математическую модель ВЗ в однофазном трансформаторе с расщепленной вторичной обмоткой можно существенно упростить. В этом случае математическое выражение (2.12) легко преобразуется в систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= R_1 \dot{I}_1 + \dot{\psi}_1; \\ 0 &= (R_2 + R_{2л} + R_{2н}) \dot{I}_2 + j(X_{2л} + X_{2н}) \dot{I}_2 + \dot{\psi}_2; \\ 0 &= (R_k + R_d) \dot{I}_k + \dot{\psi}_k. \end{aligned} \right\}, \quad (2.21)$$

где потокосцепления:

$$\begin{aligned} \dot{\psi}_1 &= jX_{11} \dot{I}_1 + jX_{1,2} \dot{I}_2 g + jX_{1,k} \dot{I}_k; \\ \dot{\psi}_2 &= jX_{1,2} \dot{I}_1 + jX_{22} \dot{I}_2 + jX_{2,3} \dot{I}_2 (g-1) + X_{2,k} \dot{I}_k; \\ \dot{\psi}_k &= jX_{k,1} \dot{I}_1 + jX_{k,2} \dot{I}_2 (g-1) + jX_k \dot{I}_k. \end{aligned} \quad (2.22)$$

Напряжения на выходе расщеплений вторичной обмотки:

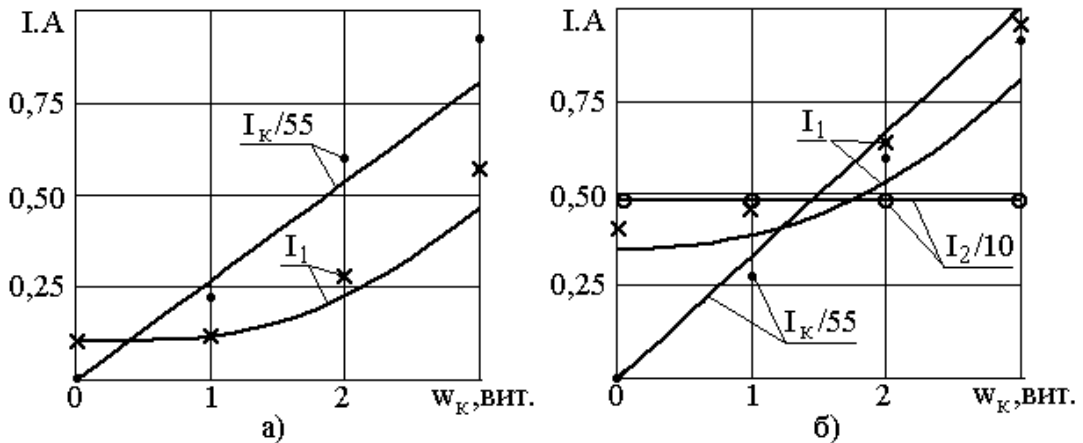
$$\dot{U}_2 = \dot{U}_3 = \dot{U}_4 = \dot{U}_5 = \dot{I}_2 (Z_{2н} + Z_{2л}). \quad (2.23)$$

Такая математическая модель проста и позволяет моделировать токи в однофазном трансформаторе с любым числом расщеплений вторичной обмотки при ВЗ в первичной обмотке. При этом токи во всех обмотках трансформатора получаются в естественном виде.

Проверка адекватности этой математической модели осуществлялась путем сравнения результатов моделирования и экспериментов на однофазном трансформаторе типа ТТ-6 с вторичной обмоткой, выполненной в виде четырех расщеплений. Параметры этого трансформатора приведены в таблице 2.1.

Результаты моделирования и эксперимента токов в обмотках трансформатора при ВЗ в режиме холостого хода и нагрузки в зависимости от числа замкнутых витков приведены на рисунке 2.4, где величина тока I_k с целью совмещения графиков представлена уменьшенной в 55 раз. Их сопоставление показывает, что погрешность моделирования виткового замыкания в этих режимах не

превышает 10–15 %. Что вполне удовлетворяет требованиям релейной защиты.



а – моделирование в режиме холостого хода; б – моделирование при нагрузке

Рисунок 2.4 – Результаты моделирования виткового замыкания в первичной обмотке трансформатора ТТ-6

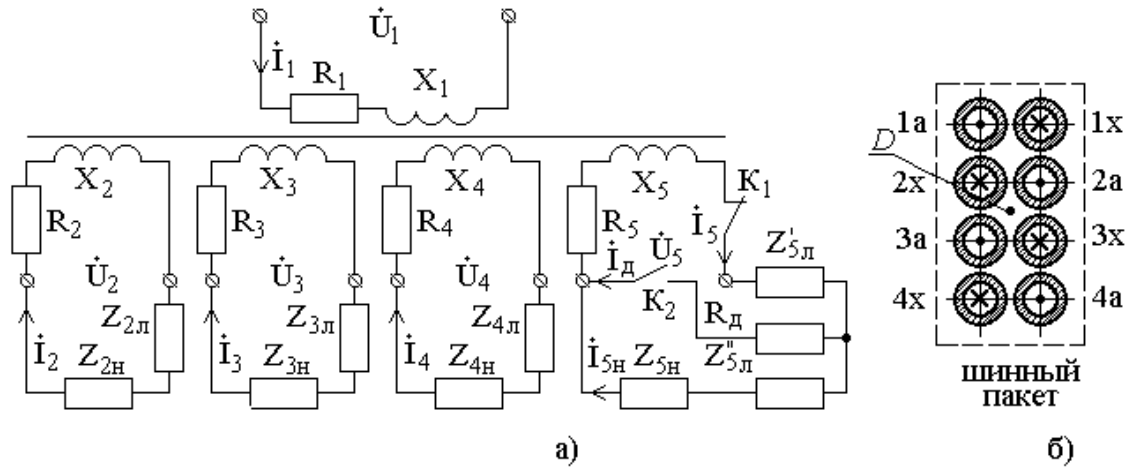
2.3 Моделирование токов при электрических повреждениях в короткой сети

В соответствии с разделом 1.5 наиболее характерными электрическими повреждениями короткой сети, присоединяемой к печному трансформатору с расщепленной вторичной обмоткой, являются КЗ в пакете трубошин и обрыв гибких связей. Схема этих электрических повреждений приведена на рисунке 2.5,а, где обрыв гибких связей имитируется размыканием контакта K_1 , а КЗ в пакете трубошин – замыканием контакта K_2 [37; 40].

Шинный пакет короткой сети изготавливается из числа пар трубошин, которое равно числу расщеплений вторичной обмотки трансформатора. Пример расположения пар трубошин в шинном пакете короткой сети приведен на рисунке 2.5,б.

Обрыв цепи токопровода, например четвертого расщепления, приводит к выходу из строя одной из четырех обмоток печного трансформатора. Это, в свою очередь, на одну четвертую снижает мощность печи и в результате ее производительность. Для предотвращения этого в конце короткой сети на гибкие связи иногда ставят закоротки. Однако, в этом случае обрыв гибкой связи приводит к перегрузке на четверть неповрежденных обмоток. Это приводит к

ускоренному выходу их из строя. При этом контроль обрыва гибкой связи и теплового режима короткой сети отсутствует.



а – схема однофазного трансформатора при электрических повреждениях; б – расположение пар трубошин в шинном пакете короткой сети

Рисунок 2.5 – Схема однофазного трансформатора при электрических повреждениях в одном из расщеплений вторичной обмотки

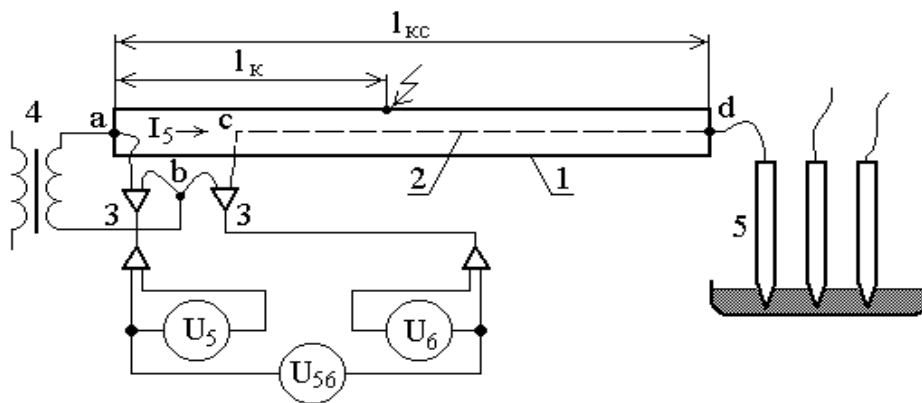
КЗ, например, в четвертом расщеплении, сопровождается значительным повышением тока в частях поврежденного расщепления и возникновению дуги в точке замыкания. Затем дуга достаточно быстро распространяется на остальные трубошины. Что приводит к их расплавлению и полному выходу из строя короткой сети. Для защиты от КЗ обычно используют изоляцию трубошин в виде воздушных зазоров и стеклоткани пропитанной эпоксидной смолой. Такая защита достаточно дешева, но не способна остановить развитие аварии при возникновении КЗ в одной из пар трубошин.

Как известно [6; 15; 23], поперечное сечение пакета шин короткой сети обладает значительными размерами и состоит из целого ряда трубошин. Поэтому врезка в него обычного или установка на нем проходного трансформатора тока для реализации релейной защиты не представляется возможной [31]. В наибольшей степени для этого подходят максимальные токовые защиты [34; 41]. В ней в качестве измерительных преобразователей используются магнитные трансформаторы тока. Однако реализация такой защиты

затруднена отсутствием в настоящее время метода моделирования токов в шинном пакете при КЗ в одном из расщеплений.

Решать эту проблему предлагается в два этапа [40]. Первым этапом является определение сопротивлений шинного пакета короткой сети в зависимости места расположения КЗ. Вторым этапом – моделирование токов в элементах шинного пакета.

Как следует из [6; 13; 15; 42] известные расчетные и экспериментальные методы определения сопротивлений шинного пакета трудно реализуемы из-за сложной конфигурации короткой сети и больших токов в ней. В связи с этим для определения сопротивления $R'_{5л}$ и $R''_{5л}$, а также $X'_{5л}$ и $jX''_{5л}$ шинного пакета предлагается использовать графоаналитический метод с использованием в нем данных, получаемых на работающей печи экспериментально по схеме, приведенной на рисунке 2.6.



1 – шинный пакет короткой сети; 2 – обратный измерительный проводник, положение которого в шинном пакете определено точкой D на рисунке 2.5б; 3 – соединительные кабели; 4 – печной трансформатор; 5 – электроды печи; U_5 и U_6 – напряжение в начале и конце шинного пакета; U_{56} – падение напряжения на шинном пакете

Рисунок 2.6 – Схема для измерения параметров короткой сети

С учетом этой схемы полное сопротивление пары трубошин шинного пакета, присоединяемой к четвертому расщеплению вторичной обмотки определится как:

$$Z_{5л} = \dot{U}_{56} / \dot{I}_5, \quad (2.24)$$

где I_5 – ток в этой паре трубошин.

В соответствии с [6] измерение падения напряжения в короткой сети U_{56} печного трансформатора сопряжено со сложностью отстройки от ЭДС индуцируемой в контуре, образованном соединительными проводами и шинным пакетом магнитным полем тока в шинном пакете. Так как величина тока в короткой сети достигает порядка 35–150 кА, то погрешность измерения может быть соизмерима с измеряемой величиной, а иногда значительно превышать ее.

В связи с этим для измерения падения напряжения U_{56} в шинном пакете используется обратный измерительный проводник в виде изолированного провода. Этот проводник устанавливается в геометрическом центре шинного пакета, который на рисунке 2.5,а помечен точкой D. В результате ЭДС в измерительной цепи, индуцируемая токами в трубошинах с рядным расположением в шинном пакете, будет равна нулю. Таким образом, удастся в значительной мере снизить влияние на измерения U_{56} внешнего магнитного поля.

Для повышения точности измерения расстояние между точками а и b, b и с, а и с должно быть минимально возможным. Соединительные кабели 3 изготавливаются из бифилярных проводников в заземленной экранирующей оплетке. У измерительных приборов класс точности может составлять порядка 0,5–1,0. Пример результатов измерения для расчета сопротивления шинного пакета печи № 4 Аксуского завода ферросплавов приведен в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Пример результатов измерений в фазе А на печи №4 для определения сопротивления шинного пакета

Параметры	Фаза А		Фаза В		Фаза С	
	замер №1	замер №2	замер №1	замер №2	замер №1	замер №2
$U_5, В$	108	107	107	108	96	95
$U_6, В$	106	103	106	107	95	94
$U_{56}, В$	4,8	4,6	10,2	10,2	7	7,2
$\cos \varphi$	0,84	0,84	0,53	0,54	0,84	0,85
$I_5, А$	38000	38000	42000	41000	43000	44000

При этом величина коэффициента мощности $\cos \varphi$ определяется по стационарному измерительному прибору, а ток в короткой сети –

по показаниям амперметра в первичной обмотке и коэффициенту трансформации из выражения:

$$I_5 = I_1 k_i, \quad (2.25)$$

где k_i – коэффициент трансформации по току печного трансформатора.

Анализ результатов измерений, приведенных в таблице 2.2, показывает, что колебания измеряемых величин за время измерения изменялись незначительно. Поэтому, при расчете активного и реактивного сопротивления использовались показания первого измерения.

Пример графического определения параметров падения напряжения в шинном пакете фазы А в виде векторной диаграммы приведен на рисунке 2.7.

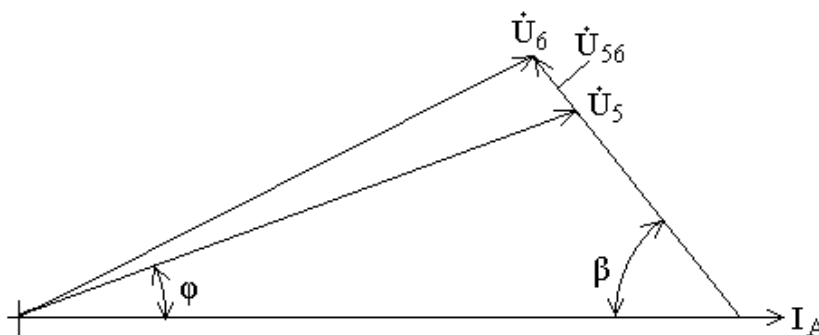


Рисунок 2.7 – Векторная диаграмма

Эта векторная диаграмма строится следующим образом. Первоначально горизонтально откладывается вектор тока \dot{I}_A . Затем по показаниям коэффициента мощности $\cos \varphi$ откладывается вектор \dot{U}_5 . Далее путем совмещения векторов U_6 и U_{56} определяется их положение на векторной диаграмме, при этом угол β является углом между векторами \dot{I}_A и U_{56} .

Тогда с учетом рисунка 2.7 и [35] активное и индуктивное сопротивление пары трубошин шинного пакета короткой сети, присоединяемой к четвертому расщеплению вторичной обмотки можно определить как:

$$R_{5л} = Z_{5л} \cos \beta \text{ и } X_{5л} = Z_{5л} \sin \beta \quad (2.26)$$

Если в соответствии с рисунком 2.6 считать, что точка КЗ пары трубошин шинного пакета находится на расстоянии l_k от его начала при полной его длине равной $l_{кк}$, то тогда сопротивления частей этой пары трубошин можно приближенно определить как:

$$Z'_{5л} = Z_{5л} l_k / l_{кк} \text{ и } Z''_{5л} = Z_{5л} - Z'_{5л} \quad (2.27)$$

При этом активные и реактивные сопротивления этих частей пары трубошин:

$$R'_{5л} = Z'_{5л} \cos \beta \text{ и } X'_{5л} = Z'_{5л} \sin \beta, \text{ а} \quad (2.28)$$

$$R''_{5л} = Z''_{5л} \cos \beta \text{ и } X''_{5л} = Z''_{5л} \sin \beta. \quad (2.29)$$

Расчет сопротивлений короткой сети по предложенному методу удобно осуществлять в TurboBasic [43] по специально разработанной программе «LINE1». Результаты расчетов активного и реактивного сопротивлений по данным таблицы 2.2 в этой программе приведены в таблице 2.3. Эти результаты хорошо согласуются с данными, приведенными в [6].

Таблица 2.3 – Результаты расчетов сопротивлений печи №4

Сопротивление	Фаза А	Фаза В	Фаза С
Z, Ом	$1,65 \times 10^{-4}$	$1,79 \times 10^{-4}$	$1,05 \times 10^{-4}$
R, Ом	$1,08 \times 10^{-4}$	$1,07 \times 10^{-4}$	$2,56 \times 10^{-5}$
X, Ом	$1,26 \times 10^{-4}$	$1,44 \times 10^{-4}$	$1,01 \times 10^{-4}$

При КЗ в четвертом расщеплении вторичной обмотки трансформатора процесс преобразования энергии в нем можно описать системой уравнения [28–40]:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= R_1 \dot{I}_1 + \dot{\psi}_1; \\ 0 &= (R_2 + R_{2Л} + R_{2Н} + jX_{2Л} + jX_{2Н}) \dot{I}_2 + \dot{\psi}_2; \\ 0 &= (R_3 + R_{3Л} + R_{3Н} + jX_{3Л} + jX_{3Н}) \dot{I}_3 + \dot{\psi}_3; \\ 0 &= (R_4 + R_{4Л} + R_{4Н} + jX_{4Л} + jX_{4Н}) \dot{I}_4 + \dot{\psi}_4 \\ 0 &= (\Sigma R_{5Л,К} + j\Sigma X_{5Л,К}) \dot{I}_5 + \dot{\psi}_5; \end{aligned} \right\}, \quad (2.30)$$

где

$$\Sigma R_{5Л,К} = R_5 + R'_{5Л} + \left[\frac{(R_Н + R''_{5Л}) R_Д}{R_Н + R'_{5Л} + R_Д} \right] \quad (2.31)$$

и

$$\Sigma X_{5Л,К} = jX_5 + jX'_{5Л} + \left[\frac{(jX_Н + jX''_{5Л})}{jX_Н + jX'_{5Л} + jX_Д} \right]. \quad (2.32)$$

В этой системе уравнения [28; 29; 37] потокосцеплений обмоток:

$$\begin{aligned} \dot{\psi}_1 &= jX_{11} \dot{I}_1 + (\pi - 1) jX_{12} \dot{I}_2 + jX_{12} \dot{I}_5; \\ \dot{\psi}_2 &= jX_{12} \dot{I}_1 + jX_{22} \dot{I}_2 + (\pi - 2) jX_{23} \dot{I}_2 + jX_{23} \dot{I}_5; \\ \dot{\psi}_3 &= jX_{12} \dot{I}_1 + (\pi - 2) jX_{23} \dot{I}_2 + jX_{22} \dot{I}_2 + jX_{23} \dot{I}_5; \\ \dot{\psi}_4 &= jX_{12} \dot{I}_1 + (\pi - 2) jX_{23} \dot{I}_2 + jX_{23} \dot{I}_2 + jX_{23} \dot{I}_5; \\ \dot{\psi}_5 &= jX_{12} \dot{I}_1 + (\pi - 1) jX_{23} \dot{I}_2 + jX_{22} \dot{I}_5. \end{aligned} \quad (2.33)$$

Так как собственные индуктивные сопротивления и взаимные индуктивные сопротивления обмоток трансформатора пропорциональны квадрату их витков, то с учетом (2.3) собственные индуктивные сопротивления обмоток:

$$X_1 = X_0, \text{ и } X_2 = X_3 = X_4 = X_5 = X_0 (w_2 / w_1)^2, \quad (2.34)$$

где w_1 и w_2 – числа витков в первичной и расщеплениях вторичной обмотки.

Взаимные индуктивные сопротивления между первичной обмоткой и каждым из расщеплений вторичной обмотки:

$$X_{12} = X_{13} = X_{14} = X_{15} = X_0(w_1 w_2 / w_1^2) \quad (2.35)$$

Взаимные индуктивные сопротивления между расщеплениями вторичной обмотки:

$$X_{23} = X_{24} = X_{25} = X_{34} = X_{35} = X_{45} = X_0(w_2 / w_1)^2 \quad (2.36)$$

В уравнениях (2.33)–(2.36) также считается, что взаимные индуктивные сопротивления $X_{mn} = X_{nm}$.

Активные сопротивления первичной и расщеплений вторичной обмотки определяются так же, как в разделе 2.1.

Из рисунка 2.5 видно, что при КЗ в проводниках четвертого расщепления параметры расщеплений вторичной обмотки и их нагрузок одинаковы. Изменяется только нагрузка четвертого расщепления. В связи с этим математическую модель при коротком замыкании в четвертом расщеплении можно существенно упростить. В этом случае математическое выражение (2.30) легко преобразуется в систему уравнений [37]:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= R_1 \dot{I}_1 + \dot{\psi}_1; \\ 0 &= (R_2 + R_{2Л} + R_{2Н} + jX_{2Л} + jX_{2Н}) \dot{I}_2 + \dot{\psi}_2; \\ 0 &= (R_5 + \sum R_{5Л,К} + jX_{5Л} + \sum jX_{5Л,К}) \dot{I}_5 + \dot{\psi}_5; \end{aligned} \right\} \quad (2.37)$$

где потокосцепления:

$$\begin{aligned} \dot{\psi}_1 &= jX_{11} \dot{I}_1 + (g-1)jX_{1,2} \dot{I}_2 + jX_{1,2} \dot{I}_5; \\ \dot{\psi}_2 &= jX_{1,2} \dot{I}_1 + (g-2)jX_{2,3} \dot{I}_2 + jX_{21} \dot{I}_2 + jX_{2,3} \dot{I}_5; \\ \dot{\psi}_5 &= jX_{1,2} \dot{I}_1 + (g-1)jX_{2,3} \dot{I}_2 + jX_{21} \dot{I}_5. \end{aligned} \quad (2.38)$$

В соответствии с рисунком 2.5, а также (2.31) и (2.32) токи короткого замыкания и в цепи нагрузки можно определить как:

$$\dot{I}_Д = \dot{I}_5 (Z_{5Н} + Z'_{5Л}) / \sum Z_{5Л,К} \quad \text{и} \quad \dot{I}_Д = \dot{I}_5 R_Д / \sum Z_{5Л,К}, \quad (2.39)$$

где $\sum Z_{5Л,К} = R_{5Л,К} + jX_{5Л,К}$.

Такая математическая модель проста и позволяет моделировать токи в однофазном трансформаторе и короткой сети с любым числом расщеплений при КЗ в любом из них.

Как правило, проверка адекватности математической модели осуществляется путем сопоставления результатов моделирования и эксперимента. Проверить адекватность этой математической модели на печном трансформаторе Аксуского завода ферросплавов не удалось по вполне очевидным причинам. Поэтому проверка осуществлялась на экспериментальном однофазном трансформаторе, изготовленном на базе трансформатора ТТ-6 [44]. В нем вторичная обмотка выполнена в виде четырех расщеплений. Параметры этого трансформатора приведены в таблице 2.1.

Результаты моделирования токов в обмотках печного трансформатора и паре трубошин четвертого расщепления при КЗ в них в зависимости от места расположения КЗ на этих трубошинах при сопротивлении дуги равном $R_n/10$ приведены на рисунке 2.8. Результаты эксперимента на этом рисунке показаны точками. Сопоставление результатов моделирования и эксперимента показывает, что погрешность моделирования токов в шинном пакете короткой сети рудотермической печи не превышает 10 %. Что вполне удовлетворяет требованиям релейной защиты.

