

И. В. Новаш
Ф. А. Романюк
В. Ю. Румянцев
Ю. В. Румянцев

ИСПЫТАНИЯ МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ
ТОКОВЫХ ЗАЩИТ:
ТЕОРИЯ, МОДЕЛИРОВАНИЕ, ПРАКТИКА

Минск
БНТУ
2021

УДК 621.316.925

Новаш, И. В. Испытания микропроцессорных токовых защит: теория, моделирование, практика / И. В. Новаш, Ф. А. Романюк, В. Ю. Румянцев, Ю. В. Румянцев. – Минск : БНТУ, 2021. – 168 с. – ISBN 978-985-583-726-9.

В монографии рассматриваются вопросы теории, математического моделирования, практических приемов испытаний микропроцессорных токовых защит и их моделей с помощью испытательных установок и компьютерных программных комплексов.

Монография рассчитана на научных сотрудников и инженерно-технический персонал энергосистем, будет полезна преподавателям, аспирантам, магистрантам и студентам вузов.

Табл. 10. Ил. 102. Библиогр. назв. 96.

Рекомендовано к изданию научно-техническим советом
Белорусского национального технического университета
(протокол № 11 от 22.10.2021)

Р е ц е н з е н т ы :

профессор кафедры «Электроснабжение», доктор
технических наук, профессор *В. А. Анищенко*;
начальник управления релейной защиты и автоматики
ГПО «Белэнерго», канд. техн. наук *М. А. Шевалдин*

ISBN 978-985-583-726-9

© Новаш И. В., Романюк Ф. А.,
Румянцев В. Ю., Румянцев Ю. В., 2021
© Белорусский национальный
технический университет, 2021

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

АД – асинхронный двигатель;
АЦП – аналого-цифровой преобразователь;
БНТ – бросок намагничивающего тока;
ДЗТ – дифференциальная токовая защита;
ДПФ – дискретное преобразование Фурье;
ИУ – испытательная установка;
ИПК – испытательный программный комплекс;
ИПАК – испытательный программно-аппаратный комплекс;
ИО – измерительный орган;
КМРВ – комплексы моделирования в реальном времени;
КПК – компьютерный программный комплекс;
КТП – комплектная трансформаторная подстанция;
КФ – косинусный фильтр;
МНК – метод наименьших квадратов;
МПТДЗ – микропроцессорная токовая дифференциальная защита;
МТЗ – микропроцессорная токовая защита;
МУРЗА - микропроцессорные устройства релейной защиты и автоматики;
ОЭО – обобщенный электроэнергетический объект;
ПДК – программно-аппаратный диагностический комплекс;
ПО – программное обеспечение;
ПУ – проверочная установка;
РЗ – релейная защита;
РЗА – релейная защита и автоматика;
СДМ – система динамического моделирования;
ТТ – трансформатор тока;
ТН – трансформатор напряжения;
ФОС – формирователь ортогональных составляющих;
ФНЧ – фильтр нижних частот;
ЦФ – цифровой фильтр;
ЭЗАС – экспоненциально затухающая аperiodическая составляющая.

ПРЕДИСЛОВИЕ

На кафедре «Электрические станции» Белорусского политехнического института (БПИ) в 1967 году была создана доктором технических наук, профессором В. И. Новашем научная школа в области разработки, информационного и математического обеспечения микропроцессорных устройств релейной защиты и автоматики электроэнергетических систем. На протяжении многих десятилетий коллективом учеников В. И. Новаша под руководством члена-корреспондента НАН Беларуси, доктора технических наук, профессора Ф. А. Романюка в рамках существующей научной школы проводятся исследования в области разработки и совершенствования микропроцессорных устройств релейной защиты и автоматики (МУРЗА) энергосистем. Основным методом исследования и количественного анализа поведения МУРЗА при повреждениях в энергосистеме принят метод математического моделирования и вычислительного эксперимента.

Под руководством В. И. Новаша и при его непосредственном участии в 1982 году была разработана и внедрена на Лукомльской ГРЭС первая в СССР микропроцессорная защита от замыканий на землю обмотки статора и перегрузки обмотки ротора синхронного генератора мощностью 300 МВт [1]. С тех пор МУРЗА используются практически на всех новых и реконструируемых электроэнергетических объектах Республики Беларусь.

Одновременно с появлением МУРЗА стали разрабатываться испытательные комплексы для проверки работоспособности электро-механических релейных защит (РЗ) и защит на основе микропроцессорных устройств. Одним из лидеров по производству испытательных комплексов является компания OMICRON, основанная почти 30 лет назад в маленьком австрийском городке. Сегодня это международная компания с зарубежными офисами и заказчиками во многих странах.

Необходимо отметить, что идея создания программируемых диагностических устройств, программно-аппаратных диагностических комплексов (ПДК) была выдвинута на кафедре «Электрические станции» практически одновременно с основанием компании OMICRON. Но уже в те далекие годы принципиальным отличием предлагаемых кафедрой ПДК по сравнению с испытательными

установками OMICRON было то, что испытания предлагалось проводить не простейшими синусоидальными сигналами с изменяющейся амплитудой, а тестовыми воздействиями, аналогичными входным сигналам РЗ в реальных условиях аварийных режимов.

Для получения таких тестовых сигналов на кафедре «Электрические станции» были разработаны комплексные математические модели основного электроэнергетического оборудования (синхронных генераторов, силовых трансформаторов, асинхронных и синхронных двигателей), а также измерительных трансформаторов и устройств РЗ. Для реализации компьютерного вычислительного эксперимента получены эффективные алгоритмы решения математических моделей и созданы программные комплексы для расчетов и визуализации результатов.

На базе компьютерных программных комплексов и испытательных установок созданы испытательные программно-аппаратные комплексы для проведения исследований работоспособности микропроцессорных токовых защит в различных аварийных режимах защищаемого электроэнергетического оборудования.

Проведены испытания токовых защит линий, силовых трансформаторов, асинхронных двигателей и выявлены особенности их функционирования при искажении информационных сигналов от трансформаторов тока вследствие насыщения их магнитопроводов.

Разработаны в системе динамического моделирования MATLAB испытательные программные комплексы для исследования моделей релейных защит методом вычислительного эксперимента совместно с моделями защищаемого электрооборудования.

Монография является результатом многолетней совместной работы творческого коллектива. В ней в значительной степени обобщены материалы журнальных публикаций, а также отражены результаты проведенных совместно с сотрудниками и аспирантами научных исследований в области разработки цифровых устройств РЗ, их математического моделирования и проверки работоспособности с помощью компьютерных испытательных комплексов.

Авторы благодарны рецензентам издания за ряд ценных замечаний и предложений, позволивших улучшить его содержание.

ВВЕДЕНИЕ

«Программно-аппаратный диагностический комплекс состоит из ПЭВМ и аппаратной части, содержащей цифроаналоговый преобразователь и полупроводниковый усилитель тока. ПЭВМ вырабатывает коды выбора мгновенных значений вторичных токов трансформаторов тока защищаемой линии. Аппаратная часть преобразует эти коды в аналоговые сигналы соответствующей формы и мощности». Эта цитата из отчета НИР 2002 года «Разработка программного обеспечения аппаратно-диагностического комплекса для функциональных испытаний микропроцессорных токовых защит линий 6-35 кВ» [2] показывает, что идея создания программно-аппаратных диагностических комплексов (ПДК) выдвигалась одновременно с развитием таких мировых лидеров в области диагностики устройств релейной защиты и автоматики (РЗА), как OMICRON.

Кафедрой «Электрические станции» в конце девяностых годов прошлого века предлагалось разработать совместно с НАН Беларуси программное обеспечение и создать ПДК для функциональных испытаний микропроцессорных токовых защит, которые в то время начали осваивать белорусские энергетики. К тому времени на кафедре «Электрические станции» были разработаны компьютерные программные комплексы (КПК) для расчета в ходе вычислительного эксперимента тестовых информационных сигналов от трансформаторов тока и напряжения, соответствующих различным аварийным режимам защищаемого электроэнергетического оборудования. Также была разработана концепция и структурная схема аппаратной части диагностического устройства, опытный образец которого предполагалось создать на базе НАН Беларуси.

К сожалению, в те тяжелые годы становления Республики Беларусь завершить создание опытного образца испытательного устройства не удалось. Работа по созданию КПК для испытательных установок на кафедре «Электрические станции» продолжается и по настоящее время, а в качестве испытательных установок используются ПДК компании OMICRON.

Цифровые устройства РЗ получают массовое применение в электрических сетях, на трансформаторных подстанциях, а также в системах питания силового электрооборудования.

В электроэнергетической системе Беларуси эксплуатируются микропроцессорные токовые защиты линий электропередачи, силовых трансформаторов, сборных шин, синхронных генераторов и др. В настоящее время РУП «Белэлектромонтажналадка» разрабатывает и выпускает различные типы микропроцессорных защит. Ведется разработка защит с новыми принципами, проверка работоспособности которых выполняется с помощью испытательных комплексов.

С развитием вычислительной техники и появлением высокопроизводительных компьютеров появилась возможность совершенствования испытательных комплексов по двум направлениям.

Первое направление – это комплексное математическое моделирование защищаемого энергетического объекта совместно с устройствами его защиты. Программная реализация таких комплексных математических моделей позволяет создавать испытательные программные комплексы (ИПК) для исследования поведения защиты методом вычислительного эксперимента. Достоинством такого метода является исследование модели защиты с новыми принципами на этапе их проектирования еще до создания опытного образца. Появляется возможность отработать новые принципы микропроцессорных устройств защиты и проверить их работоспособность при аварийных режимах, которые невозможно искусственно получить на реальных энергетических объектах. Основная трудность создания таких ИПК – это разработка математических моделей защищаемого объекта совместно с исследуемой защитой, алгоритмов их решения и программной реализации вычислительного эксперимента.

Второе направление – это использование комплексных математических моделей энергетического объекта для создания КПК, позволяющих получать информационные сигналы защиты в рабочих и аварийных режимах защищаемого объекта. КПК воспроизводят комплексную математическую модель объекта и измерительных трансформаторов во всех режимах, на которые должна реагировать испытываемая защита. Электроэнергетический объект – это узел нагрузки, понизительная подстанция, в состав которого входит конкретный защищаемый объект (отходящая линия, трансформатор, питающий ввод, крупный электродвигатель и т. п.). Программный комплекс выработки входных сигналов выдает результаты в виде временных последовательностей численных величин мгновенных значений вторичных токов и напряжений измерительных транс-

форматоров, к которым присоединено испытываемое устройство РЗ. В аппаратной части ПДК эти коды преобразуются в аналоговые сигналы, усиливаются и в реальном масштабе времени подаются на испытываемое устройство защиты. Такие испытательные комплексы содержат в своем составе аппаратную часть, к которой присоединяется конкретная испытываемая защита. Поэтому подобные устройства называют испытательными программно-аппаратными комплексами (ИПАК).

Преимущества проведения испытаний с помощью ИПК и ИПАК, по сравнению с существующей практикой функциональных испытаний простейшими синусоидальными сигналами с изменяемой амплитудой, заключаются в возможности исследования работоспособности микропроцессорных защит в различных рабочих и аварийных режимах электроэнергетической системы при возможных искажениях информационных сигналов.

Цель данной монографии – рассмотрение основных вопросов теории и практического использования математического моделирования для создания КПК, и проведения функциональных испытаний микропроцессорных защит и их моделей с помощью ИПК и ИПАК.

Материал монографии делится на четыре части.

В первой главе изложены вопросы построения испытательных комплексов. В зависимости от целей решаемых задач по-разному может быть организовано функционирование моделирующего комплекса. Рассмотрены комплексы с разомкнутым и с замкнутым циклом тестирования защит.

Во второй главе рассмотрены КПК выработки тестовых информационных сигналов для функциональных испытаний реальных устройств РЗ с помощью ИПАК. Приведены результаты вычислительных экспериментов различных аварийных режимов защищаемого электроэнергетического оборудования и рассмотрена методика создания тестовых сигналов в формате COMTRADE для подачи их на испытываемую защиту с помощью испытательной установки.

В третьей главе монографии рассмотрены примеры построения ИПК в системе динамического моделирования (СДМ) MatLab-Simulink. Приведены примеры испытательных комплексов для исследования моделей защит и рассмотрены вопросы построения функциональных блоков моделирования в MatLab-Simulink элементов электроэнергетических систем, измерительных трансформаторов

ров тока и цифровых элементов токовых измерительных каналов микропроцессорных защит.

Четвертая глава монографии посвящена вопросам развития и совершенствования цифровых фильтров РЗ на основе их математического моделирования и проверки функциональных возможностей методом вычислительного эксперимента. Рассмотрены примеры построения цифровых фильтров токовых микропроцессорных защит и методы повышения их быстродействия и точности определения действующих значений измеряемых токов при значительных несинусоидальных искажениях последних.

Монография будет полезной для научных сотрудников и инженерно-технического персонала энергосистем, а также для студентов, магистрантов, аспирантов и преподавателей вузов электроэнергетических специальностей при освоении методов и практических приемов испытания микропроцессорных защит и их моделей с помощью испытательных программных и программно-аппаратных комплексов.

1. ИСПЫТАТЕЛЬНЫЕ КОМПЛЕКСЫ ДЛЯ ПРОВЕРКИ УСТРОЙСТВ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ

Испытательные комплексы для проверки работоспособности РЗ появились практически одновременно с самими защитами. По мере совершенствования защит от электромеханических устройств до цифровых микропроцессорных систем совершенствовались и развивались также и испытательные стенды от простейших наборов испытательных активных сопротивлений и индуктивностей (рис. 1.1) до микропроцессорных программно-аппаратных испытательных комплексов (рис. 1.2, 1.3) [3].



Рис. 1.1. Испытательные установки:

- а – набор индуктивностей фирмы General Electric для проверки электромеханических реле защиты;
- б – испытательная установка типа TURH-20 (ASEA) для проверки электромеханических реле защиты, содержащая наборы индуктивностей и активных сопротивлений

НПП «Динамика» (Россия) [4] является ведущим разработчиком и изготовителем компьютерных испытательных систем для автоматизированной проверки устройств РЗА и электромеханических приборов. «РЕТОМ-51» и «РЕТОМ-61» в сочетании с компьютером типа Notebook позволяют качественно и объективно выполнять проверочные работы на сложных панелях и в шкафах РЗ.



Рис. 1.2. Микропроцессорные аппаратно-программные испытательные комплексы

В компании OMICRON [5], которая была основана почти 30 лет назад, первоначально решили начать разработку компактных испытательных установок для проверки защитных и измерительных устройств, применяемых на энергетических предприятиях. Сейчас ассортимент продукции компании простирается от испытательных установок для силовых трансформаторов, выключателей, вращающихся машин и кабельных линий электропередачи до проверочного и калибровочного оборудования для электромеханических и микропроцессорных РЗ, счетчиков электроэнергии, преобразователей или анализаторов качества электроэнергии.

Испытательное устройство OMICRON CMC 356 – универсальное устройство для проведения испытаний РЗ любого поколения и типа (рис. 1.3). Шесть силовоточных выходов (трехфазный режим работы: до 64 А / 860 ВА на канал) с большим динамическим диапазоном позволяют использовать прибор для испытания электромеханических реле под высокой нагрузкой с очень высокой потребляемой мощностью. Устройство позволяет выполнять проверку вторичных цепей трансформаторов тока мощным первичным током, вводимым с испытательного комплекта.

Предприятие ЗАО «ЭнЛАБ» [6] занимается разработкой, производством и поставкой различных видов электротехнических изделий, в первую очередь, средств диагностики и испытаний электро-

технического оборудования, а также оказывает инженерные и консалтинговые услуги. ЗАО «ЭнЛАБ» является эксклюзивным представителем в России известных компаний «RTDS» и «Manitoba HVDC Research Centre», Канада.



Рис. 1.3. Устройство OMICRON CMC 356 и испытываемое микропроцессорное реле

Наибольший интерес с точки зрения испытательных комплексов имеет цифровой программно-аппаратный комплекс RTDS (Real Time Digital Simulator) моделирования энергосистем в реальном времени (рис. 1.4).

В основе архитектуры комплекса RTDS лежит принцип параллельных вычислений, что позволяет комплексу моделировать энергосистему в режиме реального времени. Моделирование проводится с шагом по времени Δt равным 50 мкс для режимов энергосистемы и 1–3 мкс для быстродействующей электронной аппаратуры. Программно-аппаратные решения, применяемые в комплексах RTDS, позволяют осуществлять моделирование процессов в энергосистеме с учетом влияния реального оборудования, подключенного к ее модели. Например, при исследовании работы релейной защиты совместно с моделью энергосистемы (рис. 1.5): при срабатывании, реальная защита будет воздействовать на виртуальный выключатель в модели, что дает возможность изучить поведение энергосистемы после срабатывания РЗ.



Рис. 1.4. Цифровой программно-аппаратный комплекс RTDS моделирования энергосистем в реальном времени

1.1. Испытательные программно-аппаратные комплексы

Испытание устройств РЗ с помощью ИПАК может проводиться одним из двух способов: в режиме замкнутого контура (closed-loop) или в режиме разомкнутого контура (open-loop) (рис. 1.6) [7].

Тестирование в режиме замкнутого контура требует наличие обратной связи между функционирующей в режиме реального времени моделью энергосистемы и испытуемой РЗ. Моделирование энергосистемы воспроизводится в режиме реального времени в программной части испытательного комплекса в темпе протекания реальных физических процессов.

Исследование устойчивости энергосистемы при изменении режимов генерирующего и потребляющего электрооборудования, состояния устройств релейной защиты требуют проведения испытаний с помощью цифровых симуляторов в режиме замкнутого контура. При этом должны быть смоделированы обратные связи между функционирующей в режиме реального времени моделью энергосистемы и внешними устройствами, подключенными к испытательному комплексу.

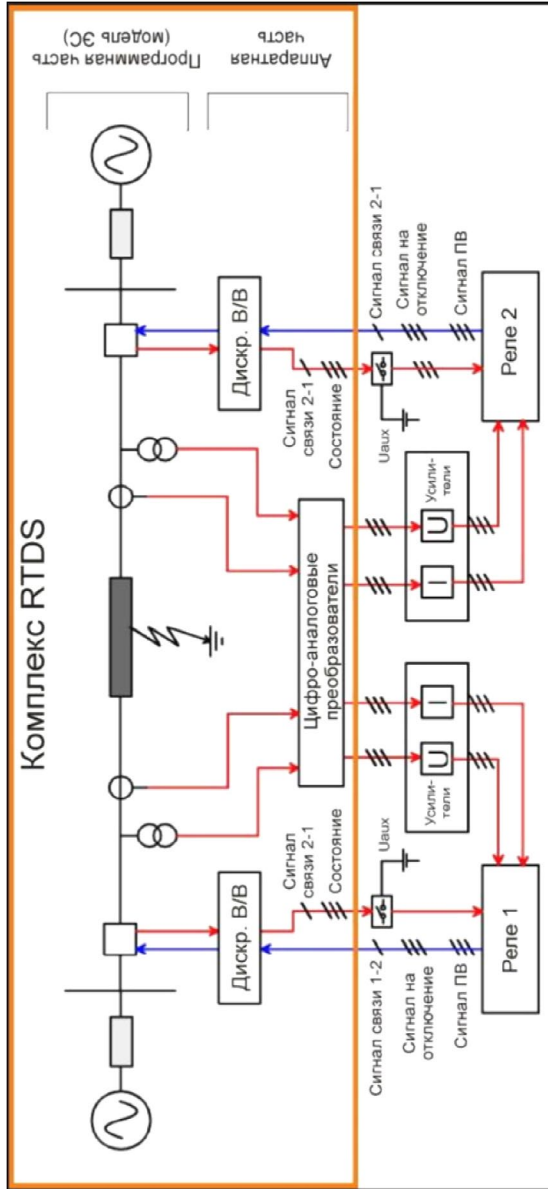


Рис. 1.5. Структурная схема испытания цифровой защиты с помощью комплекса RTDS

1. Испытательные комплексы...

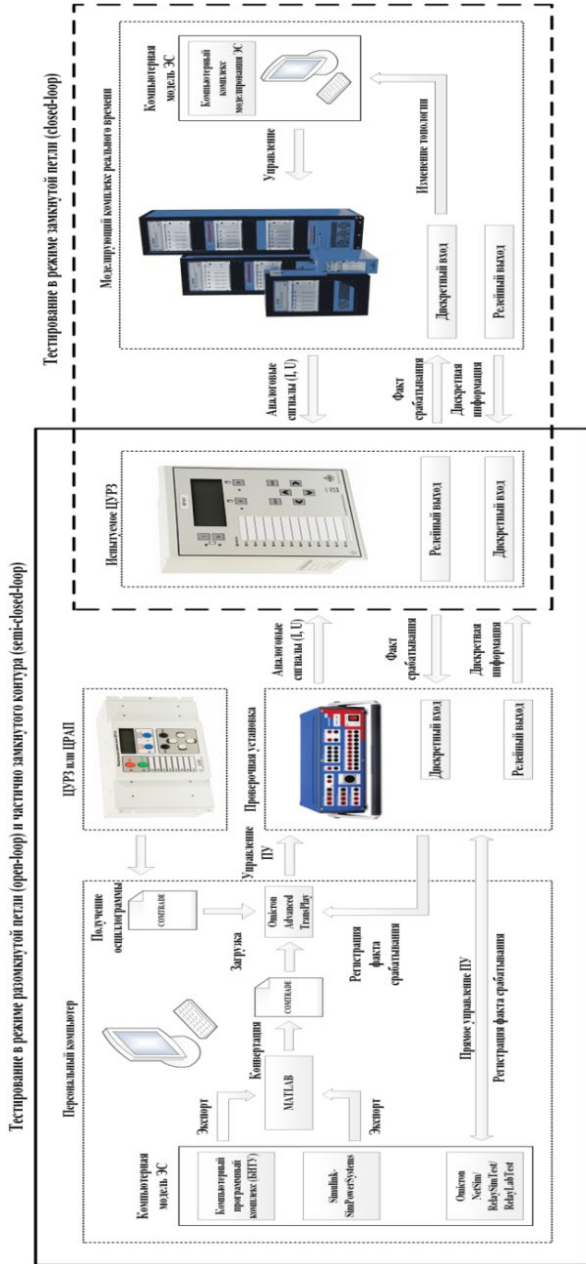


Рис. 1.6. Способы организации тестирования защит

1.1.1. Моделирование энергосистемы и испытание устройств релейной защиты в режиме реального времени

Моделирование режимов энергосистемы, при котором расчет параметров системы (мгновенных значений токов, напряжений и др.) в ходе вычислительного эксперимента получается в темпе, соответствующем скорости протекания процессов, называют моделированием в режиме реального времени. Моделирование энергосистемы в реальном времени с физическим подключением устройств релейной защиты к моделирующей установке, на сегодняшний день является наиболее эффективным методом тестирования вторичного электрооборудования, а также для исследования режимов функционирования энергосистемы в переходных и аварийных режимах [8, 9].

Такой метод моделирования предъявляет очень жесткие требования к аппаратной части моделирующего комплекса по скорости вычислений и передачи данных от модели к испытываемому устройству. Подключаемое к моделирующему комплексу внешнее устройство защиты должно функционировать с организацией всех обратных связей между моделью и этим устройством. При изменении режима модели энергосистемы изменение состояния испытываемой защиты, а также ответная реакция энергосистемы должны происходить максимально приближенно к тому, как это происходит в реальных условиях.

Первые комплексы моделирования в реальном времени (КМРВ) появились в 60-х годах XX столетия и были аналоговыми (электро-механическими) симуляторами для исследования переходных электромагнитных процессов [10]. С развитием микропроцессорных технологий появилась возможность создать полностью цифровые симуляторы. В основу их работы положен алгоритм, разработанный Германом Доммелем, согласно которому вычисления производятся дискретно с некоторым временным шагом [11]. Кроме того, для проведения расчета процессов в темпе скорости их реального протекания, необходимо при сохранении времени вычисления в пределах одного временного шага проводить разделение вычислений между несколькими процессорами или даже процессорными блоками [9]. Таким образом, чем больше скорость протекания реальных процессов, тем большая потребность в вычислительной

мощности моделирующего комплекса. Это условие требует индивидуального подбора конфигурации аппаратной части КМРВ для решаемых задач моделирования и определяет основную стоимость моделирующего комплекса.

Одним из первых цифровых КМРВ является симулятор энергосистемы для моделирования в реальном времени (Real Time Digital Simulator – RTDS), разработанный в Исследовательском центре силовых систем постоянного тока провинции Манитоба (Виннипег, Канада) в конце 80-х годов прошлого столетия. Дальнейшее развитие аппаратно-программного комплекса RTDS осуществлялось канадской компанией RTDS Technologies (рис. 1.4) [8, 12].

Симулятор RTDS позволяет объединить реальные устройства с виртуальной моделью среды их эксплуатации и проводить комплексные испытания устройств РЗА с полноценной обратной связью и реакцией на изменения их состояния. Также RTDS позволяет проводить исследования энергосистем в статическом и динамическом режимах, выполнять испытания релейной защиты, включая устройства, работающие по протоколу МЭК61850. С помощью испытательного комплекса можно исследовать работу систем автоматического регулирования и управления, например, систем автоматического регулирования возбуждения генераторов или контроллеров для силовой электроники; вырабатывать решения для повышения качества электрической энергии; обучать и проводить стажировку персонала и многое другое [13].

В [14] приводятся примеры использования комплексов RTDS крупными зарубежными энергокомпаниями.