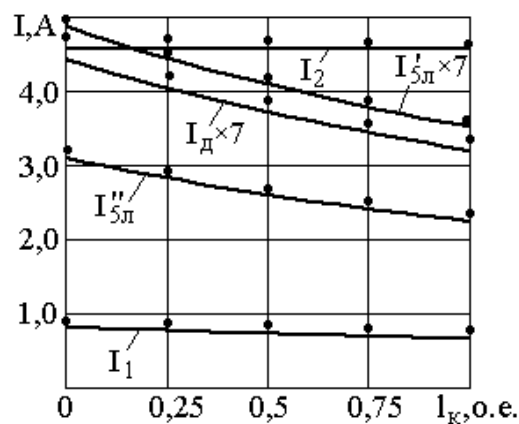


Рисунок 2.8 – Результаты измерения и моделирования токов в экспериментальном трансформаторе в зависимости от места в зависимости от места расположения точки КЗ на шинном пакете

2.4 Моделирование токов в трансформаторе при включении его в сеть

Согласно [35; 36] при включении трансформатора в сеть возникает переходный процесс, при котором токи в его обмотках многократно возрастают. Это объясняется насыщением магнитопровода и остаточным намагничиванием, имеющимся после отключения трансформатора от сети [45]. Без учета этого процесса, называемого броском тока намагничивания, не могут быть корректно сформулированы требования к защите трансформатора, а также не могут быть определены ток и время срабатывания токовой защиты трансформатора [36].

Как правило, бросок тока намагничивания определяется с помощью моделирования магнитного потока в ферромагнитном стержне сердечника при включении его обмотки в сеть [35; 36; 45]. Ток в обмотке после включения может быть определен графическим способом при помощи зависимости $\Phi = f(I_0)$, где Φ – магнитный поток в стержне сердечника; I_0 – ток холостого хода трансформатора. Получение зависимости $i_0 = f(t)$ графическим способом в переходном процессе длительностью 0,5-15с является процессом, требующим большие временные затраты. Помимо этого, необходимо учесть следующие факторы [45]:

- обязательное наличие зависимости $\Phi = f(I_0)$ для конкретного трансформатора, которая не всегда соответствует зависимости $B = f(H)$ стали его сердечника, где H и B – напряженность и индукция магнитного поля в стержне;

- неучтенность остаточной намагниченности стержня при моделировании $i_{0A} = f(t)$.

Минимизировать влияние этих факторов на моделирование броска тока намагничивания предлагается при помощи методики [45], рассмотренной ниже.

На рудотермическом производстве включение печного трансформатора происходит в режиме холостого хода. В связи с этим, уравнение (2.40) характеризует переходной процесс в однофазном трансформаторе, представленном на рисунке 2.9,а, в режиме холостого хода при включении его в сеть:

$$u_1 = i_0 R_1 + d\psi_1 / dt = i_0 R_1 + w_1 d\phi_1 / dt, \quad (2.40)$$

где u_1 – мгновенное значение напряжения на первичной обмотке;

R_1 – активное сопротивление первичной обмотки;

ψ_1 и ϕ_1 – потокосцепление и магнитный поток первичной обмотки;

w_1 – число витков первичной обмотки.

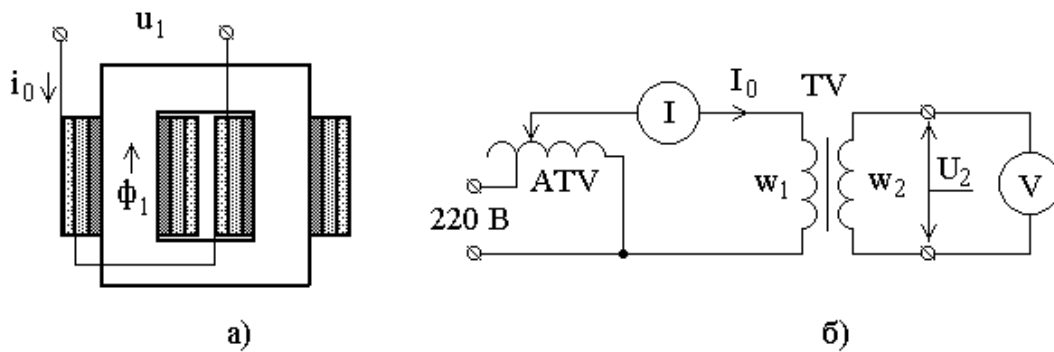
Мгновенное значение напряжения первичной обмотки определяется по формуле:

$$u_1 = U_{1m} \cos(\omega t + \alpha_1); \quad (2.41)$$

где U_{1m} – амплитудное значение напряжения в сети;

ω – угловая частота сети;

α_1 – угол сдвига по фазе.



а – однофазный трансформатор; б – схема экспериментальной установки: ATV – автотрансформатор; TV – исследуемый однофазный трансформатор; w_2 – число витков измерительной обмотки

Рисунок 2.9 – Расчетная модель и схема для получения зависимости $\Phi = f(I_0)$ экспериментальным способом

В соответствии с [36] ток i_0 можно выразить:

$$i_0 = w_1 \phi_1 / L_0, \quad (2.42)$$

а слагаемое из уравнения (2.40) $d\psi_A / dt$ можно выразить через $w_1 d\phi_A / dt$, то (2.40) преобразуется в линейное дифференциальное уравнение с постоянными коэффициентами:

$$u_1 / w_1 = (R_1 / L_0 w_1) \phi_1 + d\phi_1 / dt \quad (2.43)$$

Согласно [36] решение линейного дифференциального уравнения с постоянными коэффициентами можно записать в виде сумм двух составляющих потока:

$$\Phi_1 = \Phi_{п1} + \Phi_{a1}, \quad (2.44)$$

где $\Phi_{п1}$ и Φ_{a1} – величины периодической и аperiodической составляющих магнитного потока первичной обмотки.

Мгновенные значения двух составляющих потока представляют собой:

$$\Phi_{п1} = \frac{U_1}{\omega w_1} \sin \omega t \text{ и } \Phi_{a1} = -\Phi_{a1m} e^{-(R_1/L_0)t}, \quad (2.45)$$

где Φ_{a1m} – величина аperiodической составляющей магнитного потока, которая равна периодической составляющей магнитного потока со знаком минус в момент включения трансформатора в сеть;

L_0 – главное индуктивное сопротивление фазы, которое определяется по (2.5).

Активное сопротивление R_1 обмотки трансформатора можно рассчитать по общеизвестным формулам. Однако значительно проще и точнее его можно получить непосредственно путем замера с помощью моста постоянного тока.

Кривая намагничивания $B=f(H)$ марки стали, из которой выполнен магнитопровод трансформатора, его размеры и конструктивные особенности влияют на зависимость $\Phi=f(I_0)$. В связи с этим зависимость $\Phi=f(I_0)$ предлагается строить экспериментальным путем [45] при помощи экспериментальной установки [44]. Ее схема представлена на рисунке 2.9,б.

Согласно предлагаемой методике ток в первичной обмотке исследуемого трансформатора определяется автотрансформатором АТ. Магнитный поток Φ определяется по формуле (2.46):

$$\Phi = U_2 / (4,44fw_2), \quad (2.46)$$

где U_2 и w_2 – напряжение и число витков измерительной обмотки, в качестве которой может использоваться любая вторичная обмотка.

Экспериментальные опыты проводились на однофазном трансформаторе, реализованном на базе трансформатора ТТ-6 мощностью 6,0 кВА [44; 45]. Параметры ТТ-6 представлены в таблице 2.1. На рисунке 2.10 изображена экспериментальная зависимость $\Phi = f(I_0)$, полученная в ходе эксперимента, для максимального значения $I_0 = 0,3$ А. При больших значениях тока I_0 с учетом геометрических построений на рисунке 2.10 расчетное значение магнитного потока определяют путем использования аналитического выражения:

$$\Phi_p = \Phi_k + (\Phi_k - \Phi_n)(I_p - 0,3)/0,3, \quad (2.47)$$

где I_p – принимаемая величина тока в обмотке трансформатора;
 Φ_p – рассчитанное значение магнитного потока в стержне;
 $\Phi_k = 0,00515$ тл и $\Phi_n = 0,00465$ тл.

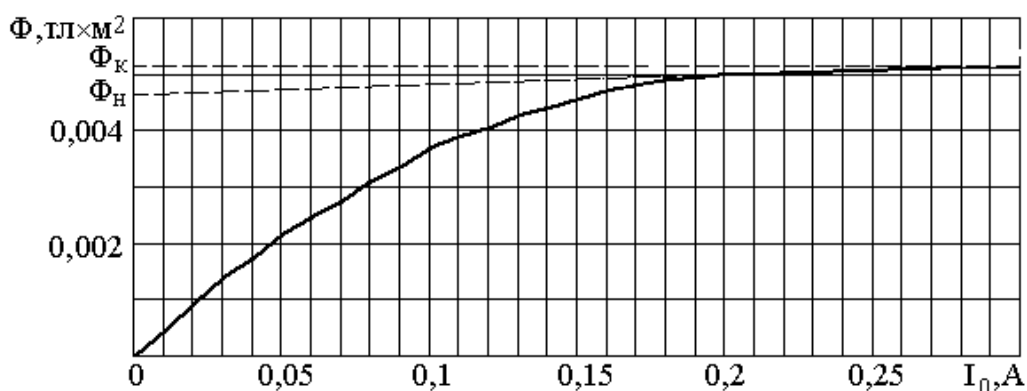


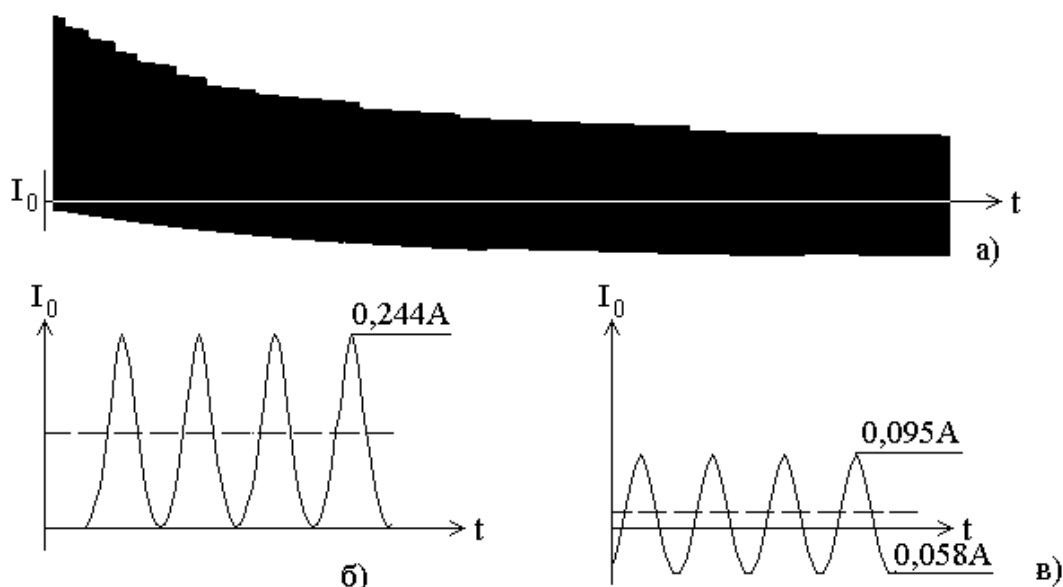
Рисунок 2.10 – Экспериментальная зависимость $\Phi = f(I_0)$ для трансформатора ТТ-6

В среде TurboBasic докторами PhD Рахимбердиновой Д. М., Колесниковым Е. Н и Волгиной Е. М. под руководством д.т.н., профессора Новожилова А. Н., была разработана программа для моделирования токов в первичной обмотке на произвольном трансформаторе.

На рисунках 2.11 и 2.12 представлены результаты моделирования и эксперимента зависимости $I_0 = f(t)$ трансформатора ТТ-6. Причем, на рисунках 2.11,а и 2.12,а изображены зависимости $I_0 = f(t)$ длительностью 13 секунд, а на рисунках 2.11,б, 2.12,б и 2.11,в 2.12,в начало и конец этих зависимостей соответственно.

В соответствии с рисунками 2.11 и 2.12 кривые затухания тока в обмотках в зависимости от времени, полученные экспериментальным и расчетным путями, практически совпадают. Расчетное и экспериментальное значение токов i_0 в начале и конце периода, длительностью 13 секунд, различается не более чем на 10 % [45].

Магнитный поток в стержне и ток в первичной обмотке трансформатора в (2.42) в момент включения его в сеть должны равняться нулю. Этот момент виден на рисунках 2.11,а и 2.11,б. Отсюда следует, что ток I_0 в начальный период переходного процесса является или только положительным, или только отрицательным, как показано на рисунке 2.11,б [45]. Это происходит, если магнитный поток ϕ_1 в стержне на момент включения трансформатора равен не нулю, а магнитному потоку ϕ_{o1} остаточной индукции в стержне сердечника. В данном случае магнитный поток ϕ_1 равен примерно 30 % от периодической составляющей магнитного потока [45].



а – зависимость $I_0 = f(t)$ длительностью 13 секунд; б – начало зависимости $I_0 = f(t)$; в – конец зависимости $I_0 = f(t)$

Рисунок 2.11 – Процесс затухания тока в обмотке, полученный расчетным путем, при включении трансформатора в сеть

Исходя из рисунков 2.11,а и 2.12,а следует, что магнитный поток от остаточной индукции должен затухать аналогично аperiodической составляющей магнитного потока. Отсюда:

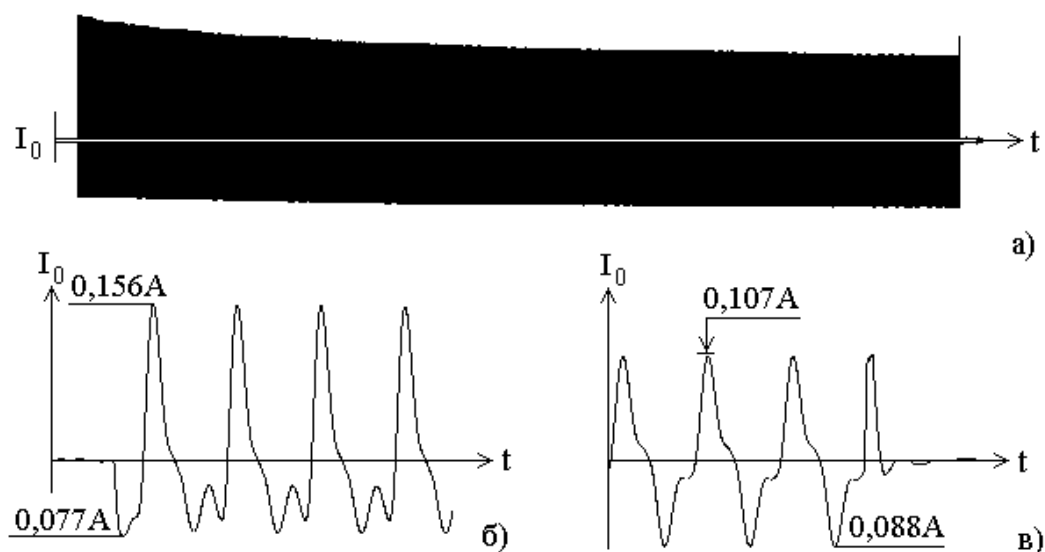
$$\phi_{o1} = -\phi_{o1m} e^{-(R_1/L_m)t}, \quad (2.48)$$

где ϕ_{o1m} – аperiodическая составляющая магнитного потока от остаточной индукции в стержне на момент включения трансформатора в сеть со знаком минус, которую рекомендуется определять по зависимости $\Phi = f(I_0)$ и величине тока в обмотке на момент отключения трансформатора от сети.

Учитывая вышесказанное, магнитный поток в стержне определяется по выражению:

$$\phi_1 = \phi_{п1} + \phi_{a1} + \phi_{o1}, \quad (2.49)$$

Отсюда следует, что величина магнитного потока в стержне может быть наибольшей, если ϕ_{o1} будет совпадать по знаку с потоком ϕ_{a1} , а включение трансформатора произойдет при достижении периодической составляющей тока своего максимума [45]. Тогда ϕ_1 может приблизиться к величине $2,5U_1 / \omega w_1$.



а – зависимость $I_0 = f(t)$ длительностью 13 секунд; б – начало зависимости $I_0 = f(t)$; в – конец зависимости $I_0 = f(t)$

Рисунок 2.12 – Осциллограмма процесса затухания тока в обмотке при включении трансформатора в сеть

В соответствии с этим, наибольший ток в обмотке трансформатора при включении его в сеть с учетом (2.47) и рисунка 2.10 при $\Phi_k = 0,00515$ Тл и $\Phi_H = 0,00465$ Тл определяется по формуле (2.50):

$$I_0 = 0,3[1 + (2,5U_1 / \omega w_1 - \Phi_H) / (\Phi_k - \Phi_H)] = 1,107 \text{ A} \quad (2.50)$$

Таким образом, ток в обмотке трансформатора при включении в сеть может превышать его установившееся значение примерно в 10,3 раза [45].

Убедиться в этом можно по рисунку 2.13, на котором представлена осциллограмма многократного включения экспериментального трансформатора в сеть в режиме холостого хода. Исходя из этого рисунка видно, что максимальное значение тока в обмотке при включении трансформатора в сеть составляет 1,046 А и превышает установившееся значение этого тока в 9,8 раз. Таким образом, рассогласование результатов математического моделирования и эксперимента равно примерно 5 %.

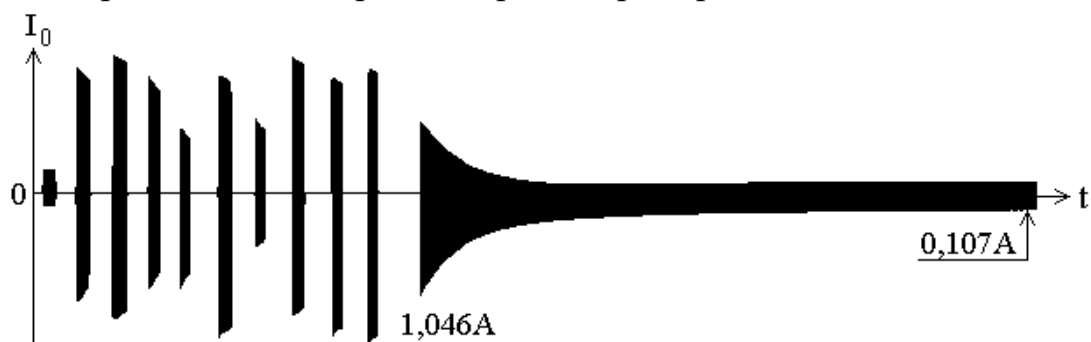
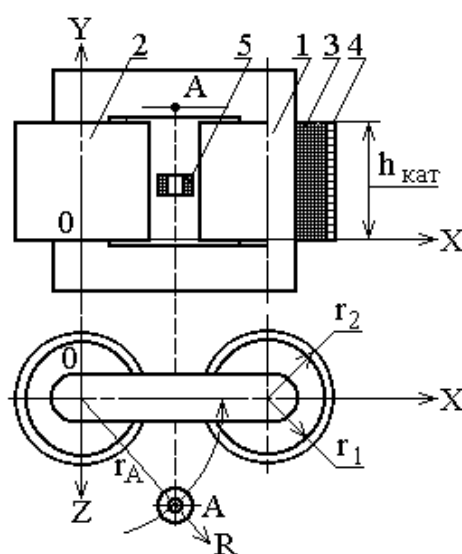


Рисунок 2.13 – Осциллограмма многократного включения экспериментального трансформатора в сеть в режиме холостого хода

3 Совершенствование теории моделирования магнитных полей в комплексе «рудотермическая печь»

3.1 Моделирование магнитного поля рассеяния обмотки трансформатора

В соответствии с [1; 19] широко применяемые токовые защиты трансформаторов от коротких замыканий имеют низкую чувствительность к ВЗ. Более чувствительными к ВЗ в обмотке являются защиты с измерительными преобразователями в виде магнитных трансформаторов тока (МТТ) [1; 19]. Один из примеров расположения МТТ защиты однофазного трансформатора приведен на рисунке 3.1 [46–48].



1 – стержни ферромагнитного сердечника трансформатора; 2 – катушка трансформатора; 3 – многовитковая обмотка высокого напряжения; 4 – одновитковая расщепленная обмотки низкого напряжения; 5 – магнитный трансформатор тока.

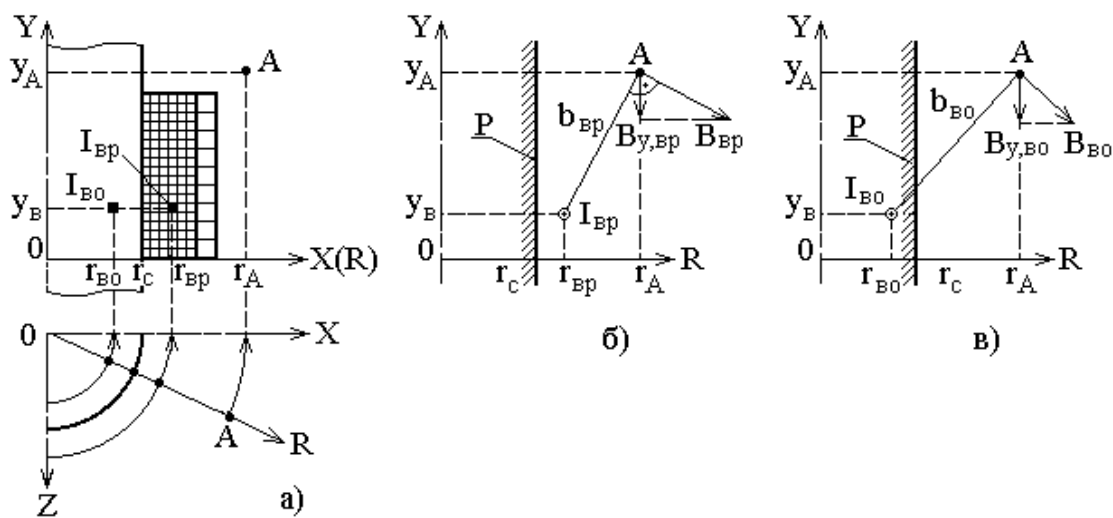
Рисунок 3.1 – Расположение МТТ защиты трансформатора

Однако для расчета параметров МТТ, например, ЭДС и размеров, необходим метод моделирования аксиальной составляющей магнитного поля рассеяния обмоток трансформатора в эксплуатационном режиме работы и при ВЗ. Аксиальная составляющая магнитного поля рассеяния располагается вдоль оси Y в принятой для расчета магнитных полей декартовой системе координат [47].

Как правило, стержни магнитопровода у большинства трансформаторов являются круглыми, а все его катушки одинаковыми. Магнитное поле рассеяния обмоток такой катушки складывается из магнитных полей отдельных витков. Отсюда следует, что при наличии сведений о токах в витках и их пространственном расположении, а также метода моделирования магнитного поля витка с током на ферромагнитном стержне представляется возможным произвести моделирование магнитного поля произвольной катушки. Однако согласно [49; 50] точно решить задачу по определению магнитного поля рассеяния витка на ферромагнитном стержне не представляется возможным.

В соответствии с этим, для решения данной задачи используется метод зеркальных изображений [35; 47; 48], согласно которому поверхность ферромагнитного стержня разворачивают в плоскость P , перпендикулярную оси R [47; 48], как показано на рисунке 3.2,а.

Проводник витка и его отражение поворачиваются в прямолинейные проводники, параллельные этой плоскости. Соответствующие схемы для моделирования магнитных полей проводника и его отражения представлены на рисунках 3.2,б и 3.2,в.



а – поверхность ферромагнитного стержня в плоскости P ; б – схема для моделирования магнитных полей проводника; в – схема для моделирования магнитных полей отраженного проводника

Рисунок 3.2 – Расчетные схемы для моделирования магнитного поля рассеяния витка с током

Таким образом, аксиальную составляющую индукции магнитного поля витка с током можно определить из выражения:

$$B_{y,v} = B_{y,vp} + B_{y,vo}, \quad (3.1)$$

где $B_{y,vp}$ и $B_{y,vo}$ – аксиальная составляющая индукции магнитного поля реального и отраженного проводников с токами I_{vp} и I_{vo} .

Если допустить, что магнитная проницаемость стали магнитопровода трансформатора равна бесконечности, то согласно [35] ток I_{vo} в отраженном витке будет равен току I_{vp} в реальном витке. Это допущение вносит погрешность в расчете магнитного поля витка, не превышающую 0,5–1,0 %.

Аксиальные составляющие индукции магнитного поля реального и отраженного проводников в точке А в соответствии с законом Био-Савара-Лапласа [47; 48] и рисунками 3.2,б и 3.2,в определяются:

$$B_{y,vp} = \frac{I_{vp}\mu_0}{2\pi b_{vp}} \frac{|r_A - r_{vp}|}{b_{vp}} \frac{r_{vp}}{r_A} \text{ и} \quad (3.2)$$

$$B_{y,vo} = \frac{I_{vo}\mu_0}{2\pi b_{vo}} \frac{|r_A - r_{vo}|}{b_{vo}} \frac{r_{vo}}{r_A}, \quad (3.3)$$

где μ_0 – магнитная проницаемость вакуума;

r_c и r_A – радиусы стержня магнитопровода и окружности, на которой расположена точка А;

r_{vp} и r_{vo} – радиусы реального и отраженного витков с током;

y_B – координата Y витка с током.

Расстояние от точки А до реального и отраженного проводников с током:

$$b_{vp} = \sqrt{(r_A - r_{vp})^2 + (y_A - y_B)^2}, \quad (3.4)$$

$$b_{vo} = \sqrt{(r_A - r_{vo})^2 + (y_A - y_B)^2}. \quad (3.5)$$

Из отношений $|r_A - r_{вр}|/b_{вр}$ и $r_{вр}/r_A$ в уравнениях (3.2) и (3.3) для реального проводника следует отношение $B_{у,вр}$ к $B_{вр}$, а также степень уменьшения величины магнитного поля линейного проводника на расстоянии r_A при его изгибе до радиуса $r_{вр}$. Выше указанные соотношения актуальны и для отраженного витка.

Координаты x_A , y_A и z_A в текущей системе координат описывают положение точки А. Отсюда радиус окружности, на которой находится точка А при заданных координатах x_A и z_A , определяется как:

$$r_A = \sqrt{x_A^2 + z_A^2} \quad (3.6)$$

Проверка адекватности этой математической модели по определению аксиальной составляющей индукции магнитного поля рассеяния витка с током осуществлялась на экспериментальном однофазном трансформаторе ТТ-6 мощностью 6,0 кВА путем сопоставления результатов моделирования и эксперимента [47; 48]. В таблице 3.1 представлены геометрические размеры этого трансформатора, необходимые для моделирования аксиальной составляющей индукции магнитного поля рассеяния от витка с током.

Таблица 3.1 – Геометрические размеры экспериментального трансформатора ТТ-6 необходимые для моделирования магнитного поля рассеяния витка с током

Геометрические размеры трансформатора	Величина
Радиус стержня магнитопровода r_c , м	0,044
Радиус витка с током $r_{вр}$, м	0,066
Радиус отражения витка с током $r_{во}$, м	0,022
Радиус окружности, на которой расположена точка А, м	0,078

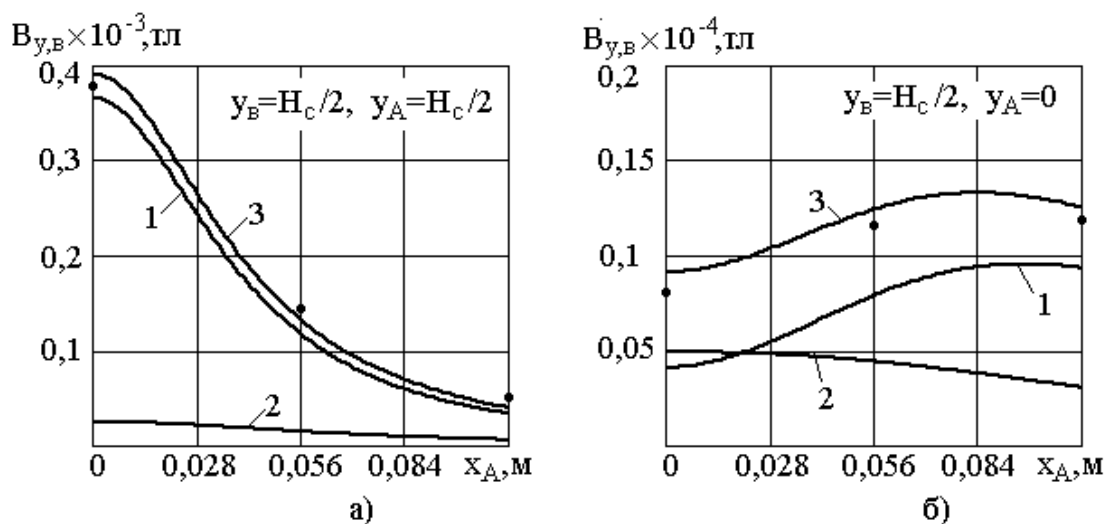
Измерение индукции магнитного поля рассеяния витка с током осуществлялось с помощью катушки из промежуточного реле РП-11 с количеством витков $w_{МТТ} = 12500$ витков [51; 52]. Причем индукция магнитного поля определяется:

$$B_{у,в} = E_{МТТ} / (4,44 f_c w_{МТТ} Q_{МТТ}), \quad (3.7)$$

где $E_{\text{МТТ}}$ – действующее значение ЭДС МТТ;
 f_c – частота тока в сети;
 $w_{\text{МТТ}}$ и $Q_{\text{МТТ}}$ – число витков и усредненная площадь витка обмотки МТТ.

Аксиальные составляющие индукции магнитного поля рассеяния витка с током $I_B = 26\text{А}$ с координатами $y_B = H_c/2$ $y_A = H_c/2$ и $y_B = H_c/2$ $y_A = 0$, полученные расчетным и экспериментальным путями, представлены на рисунках 3.3,а и 3.3,б. Линии 1, 2 и 3 на рисунке 3.3 обозначают зависимости $V_{y,\text{вр}} = f(x)$, $V_{y,\text{во}} = f(x)$ и $V_y = f(x)$, которые были получены расчетным путем, а точки – экспериментальные зависимости $V_y = f(x)$ [47; 48].

Анализ расчетных и экспериментальных данных на рисунках 3.3 показывает, что погрешность моделирования аксиальной составляющей магнитных полей рассеяния витка с током на ферромагнитном стержне выше описанным методом не превышает 10 %.



а – аксиальные составляющие индукции магнитного поля витка с координатами $y_B = H_c/2$ $y_A = H_c/2$; б – аксиальные составляющие индукции магнитного поля витка с координатами $y_B = H_c/2$ $y_A = 0$

Рисунок 3.3 – Результаты моделирования и эксперимента аксиальной составляющей магнитного поля рассеяния витка с током

Аксиальную составляющую магнитного поля рассеяния катушки двухобмоточного трансформатора на круглом стержне магнитопровода трансформатора можно определить, сложив значения магнитные поля всех ее витков:

$$\dot{B}_{y,об} = \dot{B}_{y,об1} + \dot{B}_{y,об2} = \sum_{k=1}^{w_1} \dot{B}_{y,k} + \sum_{n=1}^{w_2} \dot{B}_{y,n}, \quad (3.8)$$

где w_1 и w_2 – число витков в первичной и вторичной обмотках;
 $B_{y,об1}$ и $B_{y,об2}$ – аксиальные составляющие магнитного поля рассеяния первичной и вторичной обмотки.

При условии работы трансформатора в режиме холостого хода составляющая $B_{y,об2}$ в выражении (3.8) будет равна нулю, а для точного определения $B_{y,об}$ необходимы координаты каждого витка и величина тока в нем. В таблице 3.2 приведены геометрические размеры экспериментального трансформатора, необходимые для моделирования аксиальной составляющей индукции магнитного поля рассеяния от тока в первичной обмотке равного 0,095 А.

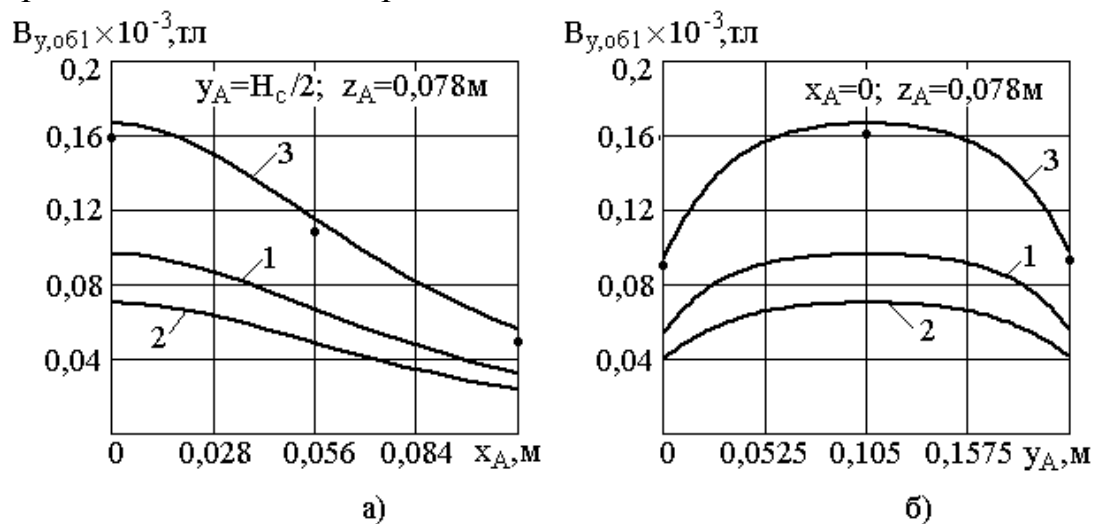
Таблица 3.2 – Геометрические размеры экспериментального трансформатора необходимые для моделирования магнитного поля первичной обмотки

Геометрические размеры трансформатора	Величина
Расстояние между стержнями магнитопровода T_c , м	0,112
Радиус стержня магнитопровода r_c , м	0,044
Длина стержня магнитопровода h_c , м	0,13
Внешний радиус обмотки высокого напряжения r_1 , м	0,054
Длина первичной обмотки $h_{кат}$, м	0,1
Число витков в первичной обмотке w_1 , вит	146x2
Диаметр провода первичной обмотки d_{w1} , мм	2,26
Число рядов в обмотке	4
Число проводников в ряду	37
Радиус окружности, на которой расположена точка А, м	0,078

Представленные в таблице 3.2 параметры позволяют с высокой точностью определить положение каждого витка на рисунках 3.2.

Аксиальные составляющие индукции магнитного поля рассеяния первичной обмотки однофазного экспериментального трансформаторов в режиме холостого хода $V_{y,об1} = f(x_A)$ при $y_A = H_c / 2$ и $z_A = 0,078\text{м}$, полученная расчётным и экспериментальным методами, приведена на рисунке 3.4,а, а зависимость $V_{y,об1} = f(y_A)$ при $x_A = 0$ и $z_A = 0,078\text{м}$ – на рисунке 3.4,б.

На рисунках 3.4 линии 1, 2 и 3 – это зависимости $V_{y,об1,p} = f(x_A)$, $V_{y,об1,o} = f(x_A)$ и $V_{y,об1} = f(x_A)$, получившиеся в ходе расчета, а точки – экспериментальные зависимости $V_{y,об1} = f(x_A)$, где $V_{y,об1,p}$, $V_{y,об1,o}$ и $V_{y,об1}$ – аксиальная составляющая индукции магнитного поля от реальной обмотки, отраженных витков и ее расчетное значение.



а – аксиальные составляющие индукции магнитного поля первичной обмотки при координатах $y_A = H_c / 2$ и $z_A = 0,078\text{м}$; б – аксиальные составляющие индукции магнитного поля первичной обмотки при координатах $x_A = 0$ и $z_A = 0,078\text{м}$

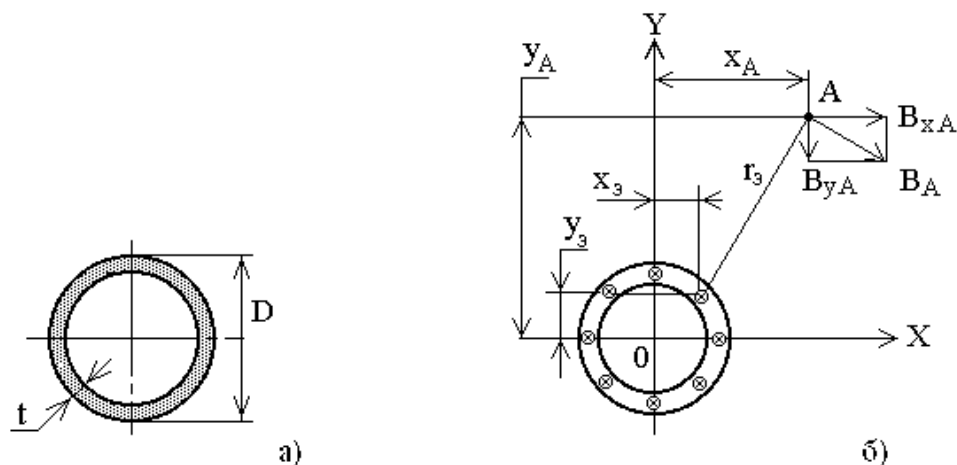
Рисунок 3.4 – Результаты моделирования аксиальной составляющей магнитного поля рассеяния трансформатора ТТ-6 в режиме холостого хода

Анализ рисунков 3.4 показывает, что погрешность моделирования $V_{y,об1} = f(x_A)$ при заданных условиях составляет не более 5–10 %. [47; 48], что отвечает требованиям релейной защиты.

3.2 Моделирование магнитного поля трубошины

В соответствии с разделом 1.5 [1; 31; 41; 53], магнитные трансформаторы тока имеют преимущества перед ТТ. Однако, для реализации на рудотермическом производстве защиты токопровода из одной шины от коротких замыканий на МТТ нужен простой и точный способ моделирования магнитного поля шины с током.

Как упоминалось в разделе 1.3, самой длинной и самой напряженной неподвижной частью короткой сети рудотермических электропечей является шинный пакет. Шинный пакет выполняется в виде пакета из плоских шин или трубошин. Как известно [6; 15], трубошины в отличие от прямоугольных шин обладают повышенной индуктивностью. Однако они применяются шире благодаря водяному охлаждению, которое позволяет использовать рудотермические печи большой мощности. Форма поперечного сечения трубчатой шины, используемой в рудотермическом производстве, приведена на рисунке 3.5,а.



а – форма поперечного сечения трубошины; б – расчетная схема для моделирования

Рисунок 3.5 – Поперечное сечение трубошины

Правильное соотношение толщины стенки t и диаметра трубы D обуславливает хороший отвод тепла и механическую прочность. Пример схемы соединения печного трансформатора и электродов печи посредством трубошин приведен на рисунке 1.10. В соответствии с [6; 15] трубошины размещаются на опорных стержневых или штыревых изоляторах, а также могут крепиться к опорным конструкциям на подвесных изоляторах.

Предлагаемый метод моделирования магнитного поля шины с произвольным сечением основывается на методе Био-Савара-Лапласа [35; 54]. Тогда индукция магнитного поля элементарного проводника бесконечной длины с током определяется как:

$$B_{\vartheta} = \mu_0 I_{\vartheta} / (2\pi r_{\vartheta}), \quad (3.9)$$

где μ_0 – магнитная проницаемость вакуума;

r_{ϑ} – расстояние от элементарного проводника с током I_{ϑ} до точки A , в которой рассчитывается индукция магнитного поля.

При помощи катушки от реле РП-11 [51; 55; 56], помещенной в магнитное поле, производились замеры ЭДС E . Экспериментальные значения индукции магнитного поля получаются после подстановки измеренного значения в уравнение [54]:

$$B_A = \frac{E_A}{4,44 f_c w_k a_x a_y} = \frac{E_{\Phi}}{k_w}, \quad (3.10)$$

где E_A – действующее значение ЭДС измерительной катушки в точке A ;

f_c – частота сети;

w_k – число витков катушки;

a_x и a_y – размеры витка катушки вдоль осей X и Y .

Параметры РП-11 приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Параметры измерительной катушки

Тип реле	Усредненные размеры витка катушки, $a_x \times a_y$, м	Число витков w_k , ВИТ	Коэффициент k_w
РП-11	0,026×0,021м	12500	1515

Для трубошины с бесконечной длиной с учетом закона Био-Савара-Лапласа [35; 54] и расчетной схемы, приведенной на рисунке 3.5,б, составляющие индукции магнитного поля в точке A рассчитываются приближенно, как магнитное поле от N элементарных проводников с током I_{ϑ} [54]:

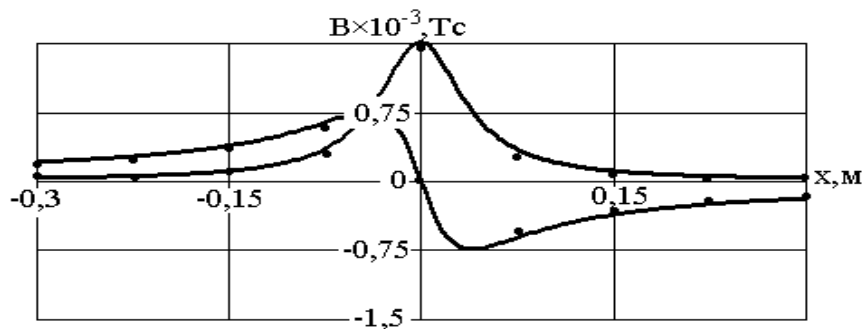
$$B_x = \sum_{n=1}^N \frac{\mu_0 I_{\text{ш}}}{2\pi r_{\text{эн}}} \frac{|y_A - y_{\text{эн}}|}{r_{\text{эн}}} \quad \text{и} \quad B_y = \sum_{n=1}^N \frac{\mu_0 I_{\text{ш}}}{2\pi r_{\text{эн}}} \frac{|x_A - x_{\text{эн}}|}{r_{\text{эн}}}, \quad (3.11)$$

где $r_{\text{эн}} = \sqrt{(y_A - y_{\text{эн}})^2 + (x_A - x_{\text{эн}})^2}$ – расстояние между n -ым элементарным проводником шины с током $I_{\text{ш}}/N$ и точкой A ;

x_A и y_A – координаты точки A ;

$I_{\text{ш}}$ – ток в шине.

На рисунке 3.6 представлены результаты моделирования составляющих индукции магнитного поля круглой шины шириной диаметром 0,06 м при расстоянии $y_A = 0,04$ м и токе в ней $I_{\text{ш}} = 300$ А [54], где «•» обозначены результаты эксперимента зависимостей $B_{xA} = f(x_A)$ и $B_{yA} = f(x_A)$.



1 – зависимость $B_{xA} = f(x_A)$; 2 – $B_{yA} = f(x_A)$

Рисунок 3.6 – Зависимость составляющих индуктивности магнитного поля круглой шины от координаты x_A

В результате анализа расчетных и экспериментальных зависимостей видно, что погрешность моделирования с помощью предложенной методики не больше 5–7 % [54].

3.3 Моделирование магнитного поля пакета трубошин короткой сети

Построение защит короткой сети от обрыва в цепи ее трубошин и КЗ между трубошинами с МТТ [56; 57] невозможно без простого, достаточно точного метода моделирования магнитного поля пакета трубошин в различных режимах работы. Пример пространственного расположения трубошин в пакете короткой сети и распределение

токов в этих шинах и присоединенных к ним вторичных обмотках печного трансформатора приведено на рисунке 2.5.

Если допустить, что пакет трубок имеет бесконечную длину, размеры трубки стремятся к нулю, а ток в ней I_3 , то тогда для моделирования магнитного поля такого пакета трубок можно воспользоваться расчетной схемой приведенной на рисунке 3.7,а [56; 57].

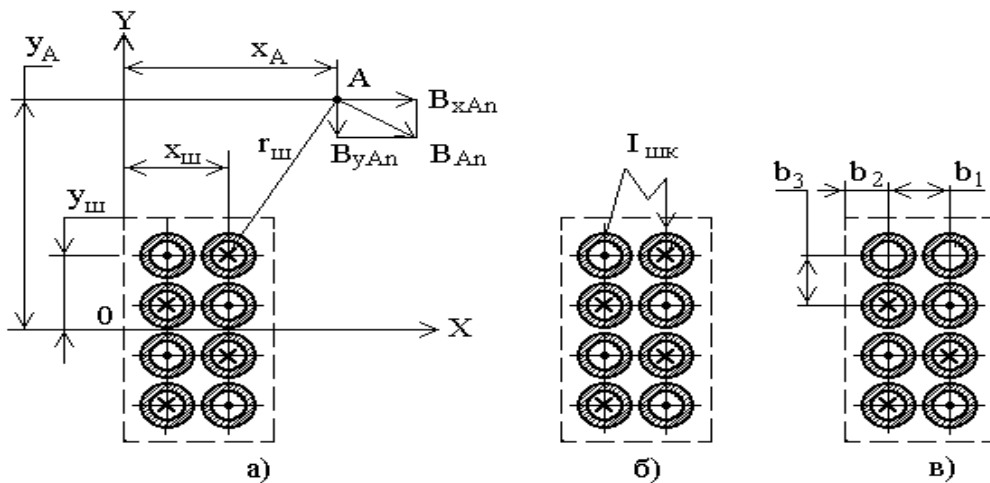
Тогда с учетом закона Био-Савара-Лапласа [35] и схемы расположения проводников в плоскости на рисунке 3.7,а составляющие магнитного поля n -й трубки определяются как [34; 56; 57]:

$$B_{xA_n} = \frac{\mu_0 I_3}{2\pi r_{шн}} \frac{|y_A - y_{шн}|}{r_{шн}} \quad \text{и} \quad B_{yA_n} = \frac{\mu_0 I_3}{2\pi r_{шн}} \frac{|x_A - x_{шн}|}{r_{шн}}, \quad (3.12)$$

где $r_{шн} = \sqrt{(x_A - x_{шн})^2 + (y_A - y_{шн})^2}$;

$x_{шн}$ и $y_{шн}$ – координаты n -й трубки;

x_A и y_A – координаты точки А, в которой рассчитывается магнитное поле.



а – расчетная схема для моделирования магнитного поля; б – пакет трубок при коротком замыкании; в – пакет трубок при обрыве гибкой связи

Рисунок 3.7 – Расчетная схема для моделирования магнитного поля от токов в пакете трубок короткой сети

Тогда составляющие магнитного поля от пакета из N трубошин будут равны:

$$B_{xA} = \sum_{n=1}^N B_{xA_n} \text{ и } B_{yA} = \sum_{n=1}^N B_{yA_n} . \quad (3.13)$$

Моделирование магнитного поля шинного пакета достаточно просто реализуется, например, в среде Turbo BASIC [43] или Matlab. Основой для моделирования индукции магнитного поля пакета трубошин служат математические выражения (3.13), по которым рассчитываются величины его горизонтальной B_x и вертикальной B_y составляющих. Если шинный пакет не поврежден, то токи во всех парах трубошин принимаются одинаковыми и определяются как $I_{2n} = I_2 / G$. При возникновении ДЗ о ток в неповрежденных парах трубошин считается неизменным, а в паре поврежденных трубошин ток до места возникновения ДЗ и за этим местом определяется как $I_{2n} = I'_{2.к} = 2I_2 / G$ и $I_{2n} = I''_{2.к} = 0,95I'_{2.к}$ соответственно.

Оценка пригодности предлагаемой математической модели для определения параметров МТТ токовых защит осуществлялась путем сопоставления результатов расчета и эксперимента. Эксперименты проводились на короткой сети печного трансформатора марки ЭОЦНК 16000/10-К. В качестве главного и вольтодобавочного трансформаторов в нем использовались трансформаторы ЭОТЦ 10100/10 и ЭОЦ 5700/10 [56; 57]. Этот трансформатор имеет семнадцать ступеней регулирования и восемь расщеплениями вторичной обмотки при токе I_2 в шинном пакете равном 30000А. Для шинного пакета величины b_1 и b_2 принимались равными 0,08м, диаметр $d_{2,n}$ трубошины и ток $I_{2,n}$ в ней соответственно равны 0,06м и $I_{2n} = I_2 / G = 3750\text{А}$, где I_2 - ток в шинном пакете.

Результаты расчета распределения составляющих магнитного поля пакета трубошин вдоль оси Y при координате $x_A = 2b_1 + 0,03\text{м}$ на первой ступени регулирования в нормальном режиме при $G=8$ приведены на рисунке 3.8. Точками здесь показаны результаты эксперимента.