В [13] представлено распространение RTDS по странам мира и в России. Ведущие энергетические ВУЗы России используют симуляторы реального времени не только для решения научно-технических задач, но и для проведения учебных и лабораторных занятий по моделированию электрических сетей и противоаварийной автоматики со студентами и аспирантами [15, 16].

Программно-аппаратных комплексов, подобных RTDS, в организациях ГПО «Белэнерго» и тем более в высших учебных заведениях Беларуси, готовящих специалистов в области электроэнергетики, на сегодняшний момент нет. Задачи, которые возникают при интеграции Белорусской атомной станции в Объединенную белорусскую энергосистему, могут быть успешно решены с исполь-

зованием подобных цифровых симуляторов. Чрезмерно высокая стоимость данных комплексов является основной проблемой их применения в проектных, научно-исследовательских и учебных организациях Беларуси.

1.1.2. Моделирование энергосистемы и испытание устройств релейной защиты в автономном режиме модельного времени

Тестирование в режиме разомкнутого контура является эффективным методом проверки устройств защиты в случае, если не требуется проверка реакции энергосистемы на действия устройств РЗ [17].

Тестирование в режиме разомкнутого контура – это физическое воспроизведение с помощью проверочной установки (ПУ), к аналоговым выходам которой подключены аналоговые входы тока и (или) напряжения испытуемого устройства РЗ, заранее полученных входных сигналов защиты (осциллограмм аварийного процесса). Управление ПУ осуществляется при помощи компьютера (ноутбука) с установленным на нем специализированным программным обеспечением (ПО) производителя проверочной установки. ПО отвечает за запуск или останов тестирования, конфигурирование ПУ, выбор программы тестирования, просмотр, анализ, а также выбор аварийных осциллограмм для дальнейшего их воспроизведения. Таким образом, ПУ в течение времени воспроизведения аварийной осциллограммы, отображает защищаемый объект и протекающие в нем переходные процессы в режиме реального времени.

Разомкнутый цикл проведения испытаний не требует таких сложных и дорогостоящих аппаратных комплексов как симуляторы RTDS. В состав ИПАК входит компьютер, в котором реализуется модель защищаемого объекта и ПО, управляющее испытательным устройством и режимом проведения испытаний. В качестве испытательного устройства могут быть использованы микропроцессорные аппаратно-программные диагностические комплексы НПП «Динамика» (Россия) типа «РЕТОМ» [4], компании OMICRON [5] или аналогичные комплексы других производителей.

Структура ИПАК с использованием ПУ СМС 356 фирмы OMICRON представлена на рис. 1.7. Моделирование защищаемого объекта выполняется компьютерным программным комплексом,

который может быть самостоятельным программным продуктом или реализован в СДМ MATLAB-Simulink.

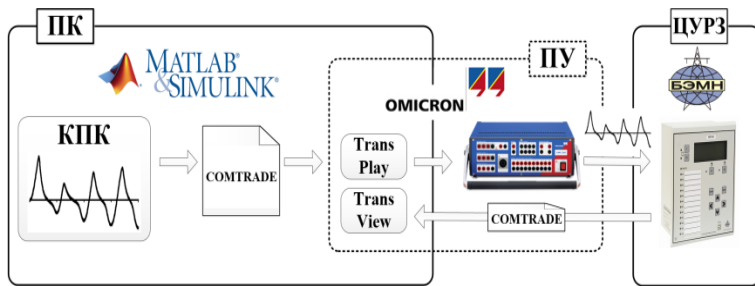


Рис. 1.7. Испытательный программно-аппаратный комплекс с разомкнутым циклом проведения испытаний

В состав ПО испытательных устройств входят специализированные программы, обеспечивающие выбор, воспроизведение и просмотр заранее подготовленных осциллограмм аварийных процессов в формате COMTRADE. Также имеются специализированные программы моделирования элементов энергосистемы. Основными недостатками этих программ является ограниченный и мало документированный набор математических моделей силового оборудования, что не позволяет в полной мере моделировать различные аварийные режимы элементов энергосистем. Также не предусмотрена возможность создания пользовательских моделей силового электроэнергетического оборудования.

Для проведения испытаний устройств РЗ с помощью ИПАК в режиме разомкнутого цикла могут быть использованы разработанные в БНТУ на кафедре «Электрические станции» КПК, позволяющие получать методом вычислительного эксперимента входные информационные сигналы релейных защит силового электрооборудования.

На основе КПК для получения входных информационных сигналов релейных защит и КПК, реализующих модель исследуемой защиты, могут быть созданы, так называемые, испытательные программные комплексы.

1.2. Испытательные программные комплексы релейных защит

1.2.1. Математическое моделирование – основа вычислительного эксперимента

Вычислительный эксперимент является наиболее совершенным методом исследования и прогнозирования процессов и явлений самой различной физической природы во всех областях науки и техники. Этому способствуют, с одной стороны, возрастающая сложность подлежащих изучению вопросов, а часто и невозможность их непосредственного экспериментального исследования; с другой – появление технических средств, в частности высокопроизводительных персональных компьютеров, позволяющих реализовать сложные математические модели, обеспечивающие получение достоверных результатов расчетным путем [18].

Необходимость совершенствования устройств РЗА и установления общих закономерностей в их поведении при разнообразных видах повреждений в энергосистеме требует усиления качественного и количественного анализа аварийных режимов защищаемого электроэнергетического оборудования. Наиболее совершенным методом количественного анализа является вычислительный эксперимент, позволяющий провести комплексное исследование поведения устройств РЗА с учетом возникающих повреждений [19].

Проведение вычислительного эксперимента требует разработки КПК, в состав программно-информационного обеспечения которых входят исходные данные о режимах объекта, математические модели самого обобщенного электроэнергетического объекта (ОЭО) и его устройств защиты, алгоритмы и программы воспроизведения вычислительного эксперимента на компьютере.

КПК можно разделить на программные комплексы, которые реализуют вычислительный эксперимент исследования аварийных режимов защищаемого объекта, и программные комплексы, которые позволяют исследовать поведение релейной защиты. КПК первой группы в результате первого вычислительного эксперимента выполняют расчет входных информационных сигналов, представляющих собой подводимые к устройству защиты или к его модели токи и напряжения, равные по величине и форме входным сигналам. КПК второй группы реализуют модель исследуемой защиты, и в хо-

де второго вычислительного эксперимента оценивается поведение защиты при воздействии входных сигналов, рассчитанных в первом вычислительном эксперименте.

КПК для исследования аварийных процессов защищаемого объекта и КПК для тестирования релейной защиты образуют ИПК, с помощью которого можно отрабатывать новые принципы построения цифровых защит и проверять их работоспособность при аварийных режимах, искусственно создать которые невозможно на реальных энергетических объектах.

Основное требование, предъявляемое к ИПК, – это достоверность результатов моделирования режимов ОЭО и результатов расчета входных сигналов защиты, представляющих собой вторичные токи измерительных трансформаторов тока (ТТ). Достоверность результатов достигается правильным выбором структуры и полнотой математического описания всех элементов, входящих в ОЭО и в трехфазную группу измерительных ТТ. Расчетные схемы ОЭО и группы ТТ должны содержать все элементы, которые оказывают заметное количественное и качественное влияние на входные сигналы (вторичные токи ТТ), подводимые к устройству защиты.

Модели ОЭО и трехфазной группы ТТ составляют основу КПК выработки входных сигналов защиты. Совместно с КПК, реализующим модель защиты, оба комплекса образуют ИПК для проведения испытаний методом вычислительного эксперимента (рис. 1.8).



Рис. 1.8. Испытательный программный комплекс

Структура математических моделей ОЭО и устройств защиты может быть жесткой или гибкой.

1.2.2. Математические модели с жесткой структурой

Жесткая модель характеризуется неизменным набором элементов с возможностью изменения их параметров. Она реализуется на основе детального математического описания электрических и магнитных контуров моделируемых элементов путем решения десятков дифференциальных и алгебраических уравнений [18].

В связи с существенным влиянием на поведение защиты переходных процессов математическое описание защищаемого объекта, измерительных трансформаторов, измерительных органов устройств защиты выполняется на основе физических законов, связывающих мгновенные значения электрических и магнитных величин, характеризующих режим объекта, с его конструктивными параметрами. Наличие нелинейных элементов в моделируемых объектах, исключающее возможность использования принципа наложения, делает нецелесообразным раздельный анализ и оценку свободных и вынужденных составляющих в токах и напряжениях переходного процесса. Поэтому в моделях используются физические законы, отражающие связь между мгновенными значениями полных токов, напряжений, магнитных величин с конструктивными параметрами моделируемого объекта.

Математическим аппаратом моделей, описывающих процессы в объекте защиты, измерительных трансформаторах с учетом вышеприведенных требований, являются обыкновенные дифференциальные уравнения и алгебраические уравнения, образующие замкнутые системы, требующие совместного решения [20].

Комплексная математическая модель содержит до трех-четырёх, а иногда и более замкнутых систем: уравнения защищаемого объекта, измерительных ТТ, измерительных трансформаторов напряжения (ТН), устройства РЗ. Результаты решения уравнений защищаемого объекта являются возмущающими воздействиями для уравнений ТТ и ТН, результаты решения которых входят в число исходных данных для моделей элементов РЗ.

Системы уравнений приводится к виду, удобному для решения на ЭВМ численными методами:

дифференциальные уравнения

$$\frac{d}{dt} y_i = f_i(y_1, y_2, \dots, y_n, x_1, x_2, \dots, x_m, t), \quad i = 1, 2, \dots, n;$$

алгебраические уравнения

$$\varphi_j(x_1, x_2, \dots, x_m) = P_j(y_1, y_2, \dots, y_n), \quad j = 1, 2, \dots, m.$$

Дифференциальные уравнения – это в основном уравнения электрических контуров, содержащих индуктивности и емкости; алгебраические – уравнения магнитных контуров, связывающие потокоцепления с токами, характеристики ферромагнитных и полупроводниковых элементов и т. п. Приведение дифференциальных уравнений к нормальной форме Коши

$$\frac{d}{dt} y_i = F_i(y_1, y_2, \dots, y_n, t), \quad i = 1, 2, \dots, n,$$

не содержащей в правых частях неизвестных (x_1, x_2, \dots, x_m) путем решения в общем виде алгебраических уравнений и подстановки результатов в правые части дифференциальных уравнений выполнить невозможно из-за наличия в алгебраических уравнениях нелинейных характеристик $H = f(B)$ ферромагнитных элементов трансформаторов.

В связи с невозможностью приведения дифференциальных уравнений к нормальной форме Коши при их решении численными методами приходится решать систему алгебраических уравнений на каждом шаге численного интегрирования. Это обстоятельство, существенно усложняет алгоритм воспроизведения математической модели на ЭВМ и определяет условия выбора, как метода численного интегрирования дифференциальных уравнений, так и метода вычисления корней нелинейных алгебраических уравнений.

Многолетний опыт использования подобных программ для проведения научных исследований, а также сопоставление результатов моделирования с натурными испытаниями, при которых погрешность вычислений не превышала 11 % [21, 22], позволяет утверждать, что результаты математического моделирования с высокой степенью точности и достоверности воспроизводят процессы в реальных энергетических объектах. Поэтому, КПК с моделями жесткой структуры, можно рассматривать как эталон, с которым можно сравнивать результаты моделирования таких же электроэнергетиче-

ских объектов, но выполненных в других системах моделирования, например, в MATLAB-Simulink.

1.2.3. Математические модели с гибкой структурой

Для модели ОЭО с гибкой структурой набор элементов неограничен. Модель реализуется в СДМ MATLAB-Simulink, в состав которой входит пакет расширения SimPowerSystems (SPS) [23], ориентированный на имитационное моделирование электротехнических устройств. В более поздних версиях СДМ MATLAB-Simulink данный пакет называется Simscape Power Systems.

В СДМ MATLAB-Simulink принципиально изменены требования к математическому обеспечению и управлению ходом вычислительного процесса. Модель представляется в виде структурной схемы и не требует написания программного кода реализации математической модели [24]. Это особенно важно для задач инженерной направленности, когда требуется самостоятельно смоделировать фрагмент энергосистемы, не углубляясь в тонкости математического описания самих элементов.

Необходимо учитывать, что в стандартных библиотеках SPS присутствуют не все модели электрооборудования. Например, отсутствуют модели ТТ и ТН. При этом, именно моделированию трансформаторов тока и напряжения, как элементов, сигналы которых непосредственно воздействуют на входные цепи защиты, следует уделять особое внимание. Неточное задание параметров в любом блоке структурной схемы приводит к снижению достоверности результатов моделирования, несмотря на то, что все модели, входящие в данный пакет, проверены в лабораториях канадской компании Hydro-Québec, где подтверждена адекватность их математического описания [23].

Результаты, получаемые с помощью КПК, реализованных в СДМ MATLAB-Simulink при использовании блоков SPS, необходимо сопоставить с результатами, полученными от других КПК, принятых за эталонные, а также с результатами натурных испытаний. Если достигается высокая точность совпадения результатов моделирования от разных источников, это свидетельствует о том, что модели, разработанные в Simulink-SimPowerSystems адекватно функциони-

руют, и могут быть использованы для построения аналогичных систем, структура которых отличается от эталонной.

Построение моделей с гибкой структурой в СДМ типа MATLAB-Simulink позволяет создавать ИПК, в которых одновременно моделируется узел нагрузки с защищаемым объектом и испытываемая защита.

1.2.4. Компьютерные программные комплексы с жесткой структурой модели обобщенного электроэнергетического объекта

КПК на базе моделей с жесткой структурой создаются с использованием алгоритмических языков высокого уровня и могут представлять собой программные комплексы, состоящие из головной управляющей программы, ряда вспомогательных программ, файлов с исходными данными для расчета заданных режимов и с результатами расчетов.

Для получения входных токовых сигналов исследуемых защит на кафедре «Электрические станции» разработаны КПК на основе моделей жесткой структуры воспроизведения рабочих и аварийных режимов линий электропередачи, трансформаторных подстанций с силовыми трансформаторами, асинхронных двигателей [17–20]. На рис. 1.9–1.11 представлены примеры диалоговых интерактивных окон разработанных КПК.

Основным достоинством представленных КПК является то, что они выполняют расчеты входных сигналов защиты – вторичных токов ТТ – с учетом их несинусоидальных форм, обусловленных наличием в энергосистеме нелинейных элементов, и возможных режимов насыщения магнитопроводов силового и измерительных трансформаторов (рис. 1.12), что в большей степени соответствует реальным условиям аварийных режимов [25].

Результаты расчетов таких КПК могут быть использованы в качестве входных сигналов для КПК, реализующих модель исследуемой защиты. Сохраненные в формате COMTRADE [26] эти же результаты могут быть использованы в качестве тестовых сигналов, подаваемых через аппаратную часть ПДК на испытываемое устройство РЗ.

1. Испытательные комплексы...

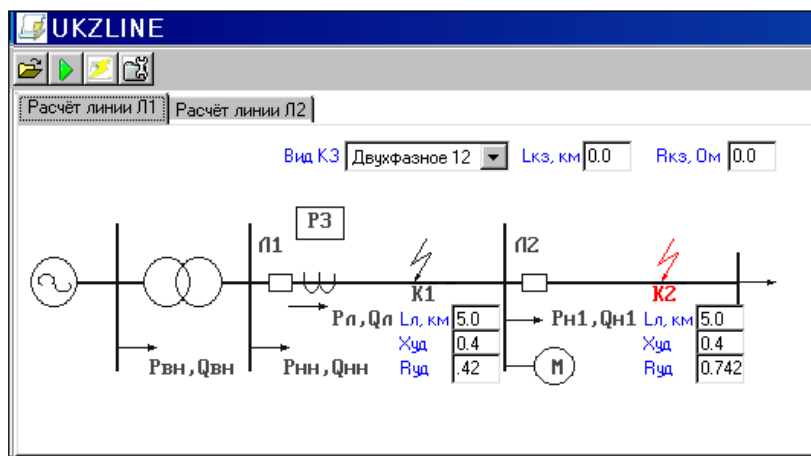


Рис. 1.9. Диалоговое окно КПК для расчета режимов аварийных режимов на линиях электропередачи

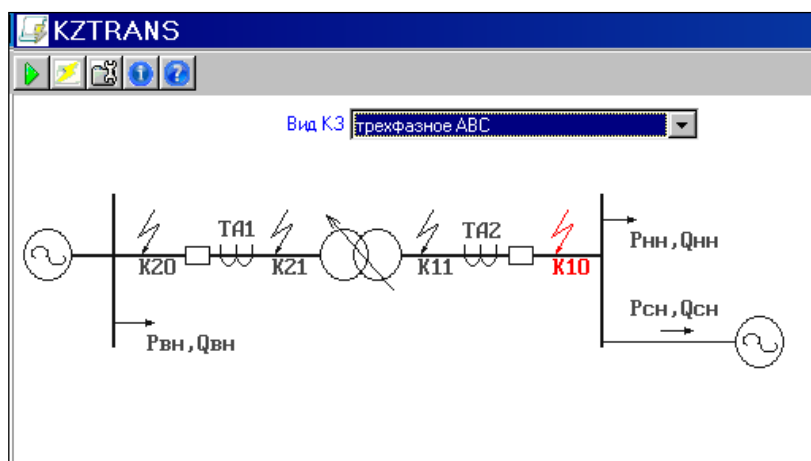


Рис. 1.10. Диалоговое окно КПК для расчета аварийных режимов двухобмоточного трехфазного трансформатора

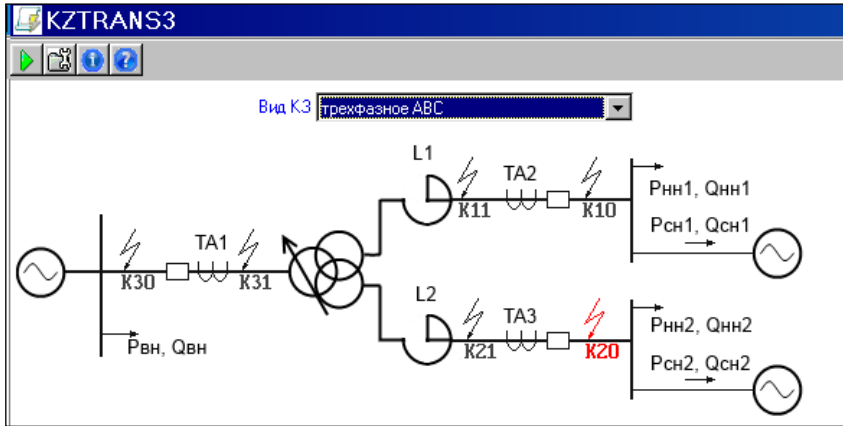


Рис. 1.11. Диалоговое окно КПК для расчета аварийных режимов трехфазного трансформатора с расщепленной вторичной обмоткой

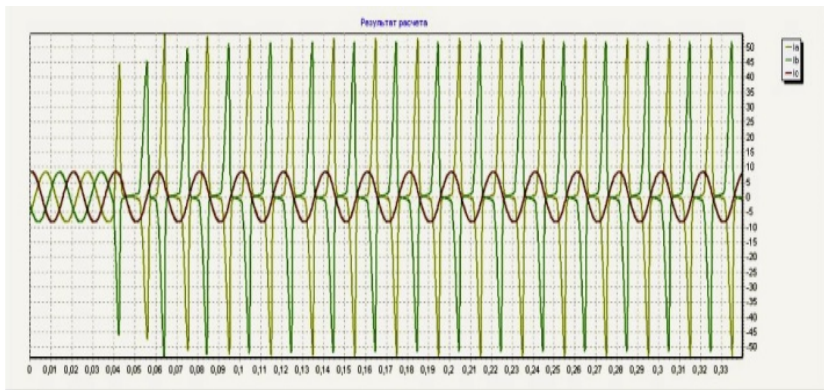


Рис. 1.12. Графики расчетных токовых сигналов трехфазной группы ТТ

КПК с использованием моделей жесткой структуры будут рассмотрены в главе 2.

1.2.5. Компьютерные программные комплексы с гибкой структурой модели обобщенного электроэнергетического объекта

Применение СДМ MATLAB-Simulink позволяет создавать испытательные программные комплексы, совместно моделирующие защищаемый объект и его исследуемую защиту.

На рис. 1.13 представлена структурная модель узла питания асинхронного двигателя для исследования его токовой защиты.

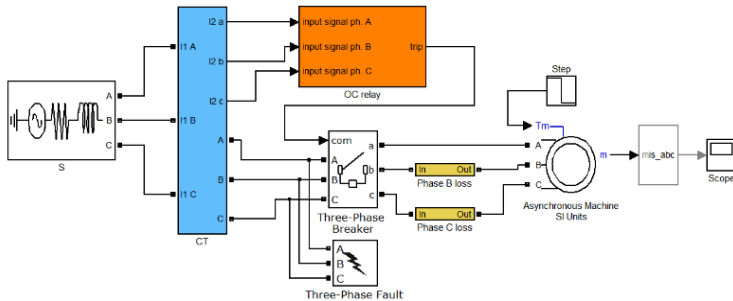


Рис. 1.13. Структурная модель узла питания асинхронного двигателя и его токовой защитой

Программный комплекс для исследования поведения токовой защиты асинхронного двигателя разработан в среде СДМ MATLAB-Simulink с использованием пакета расширения SimPowerSystems и включает в себя модели питающей системы, трехфазной группы трансформаторов тока и модели цифровой токовой защиты двигателя. Использование библиотечных моделей пакета SimPowerSystems [23, 28], разработанных моделей трехфазной группы трансформаторов тока [29] и цифровой токовой защиты двигателя позволяет создавать комплексные модели достаточно сложных систем. При этом трудозатраты будут значительно меньшими по сравнению с традиционными методами математического моделирования при использовании моделей с жесткой структурой. На базе моделей с гибкой структурой в СДМ создаются ИПК.

ИПК с использованием моделей гибкой структуры будут рассмотрены в главе 3.

2. КОМПЬЮТЕРНЫЕ ПРОГРАММНЫЕ КОМПЛЕКСЫ ВЫРАБОТКИ ТЕСТОВЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ РЕЛЕЙНЫХ ЗАЩИТ

Большинство созданных на кафедре «Электрические станции» КПК с жесткой структурой разрабатывались в период массового внедрения первых ПЭВМ (90-е – начало 2000-х годов), работающих под управлением операционной системы MS-DOS. Расчетные программы представляют собой исполняемые модули, разработанные на алгоритмическом языке FORTRAN с использованием графических операторов данного языка для вывода результатов расчета на экран монитора в виде осциллограмм расчетных параметров (токов, напряжений и др.). Исходные данные и результаты расчетов сохраняются во внешних файлах, которые могут редактироваться внешними текстовыми и графическими редакторами.

В настоящее время в связи с использованием в персональных компьютерах современных многооконных операционных систем типа Windows с развитым графическим и мультимедийным интерфейсом применение разработанных ПК становится затруднительным, а зачастую и невозможным.

Обеспечить функционирование устаревших КПК в современных операционных системах возможно при их новой реализации на объектно-ориентированных языках программирования, например Delphi, и с использованием разработанного ранее вычислительного ядра FORTRAN-программы. При этом сохраняется достоверность и точность моделирования и возможность получать результаты с погрешностями, не превышающими 10–15 %, как и при использовании аналогичных устаревших КПК.

В [18, 20] подробно рассмотрены вопросы математического моделирования элементов электроэнергетических систем, разработки комплексных математических моделей ОЭО, алгоритмов их воспроизведения и программ реализации вычислительного эксперимента. Там же рассмотрена методика реализации КПК на объектно-ориентированном языке программирования Delphi с использованием разработанных вычислительных FORTRAN-программ.

В данной главе рассмотрены КПК с жесткой структурой моделей ОЭО, предназначенные для получения тестовых информационных

токовых сигналов, используемых в ИПАК для испытаний микропроцессорных токовых защит (МТЗ).

Рассматриваемые КПК созданы с использованием системы объектного программирования Delphi. Для выполнения расчетов используется откомпилированный в среде Fortran PowerStation модифицированный фортран-модуль расчетной программы в виде dll-модуля. В нем сохранена только реализация алгоритма расчета математических моделей ОЭО. Результаты моделирования записываются во внешний файл данных, который может использоваться в дальнейшем для передачи временных последовательностей мгновенных значений вторичных токов ТТ в ИПК или в ИПАК. Все графические построения и интерактивные функции графического интерфейса реализуются с использованием команд и операторов системы объектного программирования Delphi.

Данные КПК могут применяться на любых персональных компьютерах. При этом сохраняется достоверность получаемых результатов за счет использования тех же программных алгоритмов решения математических моделей ОЭО, как и в устаревших КПК, а также повышается скорость обработки данных и визуализации результатов за счет использования функций современных систем объектного программирования.

2.1. Компьютерный программный комплекс UKZLINE

2.1.1. Назначение и состав комплекса

Программный комплекс UKZLINE «Удаленные междуфазные замыкания на линиях 6(10)–35 кВ с односторонним питанием» предназначен для расчета входных сигналов токовых защит (РЗ на рис. 2.1) линий 6(10)–35 кВ с односторонним питанием двух типов:

– линий электропередачи, непосредственно, присоединенных к шинам низкого напряжения (НН) понизительной подстанции 110–220/6(10)–35 кВ (рис. 2.1, *а*);

– линий электропередачи, удаленных от шин НН понизительной подстанции (рис. 2.1, *б*).

Для проверки селективности и защитоспособности первых ступеней защиты от междуфазных коротких замыканий (КЗ) (токовые

отсечки мгновенного действия) воспроизводятся двухфазные и трехфазные КЗ на самой защищаемой линии (точка К1 для линии Л1, точка К2 для линии Л2). Для проверки защитоспособности вторых ступеней трехступенчатых защит воспроизводится КЗ на защищаемой линии и на смежном участке (точка К2 для линии Л1 и точка К3 для линии Л2). Короткие замыкания в конце смежных участков воспроизводятся для проверки чувствительности ступеней дальнего резервирования – максимальной токовой защиты.