Из рисунка 3.8 видно, что погрешность моделирования с помощью предложенной модели не превышает порядка 10 %.

В связи с этим для определения места расположения МТТ относительно шинного пакета, числа обмоток и их размеров будет использоваться именно эта математическая модель.

Определение места расположения МТТ относительно шинного пакета осуществляется по результатам моделирования зависимостей $B_x = f(y)$ и $B_y = f(y)$ в нормальном режиме работы и при КЗ в пятом–восьмом расщеплениях вторичной обмотки, которые приведены на рисунках 3.9–3.12 соответственно. При этом результаты моделирования зависимостей $B_x = f(y)$ и $B_y = f(y)$ в области пары шин с током $\dot{I}'_{2..k}$ приведены на рисунках 3.9,а – 3.12,а, а эти результаты в области пары шин с током $\dot{I}''_{2..k}$ приведены на рисунках 3.9,б – 3.12,б.

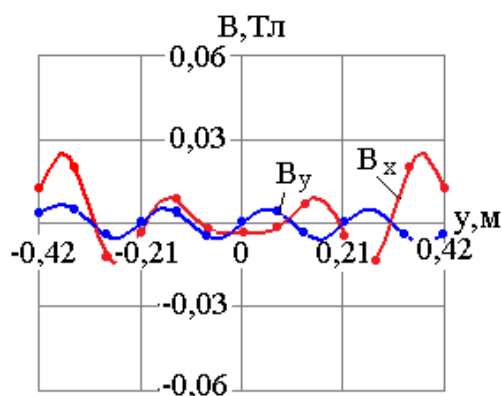


Рисунок 3.8 – Результаты моделирования магнитного поля пакета трубошин в нормальном режиме

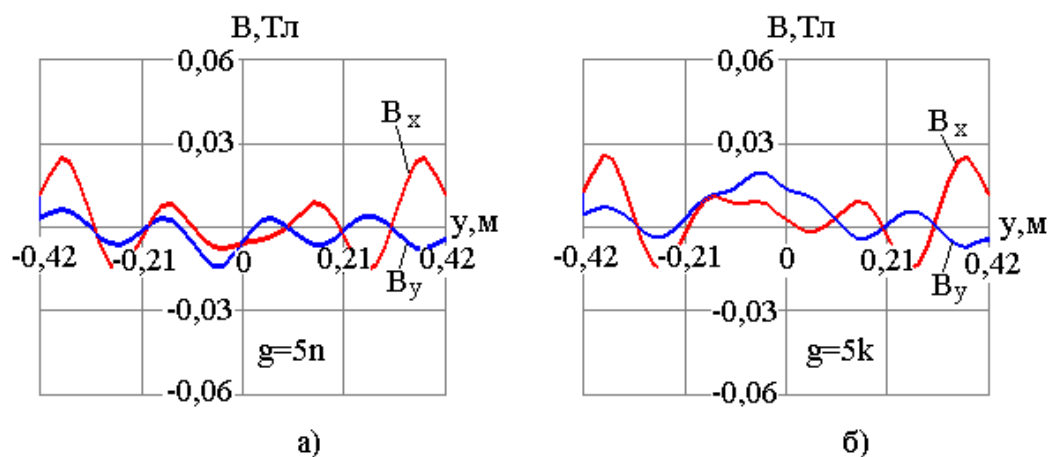


Рисунок – 3.9. Результаты моделирования составляющих магнитного поля шинного пакета при КЗ в цепи пятого расщепления до (а) и после (б) точки КЗ

Из анализа результатов моделирования вертикальной составляющей магнитного поля шинного пакета приведенных на рисунках 3.8–3.12 видно, что в неповрежденном шинном пакете при $Y = 0$ зависимость $B_y = f(y)$ равна нулю, а при появлении КЗ она отличается от нуля.

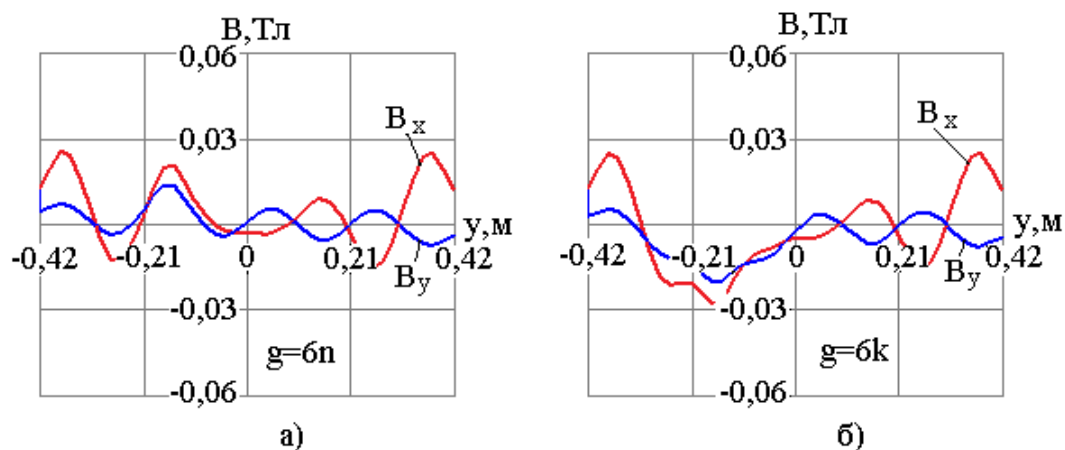


Рисунок 3.10 – Результаты моделирования составляющих магнитного поля шинного пакета при КЗ в цепи шестого расщепления до (а) и после (б) точки КЗ

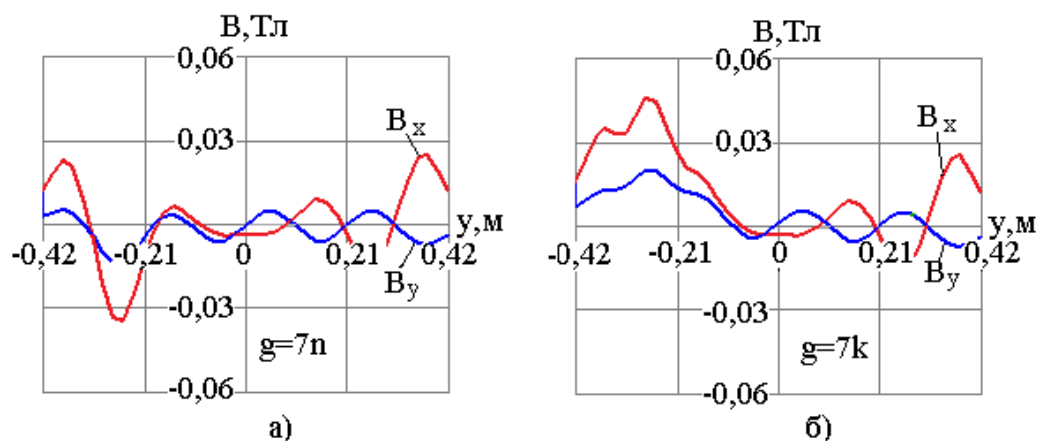


Рисунок 3.11 – Результаты моделирования составляющих магнитного поля шинного пакета при КЗ в цепи седьмого расщепления до (а) и после (б) точки КЗ

Эту особенность зависимости $B_y = f(y)$ в [22] используют для построения токовой защиты шинного пакета короткой сети от КЗ на одном МТТ. В соответствии с [22], МТТ такой защиты следует размещать в произвольной точке А, имеющей координату $y_A = 0$. При этом с целью улучшения его выходных характеристик МТТ

размещают как можно ближе к шинному пакету. Расчетные значения величины B_y в точке А с координатой $x_A=0,21$ м при КЗ в различных парах трубошин приведены в первой строке таблице 3.4.

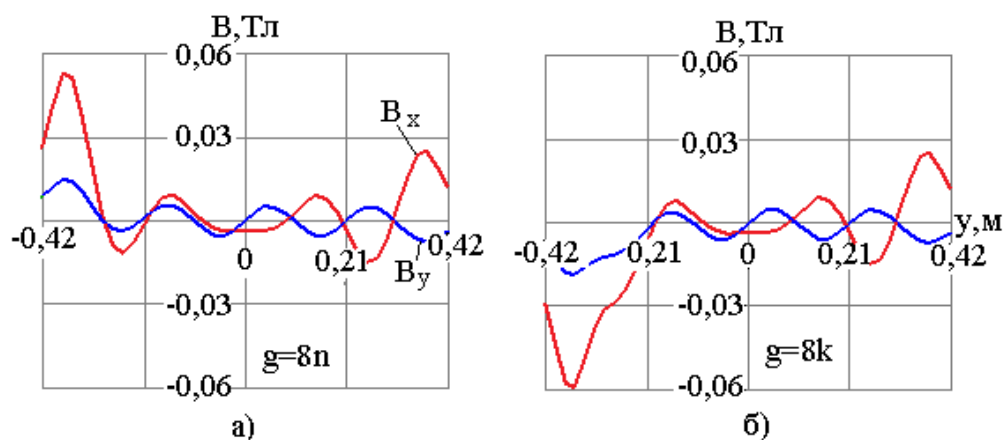


Рисунок 3.12 – Результаты моделирования составляющих магнитного поля шинного пакета при КЗ в цепи восьмого расщепления до (а) и после (б) точки КЗ

Результаты расчета распределения составляющих магнитного поля пакета трубошин вдоль оси Y при координате $x_A = 2b_1 + 0,03$ м на первой ступени регулирования при обрыве цепи восьмой паре трубошин приведены на рисунке 3.13 [56].

Таблица 3.4 - Результаты моделирования составляющих магнитного поля шинного пакета

Номер поврежденного расщепления	5	6	7	8
Величина B_y в точке $Y = 0$ при токах $\dot{I}'_{2..к} / \dot{I}''_{2..к}$ В поврежденном расщеплении, Тл	$\frac{-0,00465}{0,01396}$	$\frac{0,00090}{-0,00270}$	$\frac{-0,00017}{0,00099}$	$\frac{0,00017}{-0,00050}$
Величина ΔB_x рассчитанная по (3) и (4) при токе $\dot{I}'_{2..к} / \dot{I}''_{2..к}$ В поврежденном расщеплении, Тл	$\frac{-0,00079}{0,00238}$	$\frac{0,00348}{-0,01044}$	$\frac{-0,00593}{0,01779}$	$\frac{0,00737}{-0,02211}$

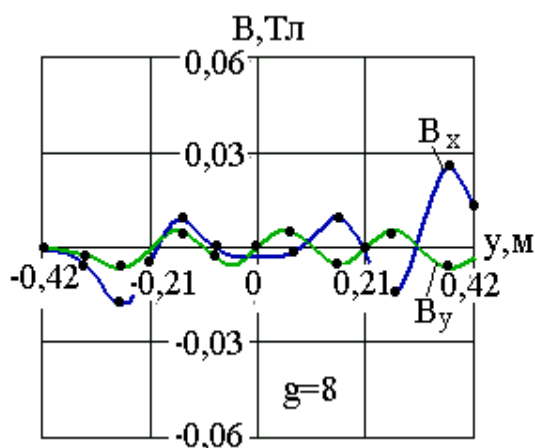


Рисунок 3.13 – Результаты моделирования магнитного поля пакета трубошин при обрыве гибкой связи

Из рисунка 3.8 также видно, что в нормальном режиме работы короткой сети зависимость $B_x = f(y)$ симметрична относительно оси X , а зависимость $B_y = f(y)$ при координате $y = 0$ равна нулю.

Из рисунков 3.9-3.13 видно, что зависимости $B_x = f(y)$ при этих видах повреждений становятся несимметричными относительно оси X . Причем эта несимметрия значительна. При этом зависимость $B_y = f(y)$ при координате $y = 0$ значительно отличается от нуля. Это служит подтверждением того, что контроль распределения составляющих индукции магнитного поля может использоваться при построении защиты шинного пакета короткой сети от электрических повреждений.

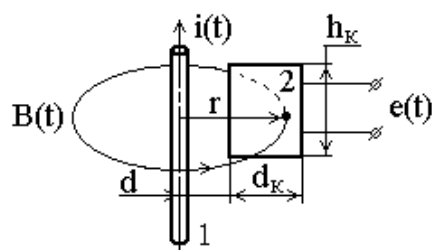
Эти особенности распределения составляющих индукции магнитного поля могут быть использованы для построения защиты шинного пакета короткой сети от электрических повреждений [56; 57].

4 Совершенствование основ построения защит комплекса «рудотермическая печь»

4.1 Особенности построения магнитных трансформаторов тока

Согласно [3; 31; 58–61] к достоинствам трансформаторов тока относятся достаточно высокая точность измерения, значительная отдаваемая мощность и помехоустойчивость к воздействию внешних магнитных полей. К недостаткам ТТ следует отнести высокую стоимость, а также большие габариты, препятствующие установке его на некоторые виды электрического оборудования. В связи с этим существуют ограничения по числу и размерам места установки ТТ, рассчитанных на большие токи, при реализации дифференциальных токовых защитах многофазных электрических установок. К таким электрическим установкам относятся печной трансформатор и короткая сеть рудотермических печей ферросплавного производства.

Многие из перечисленных недостатков, присущих ТТ, отсутствуют у магнитных трансформаторов тока различного вида [31; 41; 61]. Схема, поясняющая работу МТТ, представлена на рисунке 4.1, в которой по проводу 1 проходит контролируемый ток $i(t)$, который создает магнитное поле и индуцирует в обмотке 2 ЭДС $e(t)$.



1 – провод высокого напряжения; 2 – обмотка МТТ

Рисунок 4.1 – Схема работы МТТ

Преимуществом данной схемы измерения тока является возможность установки обмотки МТТ на заземленных элементах конструкции электрического устройства на безопасном расстоянии от проводника с контролируемым током $i(t)$ [1; 17].

Конструкция МТТ, как правило, зависит от назначения [1; 58, 59]. Обычно для защиты обмоток трансформаторов от ВЗ используются МТТ с распределенной или сосредоточенной в нескольких местах

обмоткой. Для построения защит многофазных токопроводов используются МТТ с изолированным корпусом.

Конструкция МТТ с распределенной обмоткой показана на рисунке 4.2. Она состоит из текстолитовой несущей рейки квадратного или круглого сечения длиной H_c и обмотки, которая устанавливается на этой рейке [58; 59; 60].

Если допустить, что распределенная по всей длине несущей рейки однослойная обмотка имеет постоянный шаг $T_{\text{МТТ}}$ и постоянную площадь $S_{\text{МТТ}}$ витка, то тогда ЭДС $E_{\text{МТТ},i}$ этого МТТ с числом витков $w_{\text{МТТ}}$ от i -го витка обмотки трансформатора с током $I_{\text{об}}$ и координатой y_i можно определить как

$$E_{\text{МТТ},i} = 4,44 f_c S_{\text{МТТ}} \sum_{j=1}^{w_{\text{МТТ}}} B_{y,j} \cdot \quad (4.1)$$

где $B_{y,j}$ – индукция магнитного поля в плоскости j -го витка МТТ от i -го витка обмотки трансформатора.

Зависимость ЭДС МТТ $E_{\text{МТТ},i} = f(y_i)$ приведена на рисунке 4.2.

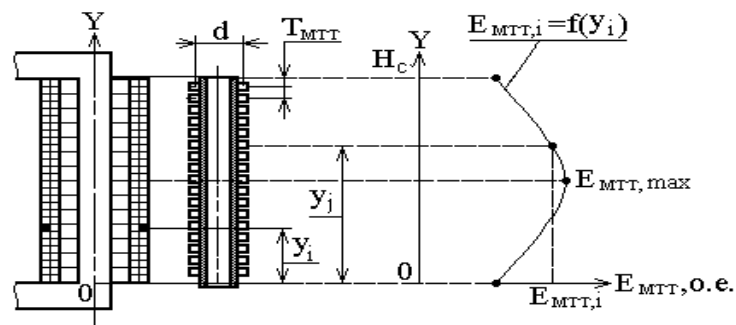


Рисунок 4.2 – МТТ, распределенная обмотка которого имеет постоянный шаг и постоянную площадь витка

С учетом (4.2) ЭДС $E_{\text{МТТ}}$ обмотки МТТ от обмотки трансформатора с числом витков w_1 можно определить как

$$E_{\text{МТТ}} = 4,44 f_c S_{\text{МТТ}} \sum_{i=1}^{w_1} \sum_{j=1}^{w_{\text{МТТ}}} B_{y,ij} \cdot \quad (4.2)$$

Если допустить, что однослойная обмотка МТТ намотана на несущую рейку с прямоугольным поперечным сечением $a_x \times a_z$ проводом диаметром $d_{пр}$, то тогда шаг обмотки МТТ и число витков его обмотки определяются как:

$$T_{МТТ} \approx 1,05d_{пр} \text{ и } w_{МТТ} = H_c / T_{МТТ}. \quad (4,3)$$

Комплексное сопротивление обмотки МТТ:

$$Z_{МТТ} = R_{МТТ} + jX_{МТТ}, \quad (4.4)$$

где $R_{МТТ}$ и $X_{МТТ}$ – активное и индуктивное сопротивления обмотки МТТ.

Активное сопротивление обмотки МТТ $R_{МТТ}$ проще всего получить путем его замера мостом постоянного тока.

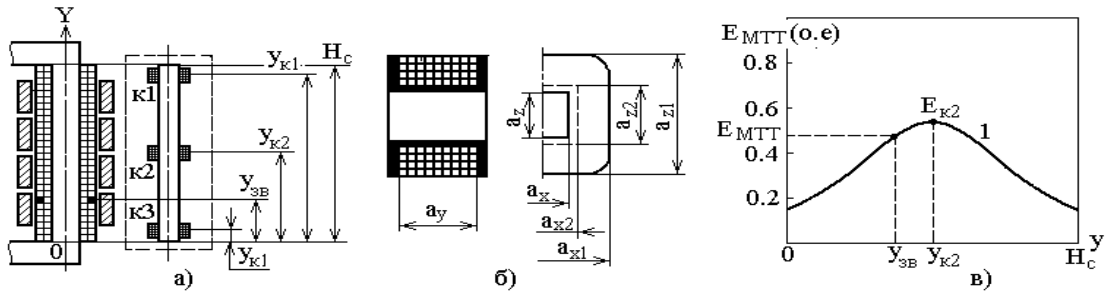
Индуктивное сопротивление обмотки МТТ $X_{МТТ}$ можно рассчитать по-разному. Наиболее просто это сделать с помощью аналитических выражений из [14]. В этом случае индуктивность и индуктивное обмотки МТТ:

$$L_{МТТ} = \frac{\mu_0}{2\pi} w_{МТТ}^2 [a_x (\varphi_{ax} - \psi_{ax}) + a_z (\varphi_{az} - \psi_{az})] \text{ и} \\ X_{МТТ} = 2\pi f_c L_{МТТ} \quad (4.5)$$

где φ_{ax} и φ_{az} – находят по зависимостям $\varphi_{ax} = f(\gamma_{ax})$ и $\varphi_{az} = f(\gamma_{az})$ при $\gamma_{ax} = a_x / H_c$ и $\gamma_{az} = a_z / H_c$, а ψ_{ax} и ψ_{az} находят по зависимостям $\delta_{ax} = f(\gamma_{ax})$ и $\delta_{az} = f(\gamma_{az})$ при $\gamma_{ax} = a_x / H_c$ и $\gamma_{az} = a_z / H_c$.

Из рисунка 4.2 видно, что величина ЭДС $E_{МТТ,i}$ МТТ зависит от места расположения y_i i -го витка в обмотке трансформатора. Что, несомненно, отразится на таком параметре защиты как чувствительность. Значительно уменьшить зависимость $E_{МТТ,i} = f(y_i)$ можно, если использовать распределенную обмотку МТТ с переменным шагом или переменной плоскостью витка [1], а также МТТ с сосредоточенной обмоткой.

Конструкция МТТ с сосредоточенной в нескольких местах обмоткой приведена на рисунке 4.3 [62]. Такая обмотка выполняется из нескольких катушек, которые также размещаются на текстолитовой рейке. Обмотки этих катушек соединяются согласно последовательно. Реализация такого МТТ сводится к выбору конструкции и числа катушек, витков в них, а также места размещения этих катушек на текстолитовой рейке.



а – конструкция МТТ с сосредоточенной обмоткой; б – размещение катушек

Рисунок 4.3 – МТТ с сосредоточенной в нескольких местах обмоткой

В качестве катушек для обмотки МТТ можно использовать выпускаемые серийно катушки от промежуточных реле. Как видно из рисунка 4.3,б такие катушки имеют жесткий каркас и устойчивы к высоким температурам. Каркас катушки имеет клеммы, которые спаиваются с коммутационными проводниками. Проводники, в свою очередь, соединяют обмотки всех катушек в обмотку МТТ.

Параметры катушек от некоторых промежуточных реле приведены в таблице 4.1 [51].

Таблица 4.1 – Технические данные катушек от промежуточных реле

Тип реле	Число витков, $w_{кат}$	Марка и диаметр провода, мм	Расчетные величины	
			$R_{кат}, Ом$	$X_{кат}, Ом$
РП-25	3000	ПЭВ-2 Ø0,21	170,8	180,4
РП-25	3850	ПЭВ-2 Ø0,18	298,4	297,1
РП-25	6700	ПЭВ-2 Ø0,14	858,3	899,8
РП-211	4500	ПЭВ-2 Ø0,17	391,0	405,9
РП-211	9000	ПЭВ-2 Ø0,12	1569,3	1623,5

В соответствии с этой схемой на рисунке 4.3,а зависимость ЭДС $E_{\text{МТТ}}$ МТТ содержащий одну катушку k_2 с числом витков w_{k_2} и с координатой y_2 от координаты $y_{\text{ЗВ}}$ имеет вид линии 1 показанной на рисунке 4.3,в [62]. Из этого рисунка видно, что перемещение замкнувшегося витка вдоль оси y в пределах $0 - H_c$ сопровождается изменением величины ЭДС $E_{\text{МТТ}}$ более чем в три раза. При этом наибольшей величины ЭДС $E_{\text{МТТ}}$ достигает в точке с координатой y_{k_1} . Следовательно, чувствительность защиты будет изменяться аналогичным образом.

Этого в значительной степени можно избежать, если для изготовления МТТ использовать две катушки с одинаковым числом витков [62]. По рисунку 4.4,а это катушки k_1 и k_3 . Если для них принять координаты $y_{k_1} = 0,1H_c$ и $y_{k_3} = 0,9H_c$, то зависимость величины ЭДС E_{k_1} и E_{k_3} в них, а также ЭДС $E_{\text{МТТ}}$ от координаты $y_{\text{ЗВ}}$ на рисунке 2.4,а будут представлены линиями 1, 2 и 3 [62].

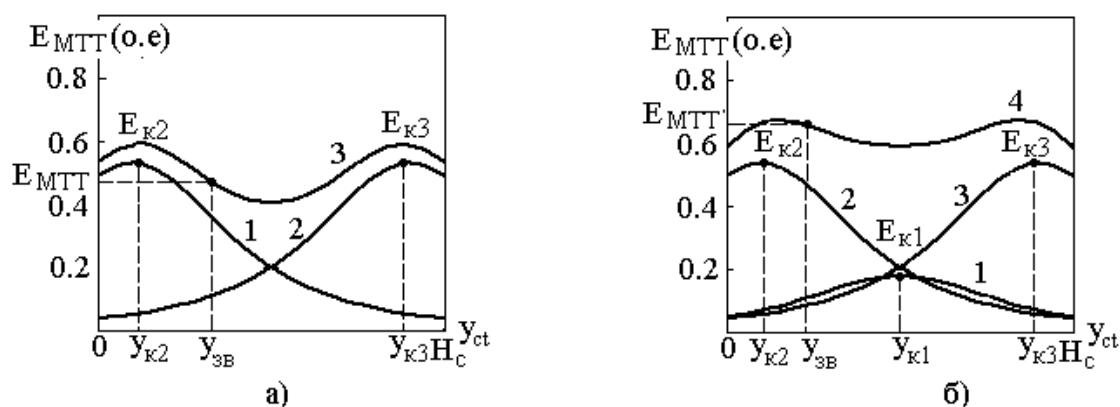


Рисунок 4.4 – Зависимости ЭДС МТТ при различном числе катушек в обмотке с равным и разным числом витков в катушках

Эффект от увеличения числа катушек до трех в обмотке МТТ можно наблюдать на рисунке 4.4,б, где зависимости ЭДС E_{k_1} , E_{k_2} и E_{k_3} катушек с координатами $y_{k_1} = 0,5H_c$, $y_{k_2} = 0,1H_c$ и $y_{k_3} = 0,9H_c$ от величины y_{ct} показаны линиями 1, 2 и 3, а зависимость величины ЭДС $E_{\text{МТТ}}$ от нее - линией 4. При этом для снижения колебаний по величине зависимости $E_{\text{МТТ}} = f(y_{ct})$ используются катушки, у которых число витков $w_{k_2} = w_{k_3}$ и $w_{k_1} = w_{k_2} / 3$. В этом случае колебание зависимости $E_{\text{МТТ}} = f(y_{ct})$ не превышает 13–15 %.

Очевидно выбор числа катушек в обмотке МТТ 16 и числа витков в них, а также места расположения этих катушек на несущей рейке МТТ для произвольного трансформатора является сложной комплексной задачей решаемой с помощью вычислительной техники. Однако, как показывают расчеты для обеспечения приемлемого колебания чувствительности защиты от витковых замыканий практически любого типа трансформатора достаточно воспользоваться последним вариантом МТТ.

Для выявления наличия КЗ и обрыва в цепи расщеплений вторичной обмотки трансформатора используется МТТ с обмоткой из двух одинаковых катушек $k1$ и $k2$, обмотки которых соединены согласно последовательно [62]. Эти катушки расположены на этой рейке симметрично относительно ее середины так, как это показано на рисунке 4.5,а. Обмотка этого МТТ имеет выводы из начала и конца обмотки, а также из ее середины [62].

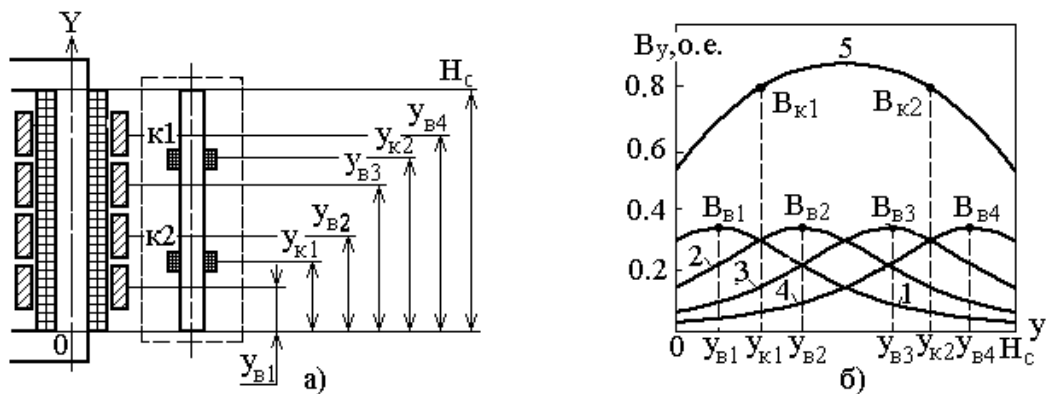


Рисунок 4.5 - Зависимости $B_y = f(y)$ МТТ 15 с обмоткой из двух катушек в эксплуатационном режиме работы трансформатора

Как видно из этого рисунка расщепления вторичной обмотки размещаются на катушке трансформатора равномерно. Их положение на расчетной схеме рис. 4.5,а определено координатами $y_{B1} - y_{B4}$. В произвольном эксплуатационном режиме работы трансформатора с короткой сетью по этим расщеплениям протекают одинаковые токи. Такое размещение расщеплений вторичной обмотки с токами на катушке трансформатора обеспечивает такое распределение их аксиальной составляющей индукции магнитного поля рассеяния вдоль катушек 2 и 3 трансформатора, которое на рис.4.5,б показано линиями 1–4. Причем максимальных значений магнитная индукция этих полей рассеяния $B_{t1} - B_{t4}$ достигает в точках с координатами $y_{B1} -$

$u_{в4}$. При этом распределение суммарного магнитного поля всех расщеплений вторичной обмотки на этом рисунке показано в виде линии 5.

Катушки $k1$ и $k2$ обмотки МТТ закрепляются на несущей рейке так, чтобы они размещались строго между расщеплениями 7,8 и 9,10 вторичной обмотки. Такому их расположению соответствуют координаты $u_{к1}$ и $u_{к2}$. При этом величины аксиальной составляющей индукции магнитного поля рассеяния $B_{к1}$ и $B_{к2}$ в точках размещения катушек $k1$ и $k2$ определяются на линии 5 по координатам $u_{к1}$ и $u_{к2}$. Из рис. 4.5,б видно, что при таком взаимном положении расщеплений вторичной обмотки трансформатора и катушек $k1$ и $k2$ величины $B_{к1}$ и $B_{к2}$, а следовательно ЭДС $E_{к1}$ и $E_{к2}$ в этих катушках будут одинаковы. При этом действующее значение ЭДС в катушках $k1$ и $k2$ рассчитывается как

$$E_{к1} = 4,44fw_k B_{к1} Q_k \text{ и } E_{к2} = 4,44fw_k B_{к2} Q_k,$$

а их разность ΔE_k будет равна нулю,

где f – частота сети;

w_k – число витков в катушке;

Q_k – средняя площадь витков катушки.

В соответствии с [62] при обрыве и ДЗ в цепи одного из расщеплений короткой сети ток в нем становится равным нулю, а при ДЗ ток в поврежденном расщеплении возрастает примерно 1,25–1,3 раза. В связи с этим происходит перераспределение аксиальной составляющей магнитного поля рассеяния катушек трансформатора. Такое перераспределение магнитных полей рассеяния одной из катушек трансформатора при обрыве и КЗ в цепи четвертого расщепления приведено на рисунках 4.6,а и 4.6,б.

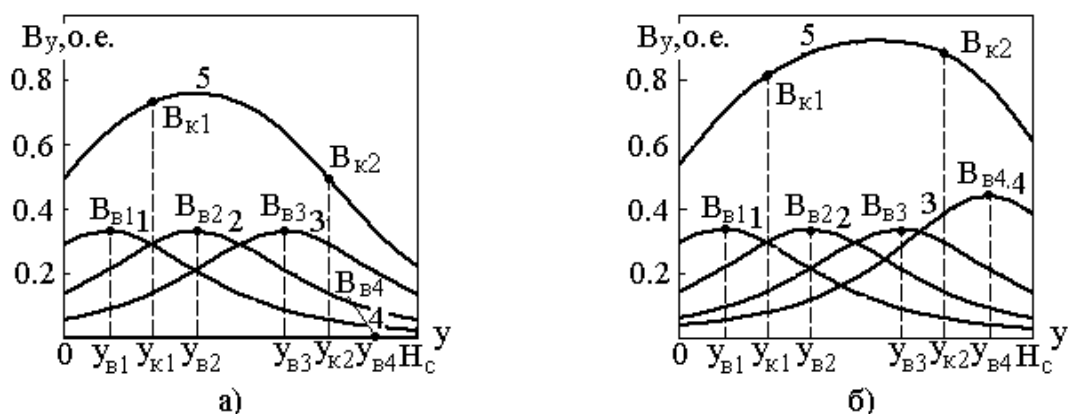


Рисунок 4.6 – Зависимости $B_y = f(y)$ МТТ с обмоткой из двух катушек при обрыве и КЗ в цепи четвертого расщепления

На этих рисунках линиями 1-4 также показано распределение вдоль катушек трансформатора аксиальной составляющей индукции магнитного поля от токов в цепи расщеплений. Распределение суммарного магнитного поля от токов во всех расщеплениях вторичной обмотки на рисунках 4.6,а и 4.6,б показано линией 5.

Распределение магнитных полей от токов во всех расщеплениях вторичной обмотки на этом рисунке показано в виде линии 5. Величины аксиальной составляющей индукции магнитного поля рассеяния B_{K1} и B_{K2} в точках размещения катушек $k1$ и $k2$ определяются на линии 5 по координатам y_{K1} и y_{K2} . Как видно из рис.5 величины B_{K1} и B_{K2} , а следовательно ЭДС катушек $k1$ и $k2$, в этих режимах не равны по величине.

На рисунке 4.7 показана конструкция МТТ с изолированным корпусом. В этом МТТ обмотка 1 реализована в виде многовитковой плоской катушки, которая помещена в электроизолирующий корпус 2 из фарфора или пластмассы. Корпус 2 крепится к несущей конструкции 4 при помощи кронштейнов 5 и болтов с гайками 6 и 7 соответственно. Такая конструкция МТТ надежно защищает его обмотку от механических и электрических повреждений.

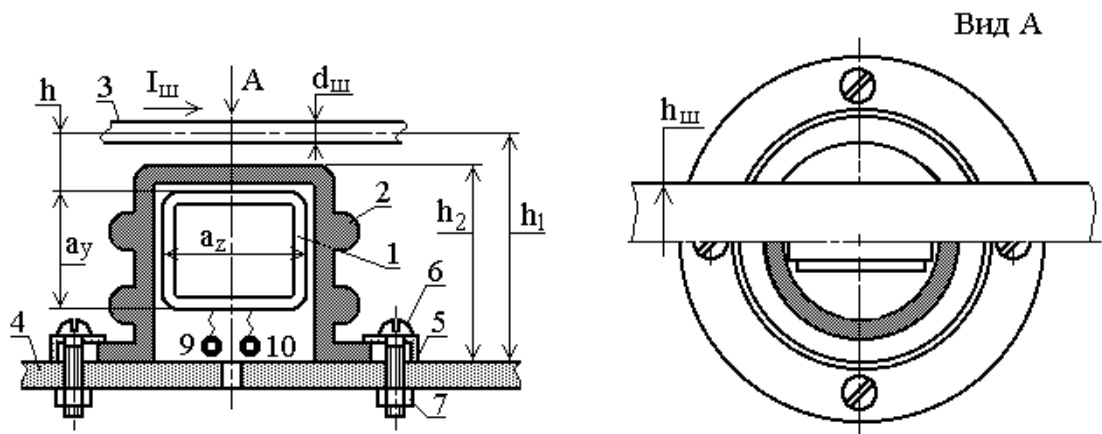


Рисунок 4.7 – Конструкция МТТ с изолирующим корпусом

Ток I_{III} в шине 3 в процессе функционирования МТТ создает в обмотке 1 ЭДС E_K . Действующее значение ЭДС можно определить:

$$E_{MTT} = 4,44f_c w_{MTT} \Phi_{MTT}, \quad (4.6)$$

где f_c – частота сети;

w_{MTT} – число витков обмотки МТТ;

Φ_{MTT} – магнитный поток через плоскость обмотки МТТ.

Полный поток через плоскость витка катушки МТТ [54] определяется как:

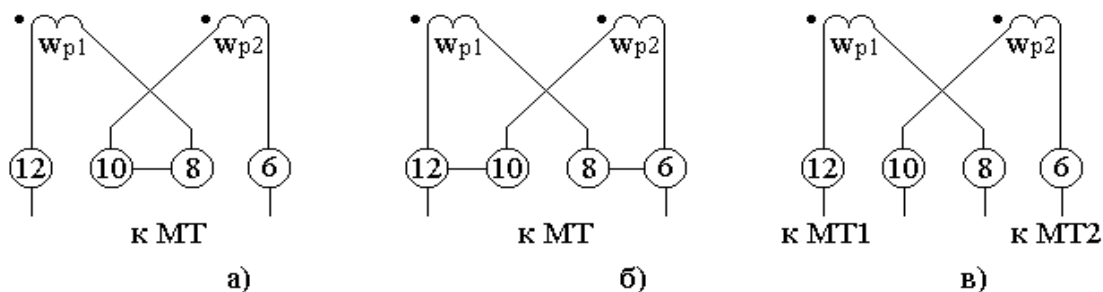
$$\Phi_{MTT} = \mu_0 \frac{I_{III}}{N} a_z \sum_{n=1}^N \frac{1}{2\pi} \int_h^{h+a_y} \frac{y}{(y^2 + (x - x_n)^2)} dy. \quad (4.7)$$

4.2 Реагирующие органы защиты на магнитных трансформаторах тока

МТТ, как правило, обладают небольшой отдаваемой мощностью. При этом мощность срабатывания реагирующего органа защиты должна быть меньше отдаваемой мощности МТТ. В связи с этим в качестве реагирующего органа защиты на МТТ следует использовать реле тока РТ-40/0,2, РТЗ-51 и РТЗУ-1.

Требованию малой мощности срабатывания при невысоком напряжении отвечает, например, токовое реле РТ-40/0,2 [51; 55]. Данное реле выпускается промышленностью и имеет минимальную мощность срабатывания равную 0,2 В А при токе срабатывания 0,05 А

и напряжении срабатывания около 4В. Реле РТ-40/0,2 оснащено двумя идентичными обмотками. В нем предусмотрена возможность соединять эти обмотки параллельно или последовательно. Такие виды соединений показаны на рисунках 4.8,а и 4.8,б. При таких видах соединения обмоток к реле можно подключить только один МТТ.



а – схема с параллельно соединенными обмотками; б – схема с последовательно соединенными обмотками; в – схема с двумя МТТ

Рисунок 4.8 – Схемы соединений РТ-40/0,2 с одним или двумя МТТ

В случае необходимости подключения к реле двух МТТ следует воспользоваться схемой, приведенной на рисунке 4.8,в.

Высокочувствительное реле тока типа РТЗ-51 было разработано для повышения чувствительности защит от ОЗЗ и предназначено для использования совместно с ТННП в качестве органа, реагирующего на ток нулевой последовательности в схемах защит от ОЗЗ [39]. Принципиальная схема реле РТЗ-51 [39] приведена на рисунке 4.9.

Пределы регулирования тока срабатывания этого реле равны 0,02-0,12 А. Коэффициент возврата реле равен 0,93, а время его срабатывания при двукратном токе уставки не превышает 0,06 с. Мощность срабатывания реле на минимальной уставке не превышает 0,01 В·А. Реле выполнено с использованием полупроводников, в частности операционных усилителей. Поэтому мощность, потребляемая от источника постоянного оперативного тока не превышает 10 Вт, а от переменного – 5–5,5 В А.

Промежуточный трансформатор тока ТА и резисторы R2–R7 с переключателями SB1-SB6 в этом реле служат для дискретного регулирования порога срабатывания по току. При использовании этого реле для нужд релейной защиты на МТТ промежуточный трансформатор тока ТА с сопротивлением R1 из схемы удаляется. Диоды VD1–VD-4 в реле используются для ограничения амплитуды входного сигнала.

Активный фильтр на операционном усилителе А1 с многоконтурной обратной связью, включающей резисторы R8, R9 и R10 и конденсаторы С1 и С2 являются преобразующей частью реле. Активным фильтр настраивается на частоту 50 Гц и осуществляет отстройку реле от высших гармонических составляющих в ЭДС МТТ.

Сравнивающая часть реле состоит из порогового элемента на операционном усилителе А2, времязадающей цепи VD5, R15, R16 и С7, а также триггера Шмидта на операционном усилителе А3. Конденсаторы С3-С10 предназначены для коррекции этих операционных усилителей с целью исключения их возбуждения. Резистор R17 представляет собой обратную связь. Питание операционных усилителей осуществляется параметрическим стабилизатором из резисторов R26 и R27, стабилитронов VD11 и VD12, а также конденсаторов С11 и С12. Он обеспечивает напряжение ± 15 В.

Питание реле осуществляется от источника постоянного или выпрямленного тока напряжением 110 или 220 В. При необходимости вместо постоянного оперативного тока к реле может быть подключен источник переменного тока напряжением 100 В.

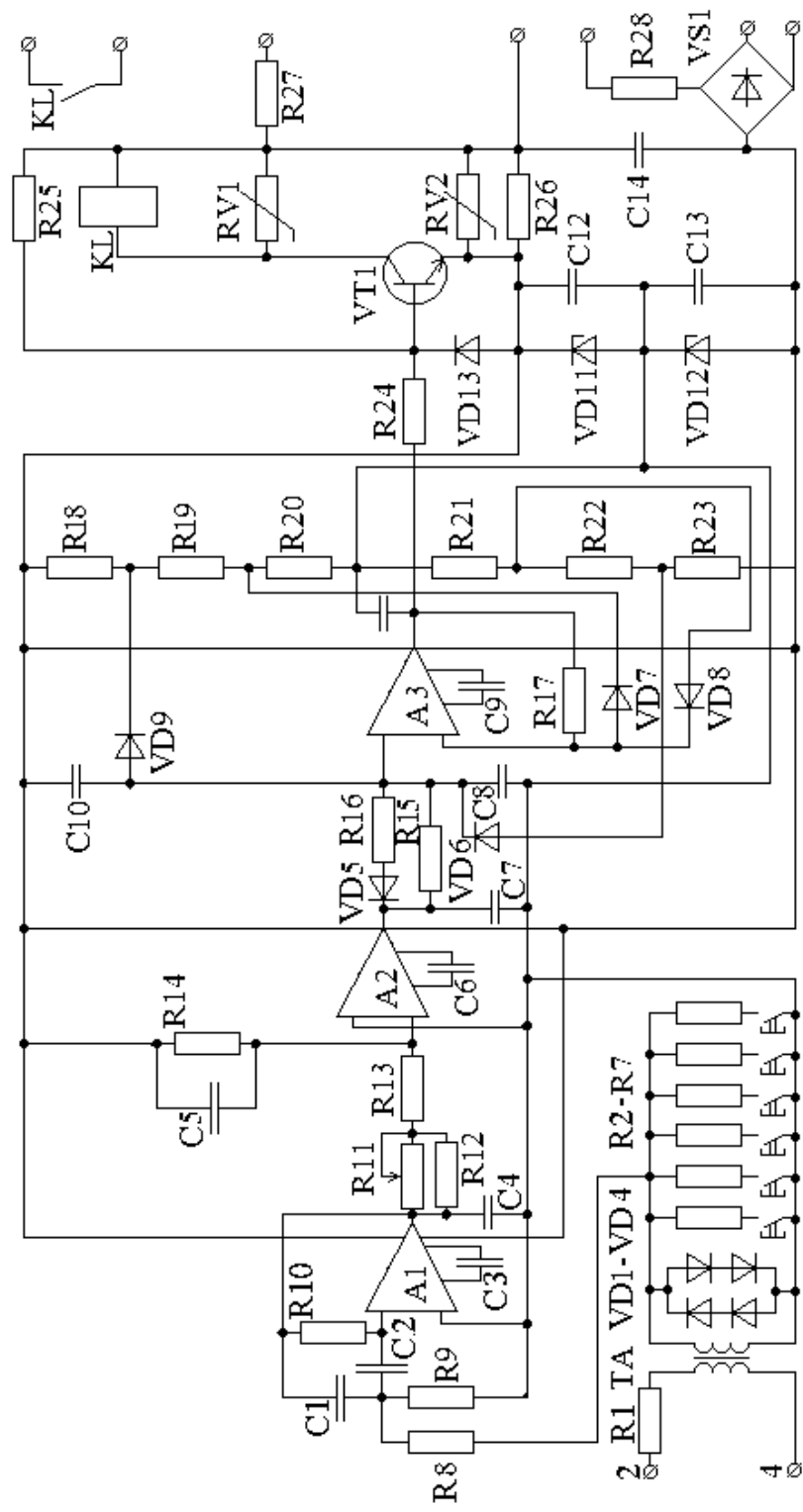


Рисунок 4.9 Высокочувствительное реле тока типа РТЗ-51

когда напряжение от выпрямителя А2 будет меньше напряжения $U_{VD4}+U_{VD6}$.

Температурная независимость устройства обеспечивается при помощи фазоимпульсного способа управления выходным тиристором VD7. Применение в схеме однопереходного транзистора VT1 позволило сравнительно просто решить проблемы термостабилизации и синхронизации генератора. Изменением величины сопротивления R9 осуществляется регулировка величины напряжения на катушке промежуточного реле KL1 в пределах 40–215 В.

При такой реализации реагирующего органа его питание может осуществляться от источника переменного оперативного тока напряжением 100 или 220 В. При необходимости вместо постоянного оперативного тока к реле может быть подключен источник переменного тока напряжением 100 В.

4.3 Устройство релейной защиты печного трансформатора с короткой сетью от электрических повреждений

В соответствии с разделом 1.3 в системе электроснабжения рудотермического производства для понижения напряжения сети с 6–10 кВ до 150–220 В используются печные трансформаторы, а с помощью короткой сети осуществляют передачу электрической энергии от печного трансформатора к электродам печи. В свою очередь, короткая сеть состоит компенсаторов, шинного пакета, гибких связей, а также системы башмаков, контактной щетки и электродов [6; 15; 23]. При этом наиболее протяженной и дорогой частью короткой сети является шинный пакет.

Поскольку рабочие токи в короткой сети могут достигать 35–150 кА [23], вторичную обмотку печного трансформатора выполняют расщепленной, а число пар трубошин в шинном пакете короткой сети принимают равным числу этих расщеплений. В связи с этим, одним из основных электрических повреждений в печном трансформаторе является ВЗ, а в короткой сети – обрывы и КЗ в цепях расщеплений [1].

В соответствии с разделом 1.6 МТЗ на ВЗ в первичной обмотке не реагирует, а время срабатывания газовой защиты сильно зависит от температуры масла и числа замкнувшихся витков.

От КЗ в короткой сети защищаются с помощью электрического изолирования всех расщеплений [23]. Но короткая сеть на рудотермическом производстве работает в условиях высоких температур и при высоком содержании в воздухе угольной и абразивной пыли. В связи с такими условиями работы изоляция

токоведущих частей короткой сети быстро разрушается, возникают проводящие мостики из угольной пыли между трубошинами и, как следствие, может произойти замыкание в паре трубошин и возникнуть электрическая дуга. При рабочих токах печи эта дуга за доли секунды способна привести к полному разрушению дорогостоящего шинного пакета [56; 57].

В связи с этим для защиты от ВЗ в первичной обмотке трансформатора, а также от обрывов и КЗ в парах трубошин предлагается использовать устройство защиты печного трансформатора с короткой сетью от электрических повреждений на МТТ. Работа этого устройства защиты основана на измерении магнитных полей рассеяния левой и правой катушки трансформатора, а также у верхнего и нижнего торца одной из этих катушек [46; 61]. В случае если при измерении этих магнитных полей измеряемая разница будет отличная от нуля, то в этом случае формируется сигнал на отключение трансформатора от сети и осуществляется квалификация вида повреждения.

На рисунке 4.11 представлена схема размещения МТТ предлагаемого устройства защиты печного трансформатора с короткой сетью [46].