Входные сигналы токовой защиты нулевой последовательности обоих типов линий вырабатывается воспроизведением однофазных замыканий на землю на линии Л1.

Входные сигналы защиты рассчитываются для следующих режимов линий:

- исходный нормальный режим, предшествующий режиму замыкания (для расчетов междуфазных замыканий);
- режим развивающегося междуфазного (однофазного на землю) замыкания;
- режим отключения замыкания и послеаварийный режим (для расчетов междуфазных замыканий).

Программный комплекс UKZLINE состоит (рис. 2.2):

- ТОК1_ТТ – файл результатов с массивами мгновенных значений первичных и вторичных токов трансформаторов тока защищаемой линии;
- aag – контрольный файл результатов с мгновенными значениями основных параметров режима на промежутке времени 0,041 с;
- UKZLINE.exe – головная программа КПК;
- a1 – файл исходных данных;
- PDKDLL.dll – модуль расчета режимов линии;
- Grafik.xmcd – программа визуализации в математическом пакете MathCad результатов расчета из файла ТОК1_ТТ;
- Msvcrtd.dll, msvcrt.dll, Dforrtd.dll, Dforrt.dll, ann_kz – компоненты приложения.

Файлы результатов могут использоваться при исследовании токовых защит линий с помощью ИПАК.

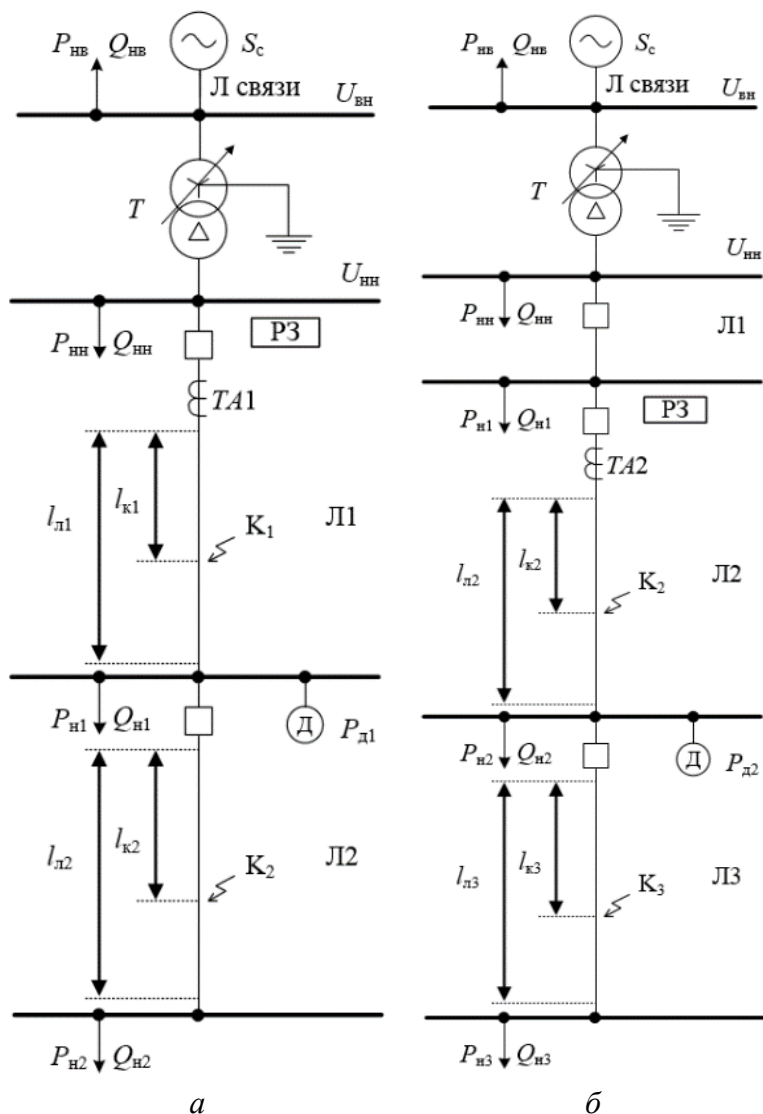


Рис. 2.1. Расчетная схема ОЗО UKZLINE:
 а – линии, отходящие от шин подстанции;
 б – линии, удаленные от шин подстанции

Содержание файла TOKI_TT при каждом повторном расчете обновляется, и по окончании расчетов в нем содержатся результаты расчета последнего варианта.

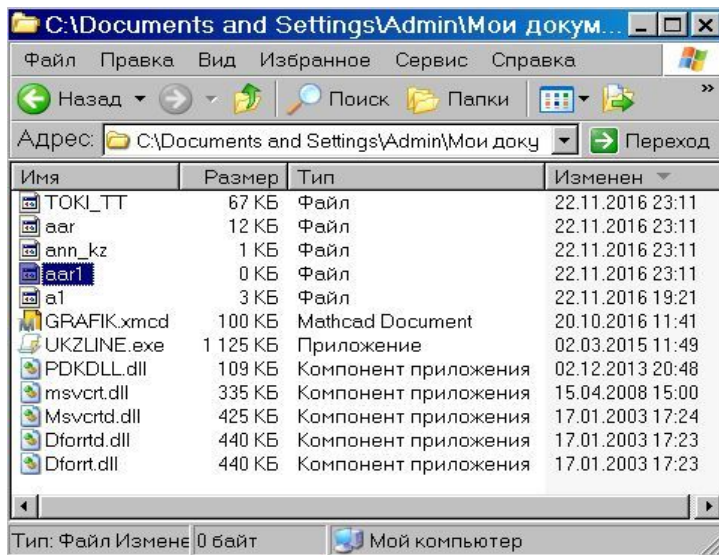


Рис. 2.2. Состав программного комплекса UKZLINE

2.1.2. Исходные данные к расчетам

В файле исходных данных a1 (рис. 2.3) содержатся все параметры, необходимые для расчета задаваемого режима.

Параметры, содержащиеся в файле данных, сопровождаются текстовыми пояснениями в виде символьных констант (заголовки групп, условные буквенные обозначения переменных, заключенные в одиночные кавычки). После считывания содержания файла данных символьные константы программой не используются, однако их наличие и взаимное расположение по отношению к численным величинам должны быть такими же, как на рис. 2.3. При расчете некоторых режимов используются не все параметры файла исходных данных. Однако наличие на их месте хотя бы произвольных чисел при расчете такого режима обязательно.

```

'ФАЙЛ a1 ИСХОДНЫХ.ДАННЫХ КПК UKZLINE'
'Параметры исходного режима'
'Ураб л PSlab Pнл Qнл Pвн Qвн Pнн Qнн Pн1 Qн1'
10.5 30. 3. 2. 86.6 50. 10. 8. 1.0 1.0
'Iс0 Rзmax Pдв* Kз дв Уст.РПН feист'
10.0 6.07 0.5 0.7 5. 50.
'Параметры вычислительного процесса'
't1 t2 t3 tk h инт h печ np'
0.3 0.4 0.6 0.8 0.0001 0.001 1
'Параметры смлового трансформатора'
'Sном Ун вн Ун нн Хк % Хm0 % Pкз Хтн Rтн'
16. 115. 10.5 10.5 45. 85. 0. 0.
'Враб.макс (w1) Pxx (w2) Pст.уд (Сст) (Ся) (Lст) (Ля) Ст.РПН'
1.6 24.0 1.5 0. 0. 0. 1.18
'Параметры системы на стороне ВН'
'Sc Хс1* Rc1* Хс0* Rc0* Хсв1 Rсв1 Хсв0 Rсв0 '
240. 0.407 0.01491 0.924 0.0374 15. 5. 30. 4.
'П а р а м е т р ы л и н и й НН'
'Lл1 (км) Хл1уд Рл1уд Lл2 Хл2уд Рл2уд Lл3 Хл3уд Рл3уд'
5.0 0.4 .42 5.0 0.4 0.742 5.0 0.4 1.14
'Параметры заземляющего тр-ра и ДГР'
'Sном(кВА) Уном Uk* Pк(кВт) Рдгр* Yдгр*'
63. 10.5 0.06 1. 0.05 0.1
'Параметры трансформаторов тока линии НН'
'W1 W2 Scерд lсерд Пр.сх Rob Хоб Rн Хн Ro Хо '
5. 150. 0.0016 0.5 3. 0.2 0.1 0.3 0.6 0.3 0.1
'TНП W2 Scерд lсерд Rob Хоб Rн Хн'
100. 0.002 0.4 0.3 0. 10. 2.
'Характеристики намагничивания '
'B1 B2 B3 B4 Н1 Н2 Н3 Н4 Kзаполн Кпот'
'TR' 10.4 1.2 1.80 1.9 50. 300. 6000. 40000. 0.5 0.15
'++' 0.4 1.2 1.80 1.9 50. 300. 6000. 40000. 0.5 0.2
'++' 0.4 1.2 1.80 1.9 50. 300. 6000. 40000. 0.5 0.2
'Параметры эквивалентного электродвигателя и мех.'
'Уном Pном пном COSфн КПДн Iп* Mп* Mmax* Jкг-м2 Rст*
Mmех0 Nmех'
10. 315 1480. 0.9 0.9 6.5 1.3 3.0 2.5 0. 0.01 6

```

Рис. 2.3. Файл исходных данных a1

При не соблюдении указанных условий успешного считывания информации из файла исходных данных после запуска головной программы UKZLINE.exe не произойдет, и расчет режима не будет

запущен. При успешном считывании информации из файла исходных данных открывается диалоговое окно головной программы (рис. 2.4, 2.5). С помощью активных кнопок и открывающихся интерактивных окон пользователь может изменить исходные данные к расчету и выполнить расчет заданного режима.

Исходные данные, содержащиеся в файле a1, также можно отредактировать (изменить) с помощью любого текстового редактора (WordPad, Aditor Pro, Word и др.).

2.1.3. Параметры вычислительного процесса

Параметры вычислительного процесса можно изменить в интерактивном окне (рис. 2.6), которое открывается при активировании соответствующей кнопки.

Программа последовательно во времени воспроизводит исходный доаварийный режим, предшествующий режиму

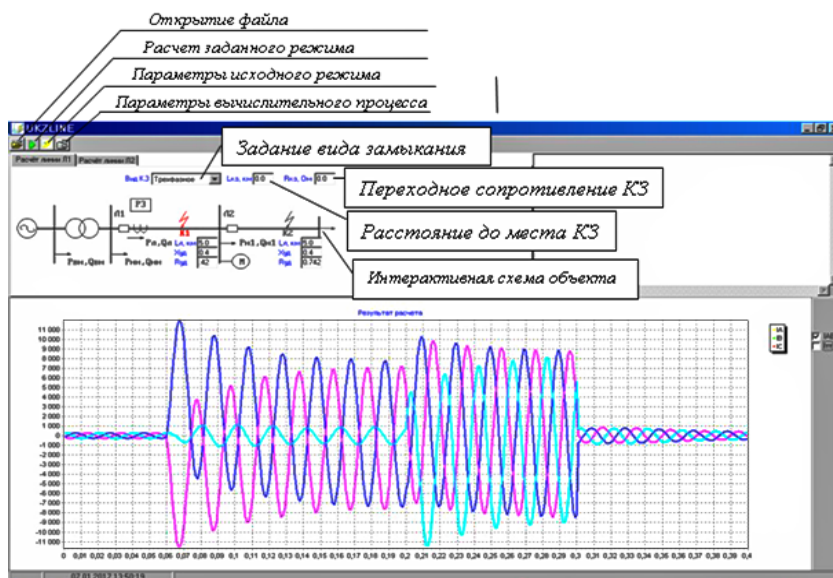


Рис. 2.4. Диалоговое окно для расчета режимов линии, непосредственно присоединенной к шинам НН

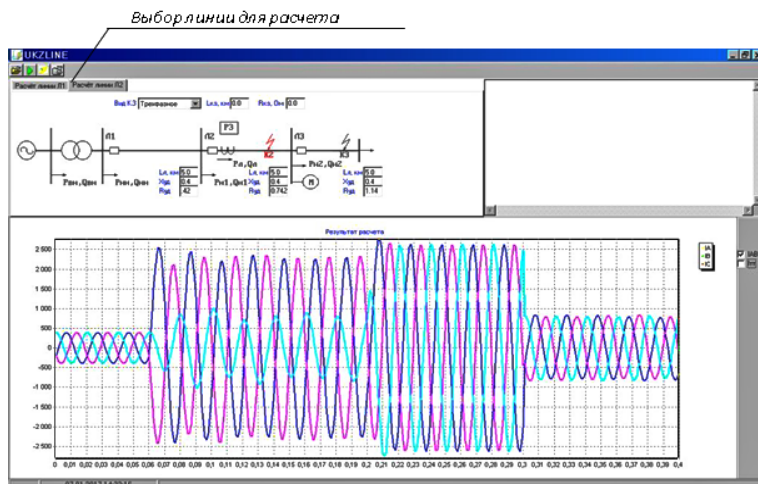


Рис. 2.5. Диалоговое окно для расчета режимов линии, удаленных от шин НН

КЗ, режим развивающегося многофазного КЗ, режим отключения КЗ и послеаварийный режим. В окне «Параметры вычислительного процесса» задаются следующие параметры:

t_1 – длительность исходного нормального режима, с;

t_2 – длительность первой стадии развивающегося КЗ, с;

t_3 – длительность второй стадии полнофазного КЗ, с;

t_k – полная длительность рассчитываемого режима, с;

$h_{\text{инт}}$ – шаг интегрирования дифференциальных уравнений, с;

$h_{\text{печ}}$ – шаг вывода мгновенных значений токов во внешние файлы результатов, с;

пр – признак способа вывода результатов во внешний файл.

Исходный доаварийный режим длится в течение времени $(0-t_1)$. В момент t_1 происходит короткое замыкание двух фаз или одной фазы на землю в зависимости от заданного вида КЗ. В момент времени t_2 при заданном трехфазном КЗ неполнофазное двухфазное КЗ переходит в полнофазное трехфазное КЗ. Для того чтобы выполнить расчет только полнофазного КЗ (без расчета неполнофазного КЗ), необходимо задать $t_2 = 0$. В момент времени t_3 начинается отключение КЗ, воспроизводящееся восстановлением высоких сопро-

тивлений ветвей КЗ по мере прохождения токов КЗ в этих ветвях через нулевые значения.

Малые значения длительности послеаварийного режима $t_{па} = t_{к} - t_{з}$ позволяют проследить правильность воспроизведения процесса отключения, продолжающегося около одного периода. Для того чтобы проследить процесс самозапуска двигательной нагрузки величина $t_{па}$ выбирается до 1–2 с.

Результаты расчета мгновенных значений первичных (токов линии) и вторичных токов ТТ с шагом $h_{печ}$ по признаку $pr = 1$ выводятся во внешний файл ТОКИ_ТТ. В контрольный файл агт записываются исходные данные расчетного режима и основные параметры режима на протяжении первых 0,041 с расчета (рис. 2.7, 2.8). Данные из контрольного файла могут быть использованы для контроля правильности работы программы. Графики расчетных токов отображаются в окне «Результат расчета» в зависимости от выбора «Вывод первичных токов ТТ» или «Вывод вторичных токов ТТ» (рис. 2.6).

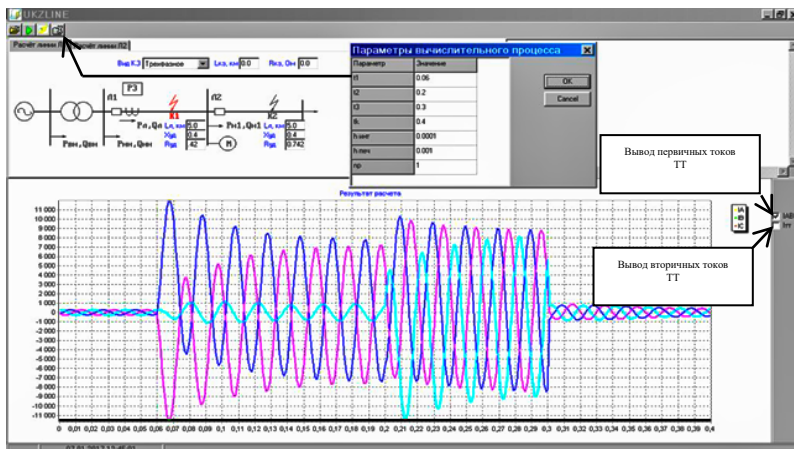


Рис. 2.6. Интерактивное окно редактирования параметров вычислительного процесса

Шаг интегрирования дифференциальных уравнений междофазных КЗ может выбираться в пределах 0,0001...0,0005 с.

Меньшие значения могут потребоваться при расчете КЗ через большие переходные сопротивления, при малых реактивных составляющих нагрузок.

```

                ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ К РАСЧЕТУ
Параметры силового трансформатора
  Sном  Un  vn  Un  nn  Xк %  Xm0 %  Pкз  Xто  Rто
16. 115.0 10.5 10.50 45.00 85.0 0.00 0.00
  w1  w2  Sct  Ся  Ict  Iя  Kзап  Ст.РПН %
1.60 24.00 1.5000 0.3226 0.00 0.00 0.38 4.00
Параметры трансформаторов тока
  w1  w2  Sc  Ic  Kзап.  Rob  Rн  Xн  Ro  Xo
TT1  5. 200. 0.0016 0.50 0.50 0.20 0.10 10.30 0.60 0.30 0.10
TT2  1. 400. 0.0016 0.50 0.50 0.20 0.10 30.30 0.60 0.30 0.10
Параметры характеристик намагничивания.
  B1  B2  B3  B4  H1  H2  H3  H4  Kзап  Kпот
TR  1.20 1.71 1.90 2.03 20. 250. 2500. 40000. 0.38 0.15
TT1  1.20 1.71 1.90 2.03 20. 250. 2500. 40000. 0.50 0.15
TT2  1.20 1.71 1.90 2.03 20. 250. 2500. 40000. 0.50 0.15
Параметры системы на стороне ВН
  Sном  Xс*  Rc*  Xc0*  Rc0*  Xсв  Rсв  Xсв0  Rсв0  Ом
240. 0.407 0.015 0.924 0.037 15.0 5.0 30.0 4.0
Pвн  Qвн  fсист  86.6  50.0  50.0
Параметры системы на стороне НН
  Sном  Xс*  Rc*  Xсв  Rсв  Ом  Kсзап
Sis1  0. 0.400 0.100 0.40 0.20 3.0
T1, T2, T3, ТК, Н, НР, НР
0.0400 0.1000 0.3000 0.54 0.00010 0.00010 1
                ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ К РАСЧЕТУ
Параметры силового трансформатора
  Sном  Un  vn  Un  nn  Xк %  Xm0 %  Pкз  Xто  Rто
0. 0.0 0.0 0.00 0.00 0.0 0.0 0.00 0.00
  w1  w2  Sct  Ся  Ict  Iя  Kзап  Ст.РПН %
0.00 0.00
Параметры трансформатора
W1  W2  Sct  Ся  Ict  Iя  RT1  RT2
785. 148. 0.2000 0.2040 1.60 1.60 2.1956 0.0780
                Характеристики намагничивания
  СТ  1.20002 1.90195 2.06116 20. 2500. 40000.
16.7 35790.5 26586.3 1979642.6 491218.9 7.55584 2.22375 0.15
TT1  1.20001 1.90157 2.05513 20. 2500. 40000.
16.7 36075.6 26639.3 2561223.2 530516.4 7.56686 2.31602 0.15
TT2  1.20001 1.90157 2.05513 20. 2500. 40000.
16.7 36075.6 26639.3 2561223.2 530516.4 7.56686 2.31602 0.15
    
```

Рис. 2.7. Данные контрольного файла результатов aar

И С Х О Д Н Ы Й Р Е Ж И М										
Y(1-6)	-5.238	-369.940	0.	-452.103	-146.768	0.				
Y(7-11)	-31.106	39.716	0.	-0.121	0.154					
НАПРЯЖ. (КВ), МОЩН. (МВТ, МВА), ТОКИ (А) В.Н. ТРАНСФ.										
115.000	12.900	11.572	-82.1602	-38.2377	120.3979					
МОЩН. (МВТ, МВА), ТОКИ (А) ВЕТВИ НАГР. В.Н.										
	86.600	50.000	-354.9985	-354.9829	709.9814					
НАПР. ШИН (КВ), МОЩН. (МВТ, МВА), ТОКИ (А) ВЕТВИ СИСТ. Н.Н.										
	11.5580	0.000	0.001	-0.064	0.006	0.058				
МОЩН. (МВТ, МВА), ТОКИ (А) ВЕТВИ НАГР. Н.Н.										
12.800	9.600	-232.900	-841.411	1074.311						
ДЕЙСТВ. ЗНАЧ. (КВ) И НАЧ. ФАЗА (ГРАД) Э.Д.С. СИСТЕМЫ										
143.100	11.8010									
			0.0000	0.0000						
Р Е З У Л Т А Т Ы Р А С Ч Е Т А										
t	It1a	It1b	It10	Inna	Innb	Rtвн	Rннн			
.0000	-88.2810	-36.5012	-352.7863	-230.136	-840.764	12.900	12.800			
.0001	-81.6564	-40.9256	-334.6840	-196.477	-864.325	13.497	13.092			
.0002	-78.5493	-44.5597	-314.9043	-161.473	-886.780	12.935	12.800			
.0003	-75.3994	-48.1676	-294.8219	-126.325	-908.338	12.909	12.792			
.0004	-72.1420	-51.7455	-274.4592	-91.081	-928.999	12.904	12.799			
.0005	-68.7832	-55.2871	-253.8348	-55.774	-948.743	12.899	12.805			
.0006	-65.3323	-58.7863	-232.9668	-20.435	-967.551	12.896	12.810			
.0007	-61.7998	-62.2361	-211.8729	14.908	-985.403	12.894	12.813			
.0008	-58.1970	-65.6289	-190.5711	50.226	-1002.284	12.893	12.815			
.0009	-54.5357	-68.9575	-169.0794	85.492	-1018.174	12.894	12.815			
.0010	-50.8272	-72.2148	-147.4164	120.677	-1033.060	12.895	12.814			
.....										
.0013	-39.5168	-81.4985	-81.5942	225.459	-1071.543	12.904	12.806			
.0014	-35.7111	-84.4157	-59.4439	260.024	-1082.271	12.908	12.803			
.0015	-31.8966	-87.2402	-37.2247	294.354	-1091.927	12.911	12.799			
.0016	-28.0768	-89.9714	-14.9590	328.412	-1100.503	12.914	12.796			
.0017	-24.2542	-92.6095	7.3304	362.164	-1107.988	12.916	12.792			
.0018	-20.4308	-95.1554	29.6207	395.574	-1114.372	12.918	12.788			
.0019	-16.6081	-97.6101	51.8888	428.605	-1119.648	12.920	12.784			
.0020	-12.7880	-99.9743	74.1118	461.221	-1123.809	12.922	12.780			
.....										
.0400	-84.5032	-37.2470	-354.1257	-231.529	-840.840	12.928	12.758			
.0401	-71.6340	-61.1786	-338.2036	-238.059	-822.382	12.990	8.354			
.0402	-58.5464	-85.3880	-321.8861	-243.500	-803.870	14.943	7.840			
.0403	-45.2578	-109.8445	-305.1941	-247.888	-785.287	16.967	7.316			
.0404	-31.7832	-134.5244	-288.1456	-251.248	-766.618	19.054	6.787			
.0405	-18.1367	-159.4033	-270.7596	-253.608	-747.852	21.199	6.257			
.0406	-4.3320	-184.4560	-253.0550	-255.000	-728.983	23.394	5.729			
.0407	9.5942	-209.6569	-235.0433	-255.420	-709.974	25.628	5.190			
.0408	23.3991	-234.9804	-216.6617	-254.584	-690.504	27.868	4.511			
.0409	37.0577	-260.3996	-197.9303	-252.526	-670.577	30.141	3.838			
.0410	50.6520	-285.8869	-178.9070	-249.427	-650.341	32.447	3.242			

Рис. 2.8. Данные контрольного файла результатов аар (продолжение)

Расчеты режимов однофазных замыканий на землю выполняются с шагом $0,00001 \dots 0,00005$ с. Меньшие значения шага могут потребоваться при малых величинах емкостных токов замыкания на землю и сопротивления изоляции в замкнувшейся фазе.

Приемлемая длительность шага интегрирования дифференциальных уравнений должна быть подтверждена расчетом с вдвое меньшим шагом, результаты которого мало отличаются от предыдущих. Следует иметь в виду, что расчеты длительных режимов с шагом значительно меньшим, чем указано выше, могут оказаться неустойчивыми из-за чрезмерного накопления ошибок округления.

2.1.4. Параметры исходного режима

Параметры исходного режима задаются в интерактивном окне «Параметры исходного режима», которое открывается при активировании соответствующей кнопки, аналогично заданию параметров вычислительного процесса.