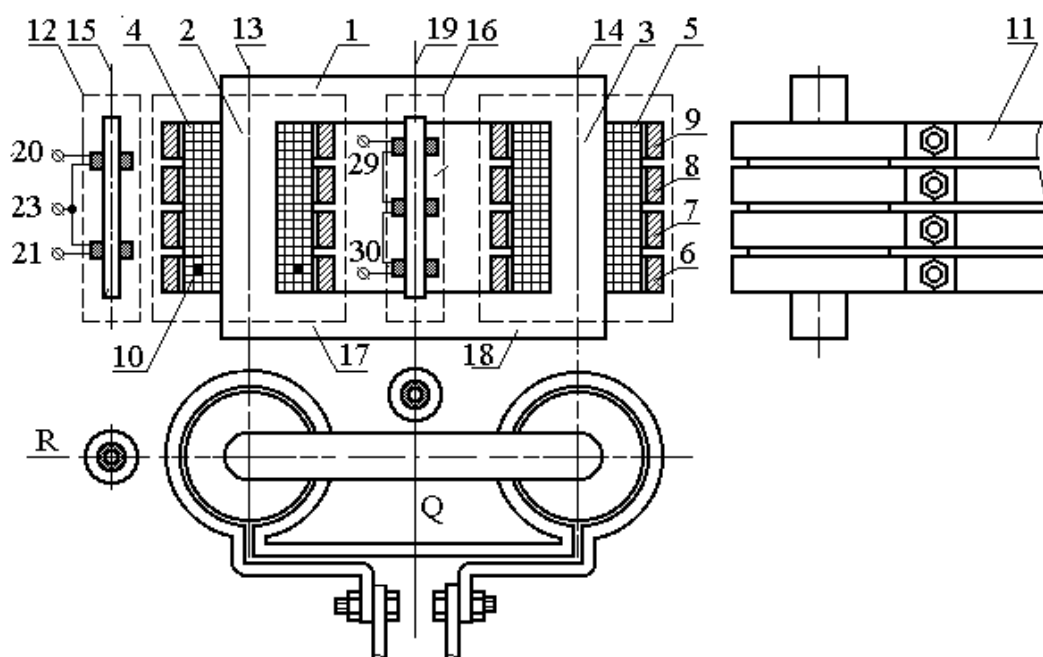


Рисунок 4.11 – Схема размещения МТТ устройства защиты печного трансформатора с короткой сетью

Однофазный печной трансформатор выполнен в виде сердечника 1 с двумя идентичными катушками. Эти катушки размещаются на стержнях 2 и 3. Каждая катушка состоит из частей 4 и 5 многовитковой первичной обмотки и элементов 6–9 вторичной обмотки. Причем при монтаже части 4 и 5 первичной соединяются согласно-последовательно. Поэтому замкнутые витки 10 могут возникнуть только в первичной обмотке. Вторичная обмотка трансформатора выполняется расщепленной. В данном случае она состоит из четырех, изолированных друг от друга расщеплений 6-9 [46]. Схема соединений расщепленной обмотки и присоединения их к парам трубошин 11 короткой сети приведены на рисунке 4.. В свою очередь пары трубошин присоединяется к электродам печи с помощью гибких связей.

Устройство защиты содержит два МТТ. Первый МТТ 12 выполнен в виде двух последовательно соединенных катушек индуктивности с выводом из середины второй катушки. Его размещают на плоскости R, которая проходит через оси 13 и 14 стержней 2 и 3 сердечника 1, так чтобы его продольная ось 15 была параллельна оси 13 [46].

Второй МТТ 16 также выполнен в виде трех последовательно соединенных катушек индуктивности. Его размещают на плоскости Q, которая перпендикулярна ярмам 17 и 18 сердечника 1 трансформатора и проходит через их середину. При этом его продольная ось 19 располагается параллельно осям 13 и 14 стержней 2 и 3 сердечника 1.

Схема устройства защиты печного трансформатора с короткой сетью приведена на рисунке 4.12 [46].

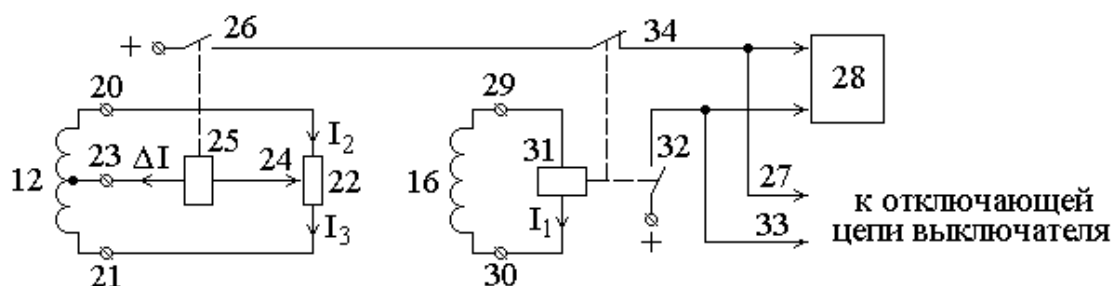


Рисунок 4.12 – Схема устройства защиты однофазного печного трансформатора с короткой сетью в виде группы шин от электрических повреждений

В соответствии с этой схемой начало 20 и конец 21 катушек МТТ 12 присоединены к крайним выводам переменного резистора 22, а

средний вывод 23 этого МТТ и подвижный контакт 24 резистора 22 к обмотке реле 25. При этом нормально разомкнутый контакт 26 этого реле подключен к отключающей цепи 27 выключателя и к блоку индикации вида повреждения 28. Переменный резистор 22 предназначен для выставления тока $\Delta I = 0$ в реле 25 при отсутствии ВЗ в обмотках 4 и 5, а также электрического повреждения в короткой сети 11.

Выводы 29 и 30 МТТ 16 присоединяются к обмотке реле 31. При этом нормально разомкнутый контакт 32 реле 31 подключен к отключающей цепи 33 выключателя и к блоку 28 индикации вида повреждения, а нормально замкнутый контакт 34, который является блокировочным, включают последовательно с контактом 26.

Устройство защиты работает следующим образом. В произвольном эксплуатационном режиме работы печного трансформатора с короткой сетью 11 по одинаковому числу витков в его обмотках 4, 5 и 6-9, которые расположены на разных стержнях сердечника, протекают одинаковые токи. При точном изготовлении и установке этих обмоток токи в них будут индуцировать в обмотке МТТ 16 ЭДС, равную нулю, а ЭДС верхней и нижней обмоток в МТТ 12 будут равны по величине. В результате в ток I_1 в обмотке реле 31 будет равен нулю, а его контакты 32 и 34 будут находиться в исходном положении. В свою очередь токи I_2 и I_3 будут равны между собой, их разность ΔI в обмотке реле 25 будет равна нулю, а контакты 26 реле 25 будут также находиться в исходном положении. Поэтому сигналы с контактов реле 25 и 31 на отключение печного трансформатора от сети и на входе блока 28 индикации вида повреждения отсутствуют [46]. Печной трансформатор не выводится из работы.

При замыкании витков 10 ток в них будет значительно превышать величину тока в остальной части первичной обмотки. Что приведет к изменению распределения магнитного поля рассеяния поврежденной обмотки на стержне 3 и к появлению в обмотке МТТ 16 ЭДС. При этом электродвижущие силы верхней и нижней обмоток МТТ 12 будут не равны между собой. В связи с этим токи ΔI и I_1 в обмотках реле 25 и 31 будут не равны нулю. В результате эти реле сработают. При этом контакты 26 и 32 замкнутся, а контакт 34 разомкнется. В результате в отключающей цепи 33 появится сигнал на отключение трансформатора от сети, а блок 28 индикации высветит сообщение «витковое замыкание» [46].

При возникновении КЗ в одной из пар шин, например прикрепленной к обмотке 9, ток в ней возрастет и будет значительно

больше величины тока в остальных обмотках 6-8. Что приведет к одинаковому изменению распределения магнитного поля рассеяния поврежденной обмотки на обоих стержнях трансформатора. В этом случае ЭДС в обмотке МТТ 16 будет равна нулю, а ЭДС верхней и нижней обмоток МТТ 12 будут не равны между собой. В связи с этим ток I_1 в обмотке реле 31 будет равен нулю и оно не срабатывает, а разность тока ΔI в обмотке реле 25 будет не равна нулю и оно сработает. При этом контакты 26 замкнутся, а контакты 32 и 34 останутся в исходном положении. В результате в отключающей цепи 27 появится сигнал на отключение трансформатора. При этом блок 28 индикации высветит сообщение «повреждение короткой сети».

При возникновении разрыва в цепи одной из шин, например, в гибких связях, соединяющих обмотку 9 с электродом печи, ток в этой паре шин и присоединенной к ней обмотке 9 будет равен нулю. Что также приведет к одинаковому изменению распределения магнитного поля рассеяния обмоток на обоих стержнях трансформатора. В этом случае ЭДС в обмотке МТТ 16 будет равна нулю, а ЭДС верхней и нижней обмоток МТТ 12 будут не равны между собой. В связи с этим ток I_1 в обмотке реле 31 будет равен нулю, и оно не срабатывает, а разность тока ΔI в обмотке реле 25 будет не равна нулю, и оно сработает. При этом контакт 26 замкнется, а контакты 32 и 34 останутся в исходном положении. В результате в отключающей цепи 27 появится сигнал на отключение трансформатора. При этом блок 28 индикации высветит сообщение «повреждение короткой сети» [46].

При таком расположении МТТ 16 относительно катушек 4 и 5 трансформатора его ЭДС в эксплуатационном режиме работы будет равняться ЭДС $E_{нб1}$ небаланса. Обычно $E_{нб1}$ вызвана неточностью изготовления и установки, как катушек трансформатора, так и МТТ [56; 57]. Поэтому в соответствии со схемой на рисунке 4.10 ток небаланса в реле 31 можно определить как:

$$I_{нб1} = \frac{E_{нб1}}{Z_{po1} + Z_{МТТ1}}. \quad (4.8)$$

где Z_{po1} и $Z_{МТТ1}$ – полное сопротивление реле 31 и катушки МТТ 16.

ЭДС $E_{нб1}$ достигает наибольшей величины при включении трансформатора в сеть и при КЗ. Но поскольку печные трансформаторы на рудотермическом производстве работают в

режиме КЗ, то этот режим не рассматривается. Таким образом, ток срабатывания реле 31 защиты определяется как:

$$I_{cp1} = k_n I_{нб1}. \quad (4.9)$$

где k_n – коэффициент надежности отстройки равный 1,3–1,6. [21].

В эксплуатационных режимах работы трансформатора с короткой сетью в МТТ 12 величины ЭДС его обмоток $E_{к1}$ и $E_{к2}$ будут не равны между собой. Это вызвано неточностью изготовления и установки, как обмоток в катушке трансформатора, так и МТТ 12 [46]. В связи с этим разность токов $I_{1г}$ в реле 25 будет не равна нулю. Наибольшей величины эта разность токов достигает при включении трансформатора в сеть. При этом в соответствии со схемой на рисунке 4.12 и ток в обмотке реле 25 и напряжение на его выводах можно определить из выражений:

$$I_{нб2} = \frac{|\dot{E}_{к1} - \dot{E}_{к2}|}{Z_{po2} + Z_{MTT2} + R_{31}/2} \text{ и } U_{2г} = I_{нб2} Z_{po2}, \quad (4.10)$$

где Z_{po2} и Z_{MTT2} – импеданс обмотки реле 25 и одной катушки МТТ 15; R_{31} - сопротивление резистора 22.

В этом случае ток и напряжение срабатывания реле 32 защиты определяется как:

$$I_{cp2} = k_n I_{нб2} \cdot \text{ и } U_{cp2} = k_n U_{2г}. \quad (4.11)$$

Однако в соответствии со схемой на рисунке 4.12 величина разности $I_{2г}$ токов в обмотке реле 25 может регулироваться. Что дает возможность в доступном эксплуатационном режиме работы трансформатора с помощью резистора 22 значительно уменьшить ее величину и повысить чувствительность защиты.

Для экспериментальной оценки параметров, например защиты от ВЗ трансформатора ТТ-6, выполненной на реле 31 использовался двулучевой осциллограф, который был реализован на персональном компьютере с программой «Елена 2012» [62]. Результаты

эксперимента в виде осциллограмм тока $I_{1\phi}$ в первичной обмотке трансформатора и ЭДС $E_{\text{МТТ}}$ МТТ 16, полученных при включении трансформатора в сеть и при замыкании одного витка в первичной обмотке ТТ-6 в режиме холостого хода приведены на рисунках 4.13 и 4.14 соответственно.

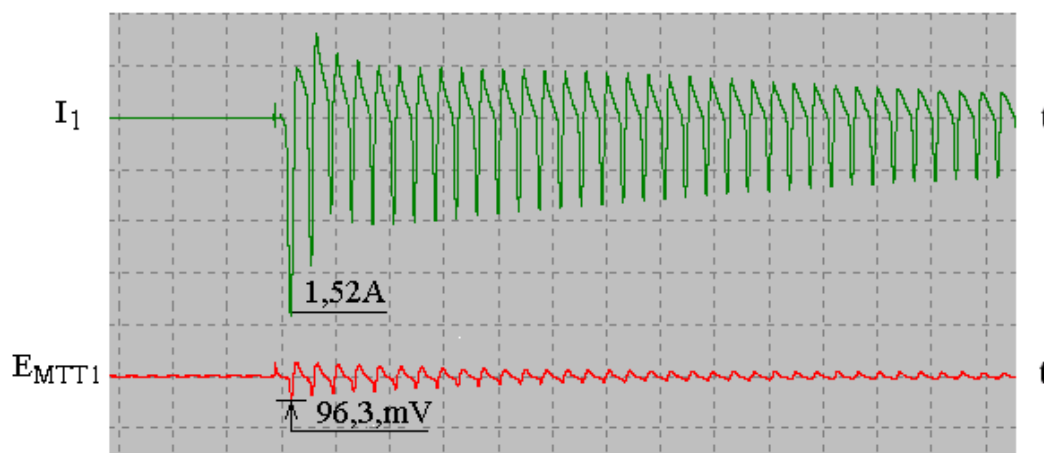


Рисунок 4.13 – Осциллограммы включения в сеть трансформатора ТТ-6 в режиме холостого хода

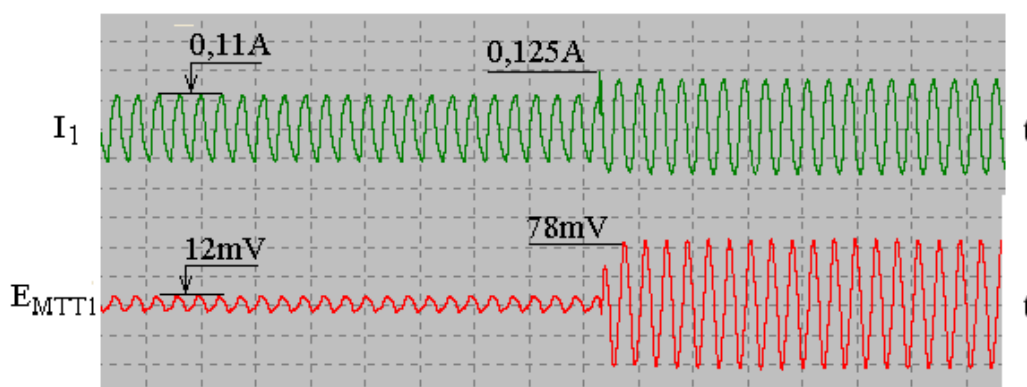


Рисунок 4.14 – Осциллограммы замыкания одного витка в первичной обмотке ТТ-6 в режиме холостого хода

Оценку чувствительности этой защиты с учетом рисунков 4.13 и 4.14 можно осуществить следующим образом. Для этого первоначально, как показано на рисунке 4.15, строится полученная экспериментальным путем в режиме холостого хода зависимость $E_{\text{МТТ}}(w_k)$.

Затем с учетом наибольшей величины ЭДС $E_{нб1}$ небаланса используемого МТТ и математических выражений (4.8) и (4.9) рассчитывается порог срабатывания защиты. Так как при включении трансформатора в сеть по рисунку 4.13 наибольшая величина $E_{нб1}$ составила порядка 0,0963 В, то тогда ЭДС МТТ, приводящая к срабатыванию защиты:

$$E_{ср1} = k_n E_{нб1} = 1,6 \cdot 0,0963 = 0,154 \text{ В}$$

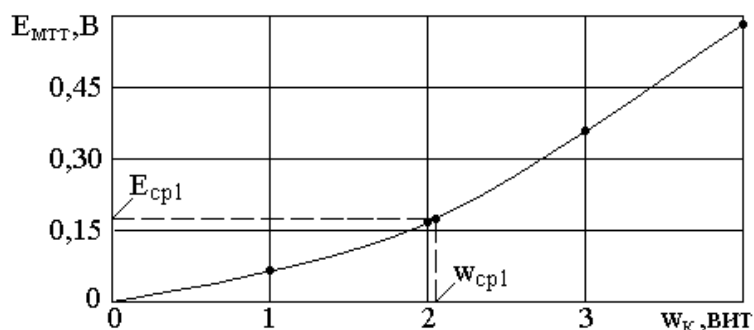


Рисунок 4.15 – Определение чувствительности защиты от ВЗ трансформатора ТТ-6

Если через точку $E_{ср1}$ на оси $E_{МТТ}$ графика на рисунке 4.15 провести горизонтальную линию, то по ее точке пересечения с зависимостью $E_{МТТ}(w_K)$ на оси w_K можно найти число витков, которое приведет к срабатыванию этой защиты. Так как число замкнувшихся витков может быть только целым, то в соответствии с рисунком 4.13 защита сработает при замыкании трех витков.

Включение печного трансформатора в работу сопровождается появлением на клеммах 29 и 30, к которым подключается реле 31, напряжения U_{2r} определяемое величину небаланса. Результаты эксперимента в виде осциллограмм тока I_1 в первичной обмотке трансформатора и напряжения U_{2r} МТТ 16, полученные при включении трансформатора ТТ-6 в сеть в режиме холостого хода, приведены на рисунке 4.16.

Из этих осциллограмм видно, что при величине броска тока намагничивания равного 1,5 А наибольшая величина напряжения небаланса U_{2r} составляет 17,5 мВ. В этом случае напряжение $U_{ср2}$, при котором должна срабатывать защита короткой сети от электрических повреждений определяется как

$$U_{cp2} = k_n U_{2r} = 1,6 \cdot 17,5 = 28 \text{ мВ}.$$

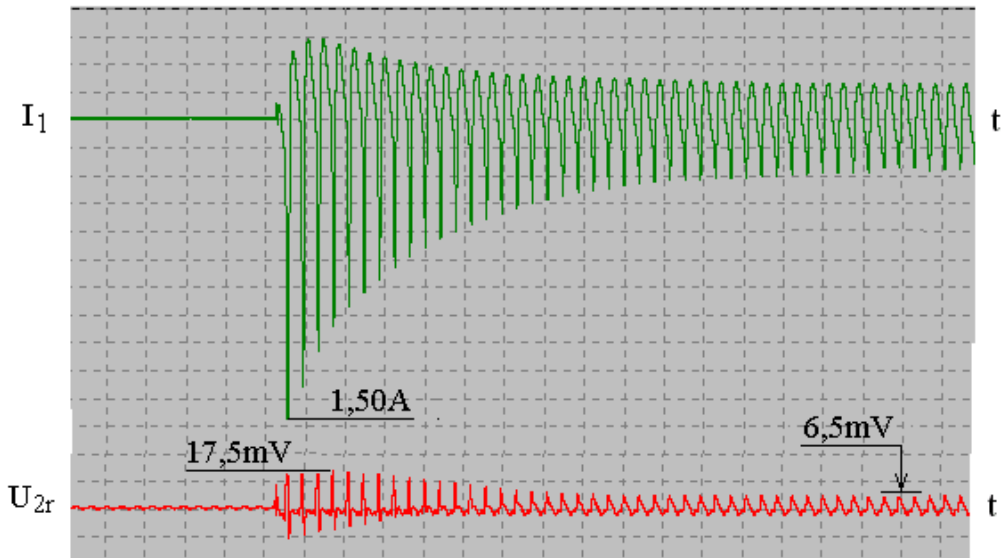


Рисунок 4.16 - Осциллограммы включения в сеть трансформатора ТТ-6 в режиме холостого хода

Результаты эксперимента в виде осциллограмм тока I_1 в первичной обмотке трансформатора и напряжения U_{2r} МТТ 16, полученные при возникновении обрыва в цепи пары трубошин и замыкания в ней приведены на рисунках 4.17 и 4.18. Из них видно, что при обрыве в цепи пары трубошин и замыкании в ней напряжение U_{2r} МТТ 15 становится равным 52,5 мВ и 270 мВ. Что значительно превышает напряжение U_{cp2} , при котором должна срабатывать защита короткой сети.

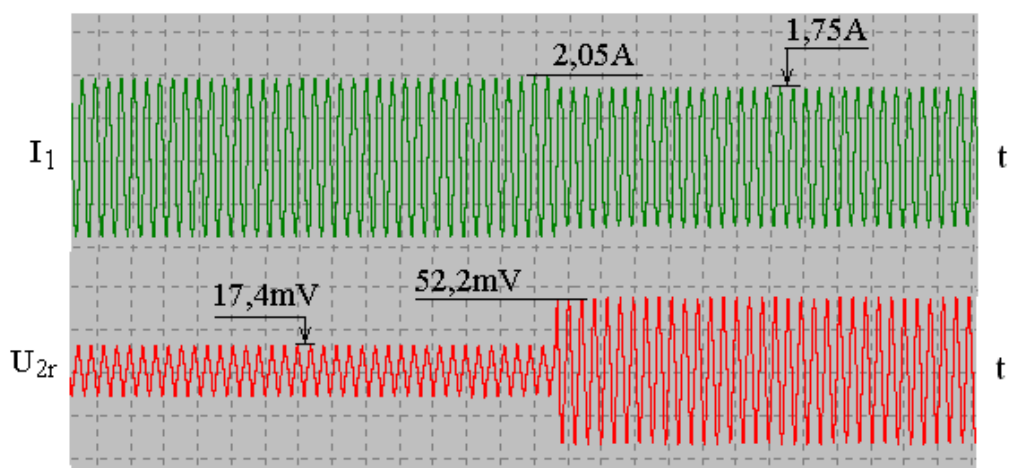


Рисунок 4.17 – Обрыв в цепи трубошин

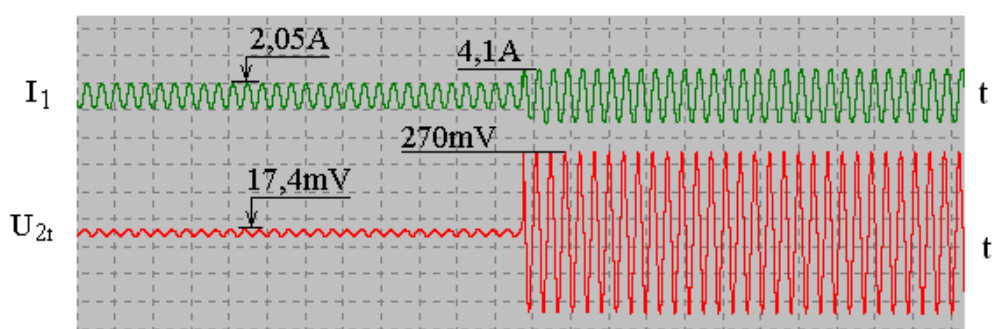


Рисунок 4.18 – Короткое замыкание в цепи трубошин

Таким образом, как показали лабораторные исследования на экспериментальной установке [44], разработанная защита обладает высокой чувствительностью к электрическим повреждениям в печном трансформаторе с короткой сетью и способна надежно защитить фазы этой сети от КЗ и обрывов в любой из ее параллельных линий, а первичную обмотку печного трансформатора от ВЗ.

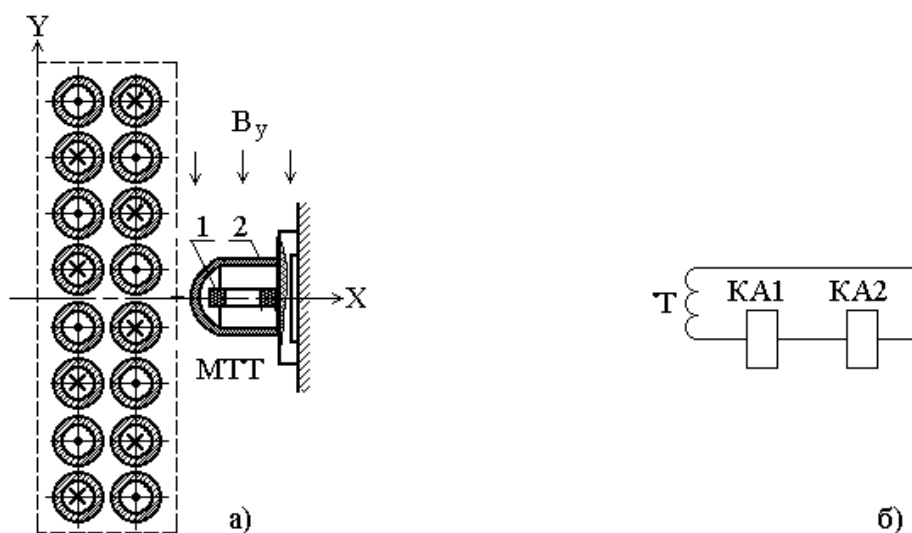
4.4 Устройство релейной защиты короткой сети на МТТ с одной обмоткой

Если печные трансформаторы рудотермического производства располагаются в камерах, размещаемых в производственном цехе, то температура масла в них в зимнее время не опускается ниже температуры этого цеха. Чаще всего этого достаточно для обеспечения декларируемого времени срабатывания газовой защиты при замыкании небольшого числа витков. В тоже время обрыв одной из гибких связей короткой сети или КЗ в одном из ее расщеплений не диагностируется напрямую, например, при помощи срабатывания

сигнализации, а определяется по косвенным признакам. Избавиться от этих проблем можно путем использования релейной защиты на МТТ.

Наиболее оптимальна защита короткой сети от обрывов гибких связей и КЗ в цепях расщеплений, основанная на одном МТТ [56; 57]. На рисунке 4.19,а приведена конструкция МТТ и его расположение относительно шинного пакета короткой сети. При реализации защиты используют схему по переменному оперативному току, приведенную на рисунке 4.19,б.

Для построения такой защиты необходимо первоначально необходимо рассчитать токи во всех расщеплениях в эксплуатационных и аварийных режимах работы согласно рисунку 2.5,а и модели, приведенной в [37]. Затем по токам в трубошинах и их пространственному расположению в шинном пакете моделируют его магнитное поле по математической модели, приведенной в разделе 3.3. После этого путем анализа зависимостей приведенных на рисунках 3.8 – 3.12, определяют место расположения МТТ [56; 57; 63].



а – расположение МТТ относительно шинного пакета короткой сети: 1 – обмотка МТТ; 2 – изолирующий корпус; б – схема цепей переменного тока защиты

Рисунок 4.19 – Расположение МТТ относительно шинного пакета короткой сети и схема цепей переменного тока защиты

Поскольку на практике МТТ и шинный пакет изготовлены и установлены не идеально, то в обмотке МТТ в эксплуатационных

режимах работы короткой сети возникает ЭДС небаланса $E_{нб}$, от которой следует отстраиваться [56; 57].

Для выявления обрыва и КЗ в одном из расщеплений короткой сети используются токовые реле КА1 и КА2, схема соединения которых приведена на рисунке 4.19,б. При этом ток небаланса, протекающий по обмоткам этих реле, определяется как:

$$\dot{I}_{нб} = \dot{E}_{нб} / (Z_{МТТ} + Z_{ка1} + Z_{ка2}), \quad (4.12)$$

где $Z_{МТТ}$ – полное сопротивление МТТ;

$Z_{ка1}$ и $Z_{ка2}$ – полное сопротивление реле КА1 и КА2.

Пороги срабатывания этих реле различны. Токовое реле КА1 в схеме рисунка 4.19 служит для обнаружения обрыва гибких связей короткой сети. Оно не должно реагировать на самый тяжелый нагрузочный режим работы печи. Его порог срабатывания определяют, как:

$$I_{ср1} = I_{нб,маx} k_{отс}, \quad (4.13)$$

где $I_{нб,маx}$ – максимальное значение тока небаланса в нагрузочном режиме работы;

$k_{отс}$ – коэффициент отстройки, принимаемый равным 1.3-1.6 [21].

Для реализации защиты используется схема цепей постоянного тока, приведенная на рисунке 4.20 [56; 57; 63].

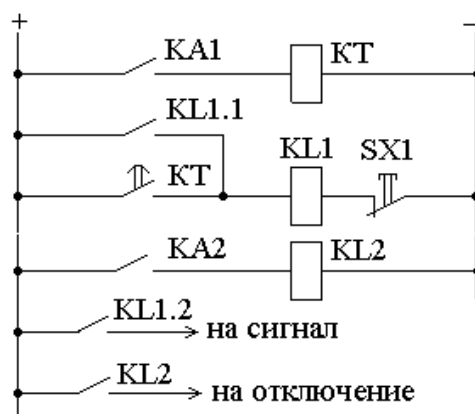


Рисунок 4.20 – Схема цепей постоянного оперативного тока защиты

Отстройка от броска тока намагничивания осуществляется путем задержки на срабатывание. Эта задержка, в соответствии с рисунком 4.20 осуществляется с помощью реле времени КТ. Задержка по времени в случае обрыва гибкой связи не влияет на масштаб аварии.

Для защиты от КЗ одной из пар трубошин используется токовое реле КА2. Оно не должно реагировать на обрыв в цепи одного из расщеплений, а также при броске тока намагничивания. В связи с этим порог срабатывания токового реле КА2 определяется как:

$$I_{ср2} = I_{ср1} k_{отс} \text{ и } I_{ср2} = I_{бтн} k_{отс} \quad (4.13)$$

где $I_{бтн}$ – бросок тока намагничивания.

При отстройке защиты выбирается большее значение тока срабатывания. При таком выборе токов срабатывания токовых реле КА1 и КА2 рассматриваемая защита работает следующим образом.

В произвольном эксплуатационном режиме работы токи во всех парах трубошин равны по величине и не превышают их номинального значения. Поэтому в обмотках реле КА1 и КА2 протекает ток небаланса $I_{нб}$, который меньше порога срабатывания этих реле. В связи с этим токовые реле КА1 и КА2, а также промежуточные реле КЛ1 и КЛ2 на рисунке 4.20 находятся в исходном положении, а их контакты разомкнуты. Поэтому сигналы о наличии в короткой сети электрических повреждений отсутствуют [56; 57; 63].

Согласно [34] и рисунку 3.13,а при обрыве одной из гибких связей шинного пакета в обмотке МТТ наводится ЭДС, а в цепи реле КА1 и КА2 появляется ток. Если величина этого тока превысит порог срабатывания реле КА1, а именно величину $I_{ср1}$, то это реле сработает и подаст напряжение на реле времени КТ. Через время срабатывания $t_{ср}$ контакты КТ этого реле замкнутся, вызовут срабатывание промежуточного реле КЛ1, которое через контакт КЛ1.1 станет на самоудержание, а через контакт КЛ1.2 сформирует сигнал о наличии обрыва в шинном пакете короткой сети. После устранения обрыва поврежденной пары трубошины при нажатии на кнопку SX1 защита возвращается в исходное состояние.

Согласно [34] и рисункам 3.9 – 3,12 при возникновении КЗ в цепи одного из расщеплений короткой сети в обмотке МТТ появится ЭДС, а в цепи реле КА1 и КА2 ток. Если величина этого тока превысит порог срабатывания реле КА2, а именно величину $I_{ср2}$, то

одновременно сработают реле КА1 и КА2. Однако поскольку реле КА1 выдает сигнал с выдержкой времени t_{cp} , а реле КА2 мгновенно, то контакты этого реле КА2 замкнутся и через промежуточное реле КЛ2 при помощи контакта КЛ2 сформируют сигнал на отключение трансформатора от сети.

Таким образом, предлагаемая защита короткой сети на МТТ не только выявляет электрические повреждения, но различает вид электрического повреждения. Это существенно минимизирует размеры повреждения, а также время простоя и стоимость ремонта [56]. Следует добавить, что данная защита имеет простую конструкцию и легко устанавливается на производстве.

4.5 Устройство релейной защиты короткой сети на МТТ с двумя обмотками

Анализ зависимости $B_x = f(y)$ приведенной на рисунках 3.8-3.12 показывает, что в неповрежденном шинном пакете эта зависимость симметрична относительно оси X. В тоже время возникновение КЗ в любой паре трубошин приводит к ее несимметрии. Эту особенность зависимости $B_x = f(y)$ можно использовать для построения токовой защиты от КЗ. В ней должен использоваться МТТ с двумя обмотками, которые располагают симметрично относительно оси X шинного пакета так, как это показано на рисунке 4.21,а, где 1 – шинный пакет; 2 – МТТ; 3 и 4 – обмотки МТТ; 5 – изолирующий корпус; 6 – реагирующий орган защиты. В этом случае в качестве информации о КЗ используется величина ΔB_x , определяемая как разность средних значений величин горизонтальной составляющей индукции B_x магнитного поля в плоскости обмоток МТТ.

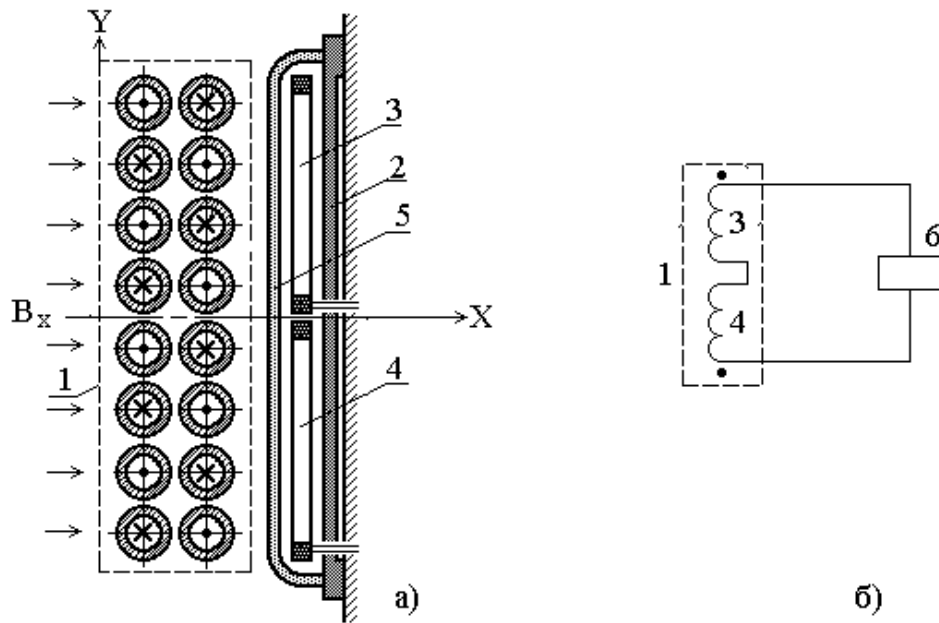


Рисунок 4.21 - Расположение МТТ относительно шинного пакета и схема его защиты от КЗ

Как видно из рисунков 3.9–3.12 характер изменения зависимости $B_x = f(y)$ является сложным. Он зависит от места расположения поврежденной пары трубошин в шинном пакете и точки КЗ в короткой сети. Поэтому, в общем случае, выбор размера и места размещения обмоток в МТТ для получения на выходе обмоток ЭДС приемлемой величины при КЗ в произвольном расщеплении представляет достаточно сложную задачу. Ее можно упростить, если размер обмоток МТТ вдоль оси Y принять равным половине высоты H шинного пакета [63]. Среднюю величину индукции магнитного потока в плоскости обмоток 3 и 4 при расчете параметров защиты можно определить, как

$$B_{x,MTT1} = \int_0^{H/2} \sum_{n=1}^N \frac{\mu_0 I_{2,n}}{2\pi r_{2,n}} \frac{|y_A - y_{2,n}|}{r_{2,n}} dy \text{ и}$$

$$B_{x,MTT2} = \int_{-H/2}^0 \sum_{n=1}^N \frac{\mu_0 I_{2,n}}{2\pi r_{2,n}} \frac{|y_A - y_{2,n}|}{r_{2,n}} dy. \quad (4.14)$$

При этом их разность

$$\Delta B_x = B_{x,MTT1} - B_{x,MTT2}. \quad (4.15)$$

Величина ΔB_x при КЗ в различных парах трубошин, рассчитанная по математическим выражениям (4.14) и (4.15) в интервалах от печного трансформатора до точки КЗ и от точки КЗ до электродов печи приведены во второй строке таблице 4.1. Анализ данных этой строки показывает, что большие значения абсолютных величин разности ΔB_x средних значений горизонтальной составляющей индукции магнитного поля в плоскости обмоток МТТ можно получить, если МТТ также разместить в начале шинного пакета [63].

4.6 Установка для экспериментальных исследований

Защиты на МТТ [34; 61] обладают высокой чувствительностью к ВЗ в обмотках трансформатора, а также к электрическим повреждениям в цепях расщеплений короткой сети рудотермического производства. Однако определение реальных параметров таких защит и их поведение в различных режимах работы возможно только с помощью экспериментальных исследований на экспериментальных стендах.

В связи с этим, на кафедре «Электроэнергетика» НАО «Торайгыров университет» при выполнении научной работы «Совершенствование токовых защит электрооборудования рудотермического производства с однофазными трансформаторами» была разработана и изготовлена экспериментальная установка, которая позволяет осуществлять экспериментальные исследования процессов, происходящих как в трансформаторе, так и в устройстве релейной защиты в различных режимах работы [44].

Принципиальная схема этой установки приведена на рисунке 4.22. В этой экспериментальной установке используется однофазный трансформатор с расщепленной вторичной обмоткой при числе расщеплений $G = 4$, переделанный из трехфазного трансформатора Т-66 мощностью 6,0 кВА. В процессе переделки из сердечника Т-66 был удален один из стержней с обмотками, а на остальные стержни домотана вторичная обмотка. При этом витки $w_{2.1}$ и $w_{2.2}$ вторичной обмотки по схеме на рисунке 4.16 были размещены на левом стержне сердечника трансформатора, а витки $w_{2.3}$ и $w_{2.4}$ – на правом. Части первичной обмотки на оставшихся стержнях были соединены согласно-последовательно. Некоторые электрические параметры переделанного трансформатора ТТ-6 приведены в таблице 2.1.

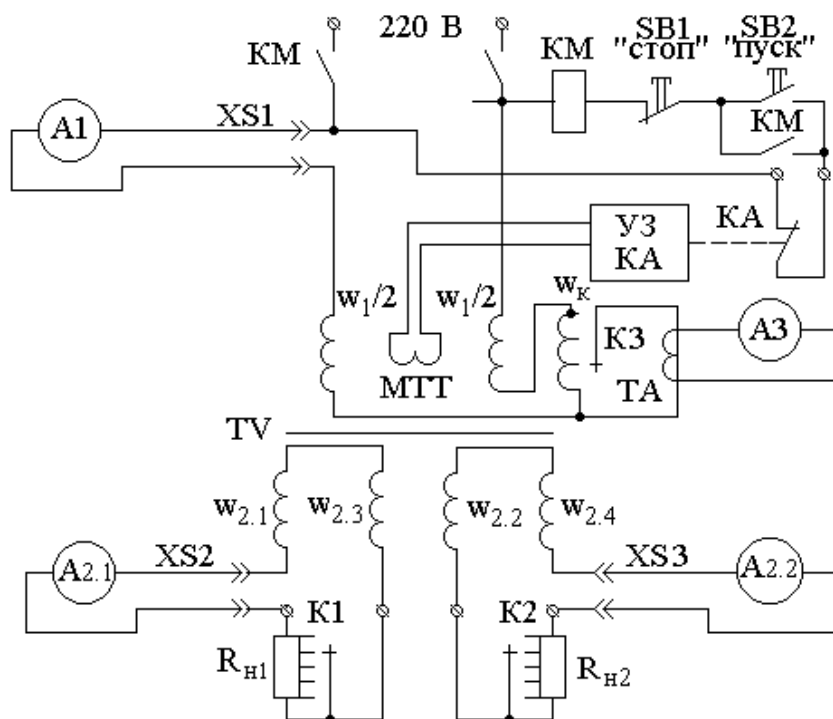


Рисунок 4.22 – Электрическая схема соединений экспериментальной установки

К сети переменного тока напряжением 220В этот однофазный трансформатор подключен с помощью магнитного пускателя КМ типа ПМЕ-200. Управление магнитным пускателем осуществляется кнопками управления SB1 «пуск» и SB2 «стоп» [44]. Последовательно в цепь управления магнитного пускателя подключен нормально-замкнутый контакт КА реле защиты УЗ. Информацию о повреждении УЗ получает от магнитного трансформатора тока МТТ.

В ходе экспериментов с трансформатором выявилось, что токи в ответвлениях вторичной обмотки при одинаковых нагрузках не равны между собой из-за некоторой несимметрии магнитной системы переделанного трансформатора. С целью устранения этого явления витки $w_{2.1}$ согласно - последовательно соединяются с витками $w_{2.3}$ и подключаются к нагрузке $R_{н1}$. В свою очередь витки $w_{2.2}$ согласно - последовательно соединены с $w_{2.4}$ и подключены к нагрузке $R_{н2}$.

В качестве сопротивлений $R_{н1}$ и $R_{н2}$ используются спирали, намотанные на деревянный стержень. Эти сопротивления имеют выводы для обеспечения нагрузки величиной 0; 1,58; 1,06; 0,52 Ом. Изменение нагрузки в процессе эксперимента осуществляется переключателями К1 и К2 типа ПМОФ-45 [44].

Короткозамкнутые витки представляют собой дополнительную обмотку в 1–5 витков наматываемую поверх существующей заводской обмотки одного из стержней. Эта обмотка подключена последовательно с витками первичной обмотки. Количество замкнутых витков и их замыкание осуществляется коммутатором КЗ типа ПМОФ-45. При этом ток в короткозамкнутых витках измеряется с помощью измерительного трансформатора тока УТТ-5М и лабораторного амперметра типа Э355-1 с классом точности 1,5.

Токи I_1 и I_2 в первичной и вторичной обмотках, а также ток I_k в замкнувшихся витках измеряются амперметрами А1, А2.1, А2.2 и А3, подключенными в разрыв цепи фаз с помощью штепсельных розеток ХS1 – ХS3 вилками с перемычками. В качестве амперметров используются приборы типа Э51, Э59 и Д566 с классами точности 1,0; 0,5 и 0,2 соответственно [44].

В соответствии с планом проведения экспериментальных работ на такой экспериментальной установке может исследоваться поведение устройства защиты трансформатора от витковых замыканий в первичной обмотке, а также от повреждений в цепи одного из расщеплений вторичной обмотки с измерительным преобразователем в виде МТТ.

В качестве МТТ при экспериментах могут использоваться катушки от промежуточных реле [51] или изготавливаемые по расчетным данным вручную. Параметры катушек от промежуточных реле приведены в таблице 4.2 [55].

Закрепление МТТ на трансформаторе предполагается осуществлять с помощью реек из текстолита и уголков из алюминия. Обмотки МТТ подключены к устройству защиты УЗ. При этом нормально замкнутые контакты устройства защиты подключаются к цепи управления магнитного пускателя КМ.

Таблица 4.2 – Параметры измерительного преобразователя

Параметры МТТ	№1	№2
Катушка от реле типа	РП-11	РП-25
Средняя величина размеров a_x , a_y и a_z , мм	26, 34 и 21	13, 26 и 19
Число витков w_{II} , вит	12500	6700
Сопротивление, Ом	5600	712

Работа устройства защиты трансформатора основана на измерении пространственного распределения магнитных потоков

рассеяния магнитного поля катушек трансформатора с помощью МТТ [52]. В связи с тем, что пространственное распределение магнитных потоков определено геометрическими размерами элементов трансформатора, величины этих элементов приведены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Геометрические размеры элементов экспериментального трансформатора ТТ-6

Геометрические размеры трансформатора ТТ-6	Величина
Расстояние между стержнями, мм	112
Размер окна по вертикали, мм	130
Диаметр стержня, мм	84
Диаметр первичной и вторичной обмоток, мм	111 и 144
Число витков в ряду первичной и вторичной обмоток	49 и 5
Число рядов первичной и вторичной обмоток	3 и 1

Для регистрации результатов экспериментов используется двухлучевой осциллограф на базе персонального компьютера с программным обеспечением «Елена 2012». на кафедре «Автоматизация и управление» НАО «Торайгыров университет» доктором PhD Крюковой Е. В. под руководством профессора Новожилова А. Н.

Данная экспериментальная установка позволяет исследовать поведение трансформатора и устройства защиты в режиме [44]:

- холостого хода;
- работы неповрежденного трансформатора;
- виткового замыкания в первичной обмотке;
- короткого замыкания в одном из расщеплений вторичной обмотки;
- обрыва в одном из расщеплений вторичной обмотки;
- включения трансформатора в сеть.

Моделирование этих режимов позволяет получить практически все данные необходимые для разработки математической модели трансформатора и оценки адекватности работы устройства защиты в этих режимах. Внешний вид экспериментальной установки [44] приведен на рисунке 4.23.



Рисунок 4.23 – Экспериментальная установка

Заключение

В монографии сделан глубокий анализ теоретических исследований и технических решений в области релейной защиты трансформаторов с токопроводами, выявлены их недостатки и дано новое решение актуальной научной задачи – совершенствование токовых защит электроустановок рудотермического производства. Основные научные и практические результаты, полученные в работе, заключаются в следующем:

1. Выявлено, что используемые на рудотермическом производстве токовые защиты обладают низкой чувствительностью к ВЗ в первичной обмотке печного трансформатора, а также в силу специфики производства нечувствительны к ДЗ и обрывам в параллельных линиях короткой сети.

2. Разработана математическая модель однофазного печного трансформатора, которая позволяет моделировать токи в его обмотках в эксплуатационных стационарных и переходных режимах работы, а также при ВЗ в первичной обмотке при любом количестве расщеплений вторичной обмотки с погрешностью, не превышающей 10-15 %.

3. Предложен простой графоаналитический способ определения сопротивления фазы короткой сети, который основан на использовании результатов измерения падения напряжения в шинном пакете этой фазы, получаемых с помощью обратного измерительного проводника, размещаемого в геометрическом центре шинного пакета, что позволяет практически полностью устранить влияние магнитного поля этой фазы на результаты измерения.

4. Разработана математическая модель однофазного печного трансформатора с короткой сетью, которая позволяет моделировать токи в его обмотках и в параллельных линиях короткой сети при ДЗ и обрывах в этих линиях.

5. Разработан метод математического моделирования магнитного поля витка на ферромагнитном стержне, основанный на методах зеркальных изображений и законе Био-Савара-Лапласа, который позволяет формировать магнитное поле рассеяния обмоток однофазных трансформаторов в эксплуатационном режиме работы и при ВЗ с погрешностью, не превышающей 5-10 %.

6. Разработаны методы математического моделирования магнитного поля одной трубошины и пакета трубошин короткой сети рудотермического производства, основанные на законе Био-Савара-

Лапласа, которые дают возможность моделировать составляющие этих магнитных полей с погрешностью, не превышающей 10 А.

7. Разработана высокочувствительная защита на двух МТТ с сосредоточенной в нескольких местах обмоткой, которая способна надежно защитить обмотку печного трансформатора от ВЗ, а фазы короткой сети от ДЗ и обрывов в любой из их параллельных линий.

8. Разработана защита на одном МТТ с изолирующим корпусом, которая способна надежно защитить фазы короткой сети от ДЗ и обрывов в любой из их параллельных линий.

9. Разработана и установлена в лаборатории на кафедре «Электроэнергетика» НАО «Торайгыров университет» экспериментальная установка, которая позволила осуществить экспериментальную проверку работоспособности всех разработанных защит.

Литература

- 1 Новожилов А. Н., Новожилов Т. А. Релейная защита однофазного трансформатора на магнитных трансформаторах тока. – Павлодар : Изд-во Кереку, 2017. – 117 с.
- 2 Альтгаузен А. П., Бершицкий М. Д. Электрооборудование и автоматика электротермических установок : справочник. – М. : Энергия, 1978. – 304 с.
- 3 Правила устройства электроустановок: все действующие разделы шестого и седьмого изданий с изменениями и дополнениями по состоянию на 1 января 2013 года / ОАО «ВНИИЭ». – М. : КНОРУС, 2013. – 488 с.
- 4 Богданов С. П. Расчет руднотермических печей : метод. указ. – СПб. : СПбГТИ(ТУ), 2011. – 38 с.
- 5 Брускин Д. Э., Зорохович А. Е., Хвостов В. С. Электрические машины. – М. : Высшая школа, 1987. – Ч. 1. – 319 с.
- 6 Данцис Я. Б., Кацевич Л. С., Жилов Г. М. и др. Короткие сети и электрические параметры дуговых электропечей. – М. : Metallurgia, 1987. – 320 с.
- 7 Рожихина И. Д., Нохрина О. И. Конструкции и проектирование дуговых печей: учеб. пос. – Новокузнецк : СГИУ, 2011. – 311 с.
- 8 Холуянов Ф. И. Трансформаторы однофазного и трехфазного тока. – Изд. 4-е, перер. и доп. – Л.; М. : ОНТИ, 1934. – 255 с.
- 9 Аншин В. Ш., Худяков З. И. Сборка трансформаторов : учеб. пос. – Изд. 2-е, перер. и доп. – М. : Высшая школа, 1991. – 288 с.
- 10 Алиферов А. И., Бикеев Р. А., Горева Л. П. и др. Исследование электрических параметров шихтованных пакетов мощных электротехнологических установок // Электротехника, электромеханика и электротехнологии: сб. науч. тр. – Новосибирск, 2014. – С. 103–110.
- 11 Ярымбаш Д. С., Ярымбаш С. Т., Килимник И. М. Идентификация электрических параметров шихтованных шинных пакетов мощных коротких сетей // Электротехника та електроенергетика. – 2012. – № 2. – С. 55–61.
- 12 Нейман Л. Р., Демирчян К. С. Теоретические основы электротехники. – М.–Л. : Энергия, 1967. – Т. 2. – 408 с.
- 13 Миронова А. Н. Анализ методов определения сопротивлений токоподводов дуговых сталеплавильных печей // Вестник Чувашского университета. – 2017. – № 1. – С. 137–144.
- 14 Цейтлин Л. А. Индуктивность проводов и контуров. – Л. : Госэнергоиздат, 1950. – 225 с.