Параметры исходного режима:

U_{ab} – линейное напряжение питающей системы, кВ;

$PSIa$ – начальная фаза фазного напряжения фазы A , град.;

$P_{вн}$, $Q_{вн}$ – активная и реактивная мощности питающей системы на стороне высокого напряжения (ВН), МВт и Мвар;

$P_{нн}$, $Q_{нн}$ – активная и реактивная мощности стационарной нагрузки на стороне НН, МВт и Мвар;

$P_{нл}$, $Q_{нл}$ – активная и реактивная мощности линии исходного режима, МВт и Мвар;

$P_{н1}$, $Q_{н1}$ – активная и реактивная мощности стационарной нагрузки линии (при расчете режимов линии Л2 в схеме рис. 2.1, б), МВт и Мвар;

$I_{с0}$ – степень компенсации емкостного тока дугогасящего реактора (ДГР) задается посредством индуктивной проводимости ДГР, о. е.;

$R_{з\max}$ – максимальное сопротивление изоляции линии, МОм;

$P_{дв*}$ – мощность эквивалентной двигательной нагрузки, о. е.;

$K_{з\ дв}$ – коэффициент загрузки эквивалентного двигателя (максимальное значение $K_{з\ дв} = 0,7$);

Уст. РПН – установка РПН силового трансформатора, %;

$f_{\text{сист}}$ – частота тока питающей системы.

Исходный режим схемы определяется заданными величинами нагрузок на сторонах ВН и НН трансформатора, нагрузками $P_{н1}$, $Q_{н1}$ (при расчете входных сигналов для защиты линии Л2 в схеме рис. 2.1, б) и задаваемыми параметрами режима линии, защита которой испытывается. Это действующие значения и начальная фаза напряжения U_{ab} в начале линии, активная и реактивная нагрузка линии, двигательная составляющая нагрузки линии, коэффициент загрузки эквивалентного электродвигателя. По этим параметрам рассчитываются стационарная составляющая нагрузки в конце защищаемой линии, номинальная мощность эквивалентного электродвигателя двигательной составляющей нагрузки.

Каждая из линий 6(10)–35 кВ характеризуется длиной (км), удельным индуктивным и активным сопротивлениями (Ом/км). Значения этих параметров задаются в соответствующих окнах под интерактивной схемой объекта.

Для проверки правильности работы программы целесообразно выполнить расчеты КЗ в конце линии Л1 и в начале линии Л2. Результаты этих расчетов практически не должны различаться.

2.1.5. Параметры системы на стороне ВН

Параметры системы на стороне ВН задаются в интерактивном окне, которое открывается при активировании условного значка системы на стороне ВН:

S_c – полная мощность питающей системы, МВА;

X_{c1*} , R_{c1*} – реактивное и активное сопротивления прямой последовательности системы, о. е.;

X_{c0*} , R_{c0*} – реактивное и активное сопротивления нулевой последовательности системы, о. е.;

X_{cb1} , R_{cb1} – реактивное и активное сопротивления связи прямой последовательности между шинами 110–220 кВ питающей системы (подстанции, электрической станции) и шинами 110–220 кВ трансформаторной подстанции, Ом;

X_{cb0} , R_{cb0} – реактивное и активное сопротивления связи нулевой последовательности между шинами 110–220 кВ питающей системы (подстанции, электрической станции) и шинами 110–220 кВ трансформаторной подстанции, Ом;

Величины X_{c1} , R_{c1} , X_{c0} , R_{c0} определяются мощностью и результирующими сопротивлениями питающей системы или заданными уровнями токов КЗ.

2.1.6. Параметры трансформаторов тока

Параметры трансформаторов тока задаются в интерактивном окне, которое открывается при активировании условного значка трансформатора тока РЗ линии Л1 или Л2:

w_1 – число витков первичной обмотки;

w_2 – число витков вторичной обмотки;

$S_{серд}$ – площадь сечения сердечника магнитопровода, м²;

$l_{серд}$ – длина средней линии магнитопровода, м;

$R_{об}$, $X_{об}$ – активное и реактивное сопротивления вторичной обмотки, Ом;

R_n , X_n – активное и реактивное сопротивления нагрузки во вторичной обмотке, Ом;

R_o , X_o – активное и реактивное сопротивления в нулевом проводе трехфазной группы ТТ, Ом;

$K_{заполн}$ – коэффициент заполнения сталью пространства внутри вторичной обмотки;

$K_{пот}$ – коэффициент, учитывающий потери в стали сердечника (0,1–0,3).

Характеристика намагничивания магнитопровода ТТ представлена в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Характеристика намагничивания

B , Тл	0,4	1,2	1,8	1,9
H , А/м	50	300	6000	40000

2.1.7. Параметры силового трансформатора

Параметры силового трансформатора задаются в интерактивном окне, которое открывается при активировании условного значка силового трансформатора.

Характеристика намагничивания магнитопровода трансформатора представлена в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Характеристика намагничивания

B , Тл	1,2	1,71	1,9	2,03
H , А/м	20	250	2500	40000

$S_{\text{ном}}$ – полная номинальная мощность, МВА;

$U_{\text{нвн}}$, $U_{\text{нн}}$ – напряжения (линейные) на сторонах ВН и НН, кВ;

$X_{\text{к}}$ – сопротивление короткого замыкания трансформатора, %;

$X_{\mu 0}$ – реактивное сопротивление ветви намагничивания нулевой последовательности, % (при отсутствии каталожных данных принимается по аналогии с трехфазным трехстержневым трансформатором обычной конструкции на уровне $X_{\mu 0} = 40 \dots 50$ %);

$P_{\text{кз}}$ – мощность потерь короткого замыкания трансформатора, кВт;

$X_{\text{тн}}$, $R_{\text{тн}}$ – реактивное и активное сопротивления в ветви заземления нейтральной точки первичной обмотки трансформатора (рис. 2.1), Ом;

$B_{\text{раб.макс}}(w_1)$ – максимальное значение индукции в магнитопроводе, Тл (число витков первичной обмотки);

$P_{\text{хх}}(w_2)$ – мощность потерь холостого хода трансформатора, кВт (число витков вторичной обмотки);

$P_{\text{ст.уд}}(S_{\text{ст}})$ – удельные потери в стали магнитопровода (для холоднокатаной стали – 1,5–1,7 Вт/кг) (площадь сечения стержня магнитопровода, м²);

$S_{\text{я}}$ – площадь сечения ярма магнитопровода, м²;

$L_{\text{ст}}$ – длина стержня магнитопровода, м;

$L_{\text{я}}$ – длина ярма магнитопровода, м;

$K_{\text{заполн}}$ – коэффициент заполнения сталью пространства внутри вторичной обмотки (стержня магнитопровода);

$K_{\text{пот}}$ – коэффициент, учитывающий потери в сердечнике (0,1–0,3);

Ст. РПН – установка РПН силового трансформатора, %.

Примечание: если геометрические размеры магнитопровода ($S_{\text{ст}}$, $S_{\text{я}}$, $L_{\text{ст}}$, $L_{\text{я}}$) и обмоточные данные (w_1 , w_2) конкретного трансформатора неизвестны, то вместо w_1 задается максимальная рабочая индукция $B_{\text{раб.макс}}$ (1,6–1,7 Тл). Результаты расчета геометрических размеров магнитопровода и обмоточные данные силового трансформатора рассчитываются программой и сохраняются в контрольном файле aag.

2.1.8. Параметры эквивалентного электродвигателя

Параметры эквивалентного асинхронного электродвигателя задаются в интерактивном окне, которое открывается при активировании условного значка электродвигателя «М»:

$U_{\text{ном}}$ – номинальное напряжение (линейное), кВ;

$P_{\text{ном}}$ – номинальная активная мощность, кВт;

$n_{\text{ном}}$ – номинальная частота вращения, об/мин;

$\text{COS}\varphi_{\text{ном}}$ – номинальный коэффициент мощности, о. е.;

$\text{КПД}_{\text{ном}}$ – номинальный КПД, о. е.;

$I_{\text{п}}^*$ – кратность пускового тока, о. е.;

$M_{\text{п}}^*$ – кратность пускового момента, о. е.;

J – момент инерции ротора электродвигателя, $\text{кг}\cdot\text{м}^2$;

$R_{\text{ст}}^*$ – активное сопротивление обмотки статора, о. е.;

$R_{\text{р}}^*$ – активное сопротивление контура ротора, о. е.;

$M_{\text{мех0}}^*$ – момент сопротивления механизма, о. е.;

$N_{\text{мех}}^*$ – относительная частота вращения механизма, о. е.

2.1.9. Расчет входных сигналов защиты от замыканий на землю

Для выполнения расчетов замыканий на землю необходимо выбрать в информационном окне «Вид КЗ» признак «Однофазное замыкание». После выбора вида КЗ интерактивная схема объекта принимает вид, показанный на рис. 2.9.

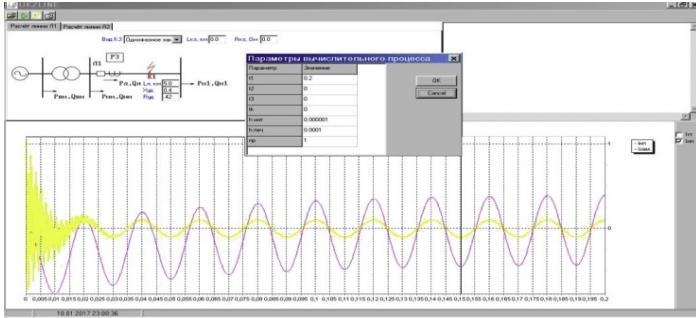


Рис. 2.9. Расчет однофазного замыкания фазы *A* на землю

Трехлинейная электрическая схема замещения сети с дугогасящей катушкой приведена на рис. 2.10.

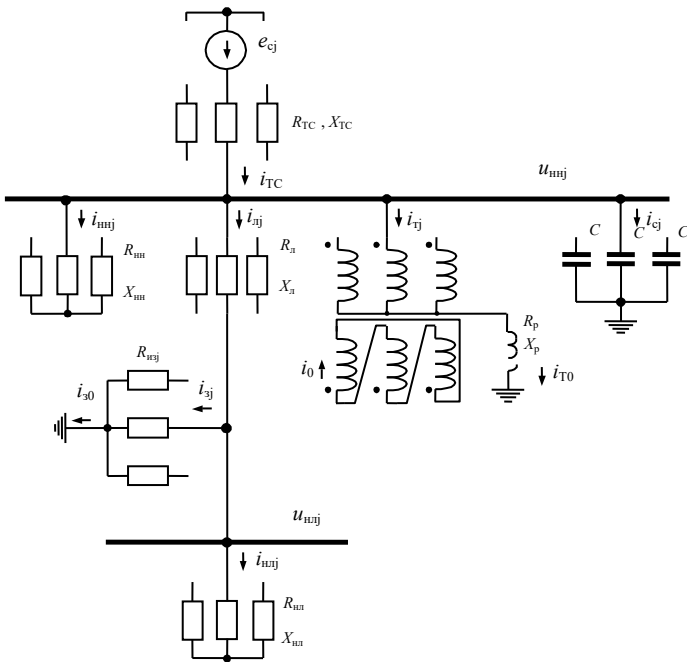


Рис. 2.10. Электрическая схема сети с дугогасящей катушкой для расчета замыкания фазы *A* на землю

Питающая система представлена неизменной симметричной системой ЭДС прямой последовательности, определенных с учетом нагрузок на сторонах ВН и НН трансформатора, и приведенных к стороне НН. Активно-индуктивные сопротивления питающей системы X_{Tc} , R_{Tc} – результирующие сопротивления источника питания на стороне ВН, сопротивлений связи и сопротивлений трансформатора, также приведены к стороне НН трансформатора.

Представление питающей системы и силового трансформатора полной схемой, как для режимов междуфазных замыканий, может значительно усложнить алгоритм воспроизведения модели. Принятое упрощенное представление трансформатора устраняет возможное влияние намагничивающих токов трансформатора на устойчивость решения дифференциальных уравнений. Однако это допустимо при использовании настоящей модели для проверки простой токовой защиты нулевой последовательности, реагирующей на полные токи фаз линии.

Замыкание на землю в одной из фаз создается снижением ее сопротивления изоляции. Место замыкания практически не влияет на величину тока замыкания на землю, т. к. падения напряжения в линии от этой составляющей полного тока весьма малы. В предположении отсутствия необходимости проверки несрабатывания защиты при замыканиях на землю на соседних присоединениях в электрическую схему не введены емкости фаз защищаемой линии по отношению к земле и внешнее присоединение к шинам НН с его сопротивлениями изоляции.

В отличие от междуфазных КЗ, при однофазных замыканиях на землю двигательная составляющая нагрузки линии Л1 не выделяется, т. к. торможение двигателей в этом режиме не возникает. В параметрах исходного режима выделяется составляющая входной нагрузки линии, обусловленная симметричным активным сопротивлением изоляции между фазами и землей. Эта составляющая задается в окне «Параметры исходного режима» сопротивлением изоляции ($R_{\text{зmax}}$, кОм). Там же задается степень компенсации емкостного тока замыкания на землю с помощью дугогасящего реактора (I_{c0} , о. е.). Переходное сопротивление между замкнувшейся фазой A и землей ($R_{\text{кз}}$, Ом) задается в окне « $R_{\text{кз}}$ ».

Минимальная величина переходного сопротивления $R_{кз}$ в зависимости от величины емкостного тока I_{c0} и шага интегрирования дифференциальных уравнений $h_{инт}$ может составлять 0–5 Ом.