- 15 Данцис Я. Б. Методы электротехнических расчетов руднотермических печей. – Л. : Энергия, 1973. – 188 с.
- 16 Вольдек А. И. Электрические машины. – Л. : Энергия, 1974. – 639 с.
- 17 Федосеев А. М., Федосеев М. А. Релейная защита электроэнергетических систем. – М. : Энергоатомиздат, 1992. – 528 с.
- 18 Чернобровов Н. В. Релейная защита. – Изд. 5-е, перер. и доп. – М. : Энергия, 1974. – 680 с.
- 19 Засыпкин А. С. Релейная защита трансформаторов. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 240 с.
- 20 Хренников А. Ю. Основные причины повреждений обмоток силовых трансформаторов при коротких замыканиях // Электричество. – 2006. – №7. – С. 17–24.
- 21 Беркович М. А., Молчанов В. В., Семенов В. А. Основы техники релейной защиты. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 376 с.
- 22 Ершов А. М. Релейная защита и автоматика в системах электроснабжения: учеб. пос. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2015. – Ч. 4. – 152 с.
- 23 Смелянский М. Я., Бортничук Н. И. Короткие сети электрических печей. – М. ; Л. : Госэнергоиздат, 1962. – 96 с.
- 24 Воробьев М. С., Воскресенский Ю. А., Гончаров И. А. Энергетика СССР в 1986-1990 годах. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 310 с.
- 25 Hague V. Electromagnetis problems in electrical engineering. – London : Oxford University Press, 1929. – 359 p.
- 26 Тихомиров П. М. Расчет трансформаторов. – Изд. 5-е, перер. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 528 с.
- 27 Mullineux N., Reed J. R., White I. J. Current distribution in sheet find foil-wound transfofomtrs // Proc. IEE. – 1969. – Vol. 1. – P. 127–129.
- 28 Rahimberdinova D., Volgina E., Kolesnikov E. et al. Simulation of three-phase transformer operational conditions // News of the national academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. – 2019. – Vol. 5(437). – P. 26–33.
- 29 Новожилов Т. А., Новожилов А. Н., Рахимбердинова Д. М. и др. Моделирование работы однофазного печного трансформатора с одинаковыми вторичными обмотками // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2019. – Т. 23, №3. – С. 575–581.
- 30 Новожилов А. Н., Новожилов Т. А. Определение токов в обмотках однофазного трансформатора для релейной защиты при

витковом замыкании // Омский научный вестник. – 2014. – №9(46). – С. 174–177.

31 Новожилов Т. А., Новожилов А. Н., Волгина Е. М. Область использования магнитных трансформаторов тока в электроэнергетике // Омский научный вестник. – 2018. – №5(161). – С. 67–71.

32 Новожилов А. Н., Андреева О. А., Воликова М. П. и др. Метод формирования системы уравнений математической модели электрических машин и трансформаторов в эксплуатационных режимах // Омский научный вестник. – 2006. – №9(46). – С. 108–112.

33 Новожилов А. Н., Горюнов В. Н., Новожилов Т. А. и др. Моделирование токов при витковом замыкании в трансформаторах руднотермических печей // Электротехника. – 2013. – №4. – С. 27–32.

34 Новожилов Т. А. Защита однофазного трансформатора от электрических и механических повреждений на магнитном трансформаторе тока // Электричество. – 2017. – №6. – С. 65–70.

35 Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. – М. : Высшая школа, 1967. – 775 с.

36 Иванов-Смоленский А. В. Электрические машины. – М. : Энергия, 1980. – 909 с.

37 Novozhilov A. N., Novozhilov T. A., Rakhimberdinova D. M. Simulations of Currents in Conditions of Electrical Damage in the Windings of a Single-Phase Furnace Transformer with a Split Secondary Winding // Russian Electrical Engineering. – 2020. – Vol. 91(6). – P. 403–407.

38 Вишневецки А. Расчет токов, возникающих при внутренних коротких замыканиях в трансформаторах // Электромеханика. – 1969. – №5. – С. 479–486.

39 Корогодский В. И., Кужеков С. П., Паперно Л.Б. Релейная защита электродвигателей напряжением выше 1000 В. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 248 с.

40 Rakhimberdinova D. M., Novozhilov A. N, Novozhilov T. A. Currents in the Bus Assembly of a High-Current System for an Electrofurnace // Russian Engineering Research. – 2020. – Vol. 40(12). – P. 995–999.

41 Кудрявцев, А. А. Максимальная токовая защита на магнитных трансформаторах тока. – М. : Энергоиздат, 1981. – 56 с.

42 Рахимбердинова Д. М., Новожилов А. Н., Новожилов Т. А. Анализ методов определения сопротивлений шинного пакета короткой сети руднотермической печи // XI Торайгыровские чтения: матер. междунар. науч. конф. – Павлодар, 2019. – С. 249–257.

43 Ellis W., Lodi E. Structured Programming Using Turbo BASIC. – London : Academic Press inc. ltd, 1988. – 356 p.

44 Новожилов А. Н., Рахимбердинова Д. М., Новожилов Т. А. Экспериментальная установка для разработки и исследования защит от электрических повреждений в однофазном трансформаторе с расщепленной вторичной обмоткой на магнитных трансформаторах тока // Наука и инновации – Современные концепции : сб. науч. ст. по итогам работы междунар. науч. форума. – М., 2019. – С. 72–77.

45 Новожилов Т. А., Новожилов А. Н., Рахимбердинова Д. М. и др. Практические аспекты моделирования токов в обмотках трансформатора при включении его в сеть // Вестник Торайгыров университета. – 2020. – №4. – С. 293–304.

46 Пат. 2713204 РФ, МПК H02H 7/04. Способ защиты однофазного печного трансформатора с короткой сетью в виде группы шин от электрических повреждений / Новожилов Т. А., Горюнов В. Н., Рахимбердинова Д. М. и др.; опубл. 04.02.20, Бюл. №4. – 5 с.

47 Новожилов А. Н., Новожилов Т. А., Рахимбердинова Д. М. и др. Моделирование магнитных полей рассеяния обмоток трансформатора на круглом стержне для релейной защиты // Вестник Машиностроения. – 2020. – №6. – С. 12–15.

48 Rakhimberdinova D. M., Novozhilov A. N, Novozhilov T. A. et al. Magnetic Field Scattering of a Transformer Winding on a Round Rod for a Safety Relay // Russian Engineering Research. – 2020. – Vol. 40(9). – P. 710–713.

49 Гринберг Г. А. Избранные вопросы математической теории электрических и магнитных явлений. – М. : АН СССР, 1948. – 836 с.

50 Туровский Я. Электромагнитные расчеты элементов электрических машин. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 201 с.

51 Какуевицкий Л. И., Смирнова Т. В. Справочник реле защиты и автоматики. – М. : Энергия, 1972. – 344 с.

52 Алексеев В. С., Варганов Б. И., Панфилов Б. И. и др. Реле защиты. – Л. : Энергия, 1976. – 464 с.

53 Новожилов Т. А., Волгина Е. М., Новожилов А. Н. Измерение переменного тока в проводнике для нужд релейной защиты // Омский научный вестник. – 2016. – №3(147). – С. 67–73.

54 Новожилов А. Н., Волгина Е. М., Рахимбердинова Д. М. и др. Метод моделирования магнитного поля шины с током // Вестник ПГУ. – 2020. – №1. – С. 319–326.

55 Басс Э. И., Жданов Л. С. Катушки реле защиты и автоматики. – М. : Энергия, 1974. – 78 с.

56 Новожилов А. Н., Новожилов Т. А., Рахимбердинова Д. М. Защита короткой сети руднотермических печей // Электричество. – 2021. – №5. – С. 33–38.

57 Rakhimberdinova D., Novozhilov T., Novozhilov A., Kislov A. Protection of the short network of the ore thermal furnace against short circuits // AIP Conference Proceedings. – 2021. – Vol. 2337. – P. 030011-1–030011-4.

58 Новожилов Т. А., Новожилов А. Н., Андреева О. А. Особенности конструкции индукционных преобразователей для релейной защиты и диагностики асинхронного двигателя // Вестник ПГУ. – 2007. – №4. – С. 87–102.

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

60 Разработка защиты трансформаторов руднотермических печей от витковых замыканий: отчет о НИР (заключительный) / Павлодарский государственный университет им. С. Торайгырова. – Павлодар, 2017. – 56 с.

61 Новожилов А. Н., Горюнов В. Н., Новожилов Т. А. Защита однофазного трансформатора от витковых замыканий в обмотках на встроенных магнитных трансформаторах // Электротехника. – 2018. – №2. – С. 59–63.

62. Rakhimberdinova D., Novozhilov A., Kolesnikov E., Goryunov V., Novozhilov T. Buildup of Fault Protection for High-Current Single-Phase Transformers in Ore Furnaces // Energies. – 2024. – 17, 2630. (74 percentile) URL: <https://doi.org/10.3390/en17112630>

63. Rakhimberdinova D., Novozhilov A., Kolesnikov E., Andreeva O., Talipov O., Kislov A. Arc Fault Protection of the High-Current Busbar Assembly of an Ore Furnace // Energies. – 2023, 16, 7834. (74 percentile) URL: <https://doi.org/10.3390/en16237834>

Нормативные ссылки

В настоящей монографии использованы ссылки на следующие стандарты:

ГОСТ Р 54149-2010. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в электроснабжении общего вида.

ГОСТ 7746-2015. Трансформаторы тока. Общие технические условия.

ГОСТ 7.32-2001. Отчет о научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления (изменения от 2006 г.).

ГОСТ 7.1-2003. Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу.

ГОСТ 50345-2010 (МЭК 60898-1:2003). Аппаратура малогабаритная электрическая.

ГОСТ 13109-97. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения

ГОСТ 30830-2002 (МЭК 60076-1-93). Трансформаторы силовые. Часть 1. Общие положения.

Определения

В настоящей монографии применяются следующие термины с соответствующими определениями:

Короткая сеть – совокупность проводников, соединяющих низковольтные выводы источника питания (печного трансформатора) с рабочей зоной электрической печи, включая устройства электрической изоляции, системы охлаждения, конструкции крепления проводников и других элементов.

Система диагностики – электрические методы, способы и устройства для контроля и выявления повреждений и ненормальных режимов электрического оборудования и машин, основанные на создании в контролируемом объекте электрического поля либо непосредственным воздействием на него электрическим возмущением либо косвенно с помощью воздействия возмущениями неэлектрической природы.

Чувствительность системы диагностики – это свойство, характеризующее способность выявлять повреждения в системы диагностики в минимальном режиме работы энергосистемы.

Измерительный преобразователь – техническое средство, служащее для преобразования измеряемой величины в другую величину или измерительный сигнал, удобный для обработки, хранения, дальнейших преобразований, индикации и передачи.

Надежность электроснабжения – способность выполнять заданные функции, сохраняя эксплуатационные показатели в условиях, оговоренных в нормативных документах.

Номинальное значение параметра (номинальный параметр) – указанное изготовителем электротехнического устройства значение параметра, являющееся исходным для отсчета отклонений от этого значения при эксплуатации и испытаниях устройства.

Математическая модель – модель объекта, процесса или явления, представляющая собой математические закономерности, с помощью которых описаны основные характеристики моделируемого объекта, процесса или явления.

Потребитель электрической энергии – электрический приемник или группа электрических приемников, объединенных технологическим процессом и размещающихся на определенной территории.

Система электроснабжения общего назначения – совокупность электроустановок и электрических устройств энергоснабжающей организации, предназначенных для обеспечения

электрической энергией различных потребителей.

Техническое средство – изделие, оборудование, аппаратура или их составные части, функционирование которых основано на законах электротехники, радиотехники и (или) электроники, содержащие электронные компоненты и (или) схемы, которые выполняют одну или несколько следующих функций: усиление, генерирование, преобразование, переключение и запоминание.

Электрическая сеть – совокупность электроустановок для передачи и распределения электрической энергии, состоящего из подстанции, распределительных устройств, токопроводов, воздушных и кабельных линий электропередачи, работающих на определенной территории.

Обозначения и сокращения

КЗ	– короткое замыкание
ВЗ	– витковое замыкание
ТО	– токовая отсечка
МТЗ	– максимальная токовая защита
ТТ	– трансформатор тока
МТТ	– магнитный трансформатор тока
ОЗЗ	– однофазные замыкания на землю
ОЗК	– однофазные замыкания на корпус
ПУЭ	– правила устройства электроустановок
КПД	– коэффициент полезного действия
a	– расстояние между осями трубошин
l_1, l_2, l_3	– длины фаз шинного пакета однофазные
l	– расстояние между фазами
ЭВМ	– электронная вычислительная машина
G	– число расщеплений вторичной обмотки
μ_0	– магнитная проницаемость вакуума
R_i	– активное сопротивление i -го проводника
$r_{ф.к.с}$	– активное сопротивление фазы короткой сети
$x_{ф.к.с}$	– реактивное сопротивление фазы короткой сети
I_{xx}	– ток холостого хода
$I_{ном}$	– ток номинальной нагрузки
R_0	– сопротивление проводника постоянному току
I	– ток в проводнике
ЭДС	– электродвижущая сила
f	– частота тока
r и x	– активные и реактивные сопротивления короткой сети
ΔU	– падение напряжения
φ	– падение угол сдвига фаз
I_ϕ	– фазный ток
$I_{нам}$	– ток намагничивания

$t_{\text{доп}}$	– допустимое время перегрузки
\dot{U}_1	– напряжение на первичной обмотке
\dot{I}_i	– токи в обмотках
K_d	– коэффициент добавочных потерь
$K_{\text{п}}$	– коэффициент поверхностного эффекта
$K_{\delta ik}$	– коэффициент близости;
W	– число витков
S	– сечение витка
E	– электродвижущая сила ЭДС
$U_{\text{ф.к.с}}$	– падения напряжения в фазе короткой сети
$P_{\text{ф.к.с}}$	– падения активной мощности в фазе короткой сети
$Z_{\text{ф.к.с}}$	– общее сопротивление фазы короткой сети
$I_{\text{нам}}$	– ток намагничивания
\dot{I}_i	– токи в обмотках
R_i, X_i	– активные и индуктивные сопротивления в обмотках
$Z_{\text{iЛ}}$	– полное сопротивление короткой сети
$Z_{\text{н}}$	– полное сопротивление нагрузки
K_1 и K_2	– ключи
$I_{\text{сз}}$	– ток срабатывания сигнализации
L_{is}	– индуктивность короткой сети
$k_{\text{н}}$	– коэффициент надежности
\dot{U}_1	– напряжение на первичной обмотке
\dot{I}_i	– токи в обмотках
R_i, X_i	– активные и индуктивные сопротивления в обмотках
$Z_{\text{iЛ}}$	– полное сопротивление короткой сети
$Z_{\text{н}}$	– полное сопротивление нагрузки
$I_{\text{сз}}$	– ток срабатывания сигнализации
$L_{\text{ин}}$	– индуктивность нагрузки
Ψ_i	– потокосцепления обмоток
w_1	– число витков первичной обмотки
ω	– угловая скорость сети
$U_{1\text{м}}$	– амплитудное значение напряжения в сети
АТВ	– автотрансформатор
ТВ	– исследуемый однофазный трансформатор
$B_{y, \text{вр}}$	– аксиальная составляющая индукции магнитного поля реального и отраженного проводников с токами

$I_{\text{нб}}$ – ток небаланса
 $k_{\text{отс}}$ – коэффициент отстройки

В монографии использованы традиционные для электротехнической литературы единицы измерения: А, В, Ом, Гн, Гц, Вт, м, мм, мм², об/мин.

Приложение А
(обязательное)

Патент

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2713204

**СПОСОБ ЗАЩИТЫ ОДНОФАЗНОГО ПЕЧНОГО
ТРАНСФОРМАТОРА С КОРОТКОЙ СЕТЬЮ В ВИДЕ
ГРУППЫ ШИН ОТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОВРЕЖДЕНИЙ**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Омский государственный технический университет" (ОмГТУ) (RU)*

Авторы: *Новожилов Тимофей Александрович (RU), Горюнов Владимир Николаевич (RU), Новожилов Александр Николаевич (KZ), Рахимбердинова Дилара Муратовна (KZ)*

Заявка № 2019127978

Приоритет изобретения 05 сентября 2019 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 04 февраля 2020 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 05 сентября 2039 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев Г.П. Ивлиев

Приложение Б (обязательное)

Патент

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ РЕСПУБЛИКА КАЗАХСТАН

REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

**ПАТЕНТ
PATENT**

№ 36631

ӨНЕРТАБЫСҚА / НА ИЗОБРЕТЕНИЕ / FOR INVENTION

 (21) 2022/0688.1

(22) 02.11.2022

(45) 01.03.2024

(54) Шина пакетіндегі құбырлардың қатарлы, бифилярлы орналасуы бар бір фазалы ток өткізгішті қорғау құрылғысы
Устройство защиты однофазного токопровода с рядным, бифилярным расположением трубошин в его шинном пакете
Protection device for single-phase conductor with in-line, bifilar arrangement of tubes in its busbar package

(73) «Торайғыров университеті» коммерциялық емес акционерлік қоғамы (KZ)
Некоммерческое акционерное общество «Торайғыров университет» (KZ)
«Toraighyrov University» Non-profit joint stock company (KZ)

(72) Рахимбердинова Дилара Муратовна (KZ) Rakhimberdinova Dilara Muratovna (KZ)
Новожилов Александр Николаевич (KZ) Novozhilov Alexander Nikolaevich (KZ)
Новожилов Тимофей Александрович (RU) Novozhilov Timofey Aleksandrovich (RU)
Колесников Евгений Николаевич (KZ) Kolesnikov Evgeniy Nikolaevich (KZ)



ЭЦҚ қол қойылды
Подписано ЭЦП
Signed with EDS

А. Артыкова
А. Артыкова
А. Artykova

«Ұлттық зияткерлік меншік институты» РМК директорының м.а.
И.о. директора РГП «Национальный институт интеллектуальной собственности»
Executive director of RSE «National institute of intellectual property»

Приложение В
(обязательное)

Патент

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2805995

**УСТРОЙСТВО ЗАЩИТЫ ТОКОПРОВОДА С
РЯДНЫМ, БИФИЛЯРНЫМ РАСПОЛОЖЕНИЕМ
ТРУБОШИН В ЕГО ШИННОМ ПАКЕТЕ**

Патентообладатель: *Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Омский государственный технический университет" (RU)*

Авторы: *Новожилов Тимофей Александрович (RU), Новожилов Александр Николаевич (KZ), Рахимбердинова Дилара Муратовна (KZ), Исенов Жанат Сансызбаевич (KZ)*

Заявка № **2023104401**

Приоритет изобретения **28 февраля 2023 г.**

Дата государственной регистрации
в Государственном реестре изобретений
Российской Федерации **24 октября 2023 г.**

Срок действия исключительного права
на изобретение истекает **28 февраля 2043 г.**

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 429b6a0fe3853164ba196f83b73b4aa7
Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 19.01.2023 по 02.08.2024

Ю.С. Зубов



Содержание

	Введение (<i>Рахимбердинова Д. М.</i>)	3
1	Особенности конструкции комплекса «рудотермическая печь» и его защит (<i>Рахимбердинова Д. М.</i>)	5
1.1	Особенности электроснабжения рудотермического производства (<i>Рахимбердинова Д. М.</i>)	5
1.2	Конструкционные особенности печных трансформаторов (<i>Рахимбердинова Д. М.</i>)	8
1.3	Конструкционные особенности коротких сетей (<i>Рахимбердинова Д. М.</i>)	14
1.4	Сопrotивления короткой сети комплекса (<i>Рахимбердинова Д. М.</i>)	21
1.5	Токи в нормальных и аварийных режимах работы комплекса (<i>Рахимбердинова Д. М.</i>)	29
1.6	Релейная защита комплекса (<i>Рахимбердинова Д. М.</i>)	34
2	Совершенствование теории моделирования параметров печного трансформатора и короткой сети (<i>Рахимбердинова Д. М.</i>)	44
2.1	Моделирование токов в печном трансформаторе в нормальных эксплуатационных режимах работы (<i>Рахимбердинова Д. М.</i>)	44
2.2	Моделирование токов в печном трансформаторе при витковом замыкании в первичной обмотке (<i>Рахимбердинова Д. М.</i>)	50
2.3	Моделирование токов при электрических повреждениях в короткой сети (<i>Рахимбердинова Д. М.</i>)	54
2.4	Моделирование токов в трансформаторе при включении его в сеть (<i>Рахимбердинова Д. М.</i>)	63
3	Совершенствование теории моделирования магнитных полей в комплексе «рудотермическая печь» (<i>Рахимбердинова Д. М.</i>)	70
3.1	Моделирование магнитного поля рассеяния обмотки трансформатора (<i>Рахимбердинова Д. М.</i>)	70
3.2	Моделирование магнитного поля трубошины (<i>Рахимбердинова Д. М.</i>)	77
3.3	Моделирование магнитного поля пакета трубошин короткой сети (<i>Рахимбердинова Д. М.</i>)	80
4	Совершенствование основ построения защит комплекса «рудотермическая печь» (<i>Новожиллов А. Н., Рахимбердинова Д. М.</i>)	86

4.1	Особенности построения магнитных трансформаторов тока (<i>Рахимбердинова Д. М.</i>)	86
4.2	Реагирующие органы защиты на магнитных трансформаторах тока (<i>Рахимбердинова Д. М.</i>)	94
4.3	Устройство релейной защиты печного трансформатора с короткой сетью от электрических повреждений (<i>Новожилов А. Н.</i>)	99
4.4	Устройство релейной защиты короткой сети на МТТ с одной обмоткой (<i>Новожилов А. Н.</i>)	108
4.5	Устройство релейной защиты короткой сети на МТТ с двумя обмотками (<i>Новожилов А. Н.</i>)	112
4.6	Установка для экспериментальных исследований (<i>Рахимбердинова Д. М.</i>)	114
	Заключение (<i>Рахимбердинова Д. М.</i>)	119
	Литература	121
	Нормативные ссылки	126
	Определения	127
	Обозначения и сокращения	129
	Приложение А (обязательное)	132
	Приложение Б (обязательное)	133
	Приложение В (обязательное)	134

А. Н. Новожилов, Д. М. Рахимбердинова

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТОКОВЫХ ЗАЩИТ
ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ РУДОТЕРМИЧЕСКОГО
ПРОИЗВОДСТВА С ОДНОФАЗНЫМИ
ТРАНСФОРМАТОРАМИ**

Монография

Технический редактор З. С. Исакова
Компьютерная верстка О. В. Саула

Подписано в печать 27.04.2026 г.
Гарнитура Times.
Формат 29,7 x 42 ¼. Бумага офсетная.
Усл.печ. л. 7,9. Тираж 500 экз.
Заказ № 4528

Toraighyrov University
140008, г. Павлодар, ул. Ломова, 64