Расчеты однофазных замыканий на землю выполняются с шагом $h_{инт} = (0,00001 \dots 0,00005)$ с. Меньшие значения шага могут потребоваться при малых величинах емкостных токов замыкания на землю и сопротивления изоляции в замкнувшейся фазе.

Результаты расчета однофазного замыкания фазы A на землю представлены на рис. 2.9. В окне «Параметры вычислительного процесса» t_1 – длительность расчетного режима (с); t_2 , t_3 и t_k задаются равными 0. Высокочастотные колебательные процессы, возникающие в момент замыкания на землю, затухают в течение промежутка времени, не превышающего 1–2 периодов промышленной частоты. С увеличением значения I_{c0} и переходного сопротивления $R_{кз}$ частота и амплитуда высокочастотных колебаний уменьшается.

2.1.10. Расчет входных сигналов защиты от междуфазных замыканий

Для анализа получаемых расчетных данных, которые записываются во внешний файл результатов ТОКИ_ТТ.dat, разработана программа в среде MathCad [30] Grafik.xmcd. Программа позволяет считывать численные значения расчетных токов из файла результатов, строить их графики и определять действующие значения токов на заданных интервалах времени: предшествующего режима короткому замыканию, аварийного режима, и режима после отключения замыкания. При необходимости в среде MathCad можно проводить гармонический анализ результатов расчета [31].

На рис. 2.11 приведены результаты расчета развивающегося двухфазного КЗ фаз AB , возникающего в момент времени $t_1 = 0,04$ с на расстоянии 0,5 км от шин НН силового трансформатора и переходящего в момент времени $t_2 = 0,1$ с в трехфазное КЗ. Отключение КЗ происходит в момент времени $t_3 = 0,3$ с, и выполняется расчет послеаварийного режима. Расчет послеаварийного режима завершается при достижении момента времени $t_k = 0,4$ с. На каждом интервале времени выполняется расчет действующего значения тока фазы A . Отличие действующих значений тока в режиме, предше-

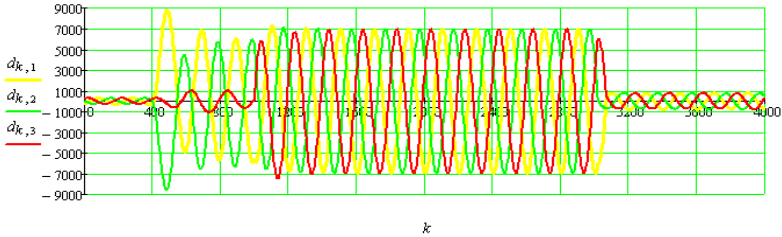
ствующем аварийному ($0 - t_1$), и в послеаварийном $t_{па}$ ($t_3 - t_k$) объясняется наличием двигательной нагрузки и самозапуском электродвигателя в момент отключения КЗ.

Считывание расчетных значений их файла результатов "ТОКИ_ТТ"

```
d := READPRN("E:\XD\ГЕ2011\W адим\ТОКИ_ТТ").*
```

	0	1	2	3
$d =$	0	-251.3	18.04	233.3
	$1 \cdot 10^{-4}$	-247.3	9.247	238.1
	$2 \cdot 10^{-4}$	-243	0.4407	242.6
	$3 \cdot 10^{-4}$	-238.5	-8.366	...

Построение графиков фазных токов трансформатора тока защищаемой



Расчет действующих значений тока фазы А защищаемой линии

$$k := 1..4000$$

$$i_{A_k} := d_{k,1}$$

Интервалы времени, на которых выполняется расчет действующих значений

$$t_0 := 0 \quad t_1 := 400 \quad (0.04c) \quad t_3 := 1600 \quad (0.16c) \quad t_5 := 3600 \quad (0.36c)$$

$$t_{00} := 400 \quad (0.04c) \quad t_2 := 800 \quad (0.08c) \quad t_4 := 2000 \quad (0.20c) \quad t_6 := 4000 \quad (.40c)$$

Действующие значения тока фазы на соответствующих интервалах времени

$$I_{A0} := \sqrt{\frac{\sum_{k=t_0}^{t_{00}} (i_{A_k})^2}{(t_{00}-t_0)}} \quad I_{A1} := \sqrt{\frac{\sum_{k=t_1}^{t_2} (i_{A_k})^2}{(t_2-t_1)}} \quad I_{A2} := \sqrt{\frac{\sum_{k=t_3}^{t_4} (i_{A_k})^2}{(t_4-t_3)}} \quad I_{A3} := \sqrt{\frac{\sum_{k=t_5}^{t_6} (i_{A_k})^2}{(t_6-t_5)}}$$

$$I_{A0} = 198.256 \quad I_{A1} = 4.887 \times 10^3 \quad I_{A2} = 4.923 \times 10^3 \quad I_{A3} = 543.889$$

Рис. 2.11. Расчет развивающегося трехфазного КЗ

Малые значения $t_{па}$ позволяют проследить правильность воспроизведения процесса отключения, продолжающегося около одного периода (рис. 2.11). Для того, чтобы проследить процесс самозапуска двигательной нагрузки величина $t_{па}$ выбирается до 1–2 с. На

рис. 2.12 представлены графики того же послеаварийного режима, что и на рис. 2.11, но при $t_{па} = 0,6$ с.

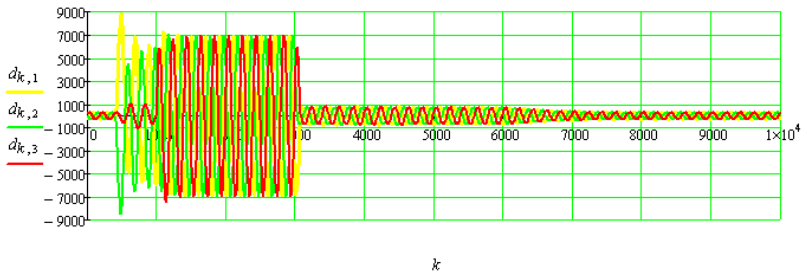
Считывание расчетных значений их файла результатов "ТОКИ_ТТ"

$d := \text{READPRN}("E:\text{ДВГБ2011}\text{Wadim}\text{ТОКИ_ТТ"})*$

$$d =$$

	0	1	2	3
0	0	-251.3	18.04	233.3
1	$1 \cdot 10^{-4}$	-247.3	9.247	238.1
2	$2 \cdot 10^{-4}$	-243	0.4407	242.6
3	$3 \cdot 10^{-4}$	-238.5	-8.366	...

Построение графиков фазных токов трансформатора тока защищаемой



Расчет действующих значений тока фазы А защищаемой линии

$$k := 1 \dots 10000 \quad i_{A_k} := d_{k,1}$$

Интервалы времени, на которых выполняется расчет действующих значений

$$t_0 := 0 \quad t_1 := 1600 \quad (0.16c) \quad t_3 := 4000 \quad (0.4c) \quad t_5 := 9600 \quad (0.96c)$$

$$t_{00} := 400 \quad (0.04c) \quad t_2 := 2000 \quad (0.20c) \quad t_4 := 4400 \quad (0.44c) \quad t_6 := 10000 \quad (1.0c)$$

Действующие значения тока фазы на соответствующих интервалах времени

$$I_{A0} := \sqrt{\frac{\sum_{k=t_0}^{t_{00}} (i_{A_k})^2}{(t_{00} - t_0)}} \quad I_{A1} := \sqrt{\frac{\sum_{k=t_1}^{t_2} (i_{A_k})^2}{(t_2 - t_1)}} \quad I_{A2} := \sqrt{\frac{\sum_{k=t_3}^{t_4} (i_{A_k})^2}{(t_4 - t_3)}} \quad I_{A3} := \sqrt{\frac{\sum_{k=t_5}^{t_6} (i_{A_k})^2}{(t_6 - t_5)}}$$

$$I_{A0} = 198.256 \quad I_{A1} = 4923 \times 10^3 \quad I_{A2} = 538.672 \quad I_{A3} = 199.793$$

Рис. 2.12. Расчет развивающегося трехфазного замыкания с самозапуском двигательной нагрузки после отключения КЗ

Как отмечалось ранее достоинством рассматриваемых КПК является то, что расчетные токовые сигналы отражают несинусои-

дальность вторичных токов ТТ, вследствие насыщения магнито-проводов измерительных трансформаторов. Графики первичных токов фаз линии и вторичных токов ТТ, установленных в этих фазах могут значительно отличаться по форме при КЗ в линии, что наглядно показано на рис. 2.13.

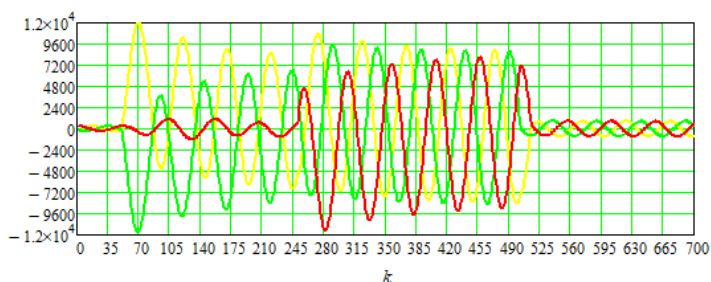
Загрузка численных значений токов из файла ТОКИ_ТТ

```
ORIGIN := 1
*****
i := READPRN("toki_tt")*
```

	1	2	3	4	5	6	7
$i =$	0	-155.5	-124.3	279.8	-4.521	-4.256	8.777
	$4 \cdot 10^{-4}$	-125.1	-154.8	279.8	-4.147	-5.118	9.265
	$8 \cdot 10^{-4}$	-92.62	-182.9	275.5	-3.076	-6.048	9.123
	$1.2 \cdot 10^{-3}$	-58.72	-208.1	266.8	-1.953	-6.883	...

Первичные токи ТТ линии

$k := 1..700$



Вторичные токи ТТ линии

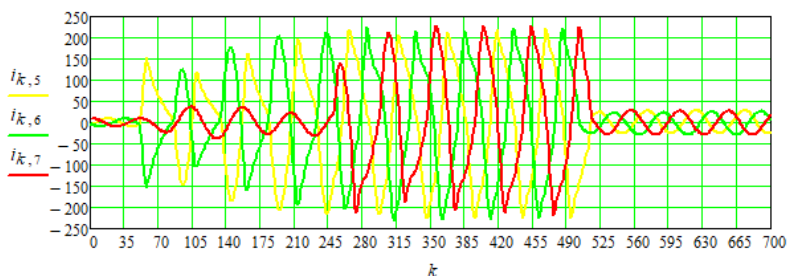


Рис. 2.13. Первичные и вторичные токи измерительных ТТ

2.2. Компьютерный программный комплекс KZTRANS2

КПК KZTRANS2 «Режимы трехфазного двухобмоточного трансформатора» создан по тем же принципам, что и КПК UKZLINE [18, 20]. Программный комплекс состоит из следующих программных модулей (рис. 2.14):

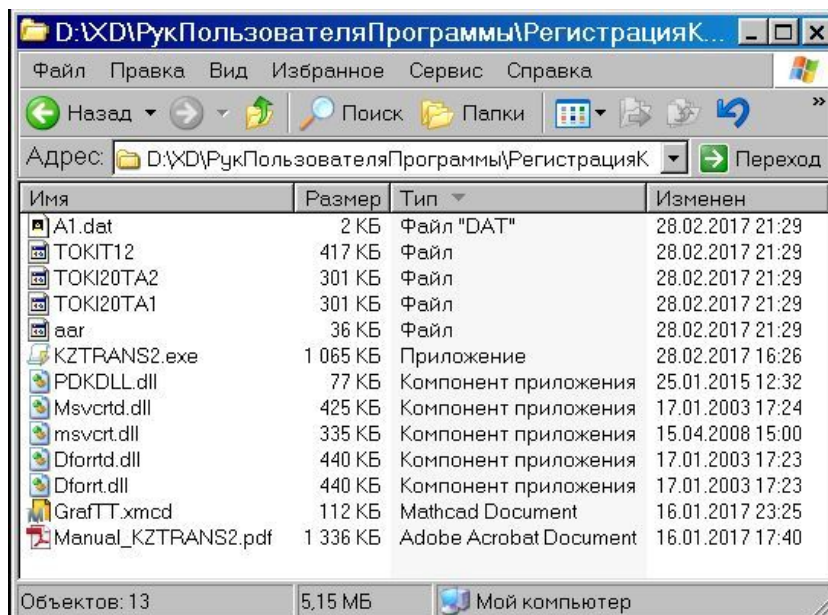


Рис. 2.14. Компьютерный программный комплекс KZTRANS2

- TOKIT12 – файл результатов с выборками мгновенных значений линейных токов силового трансформатора на сторонах ВН и НН;
- TOKI20TA1 – файл результатов с выборками мгновенных значений вторичных токов трансформатора тока ТА1 на стороне ВН;
- TOKI20TA2 – файл результатов с выборками мгновенных значений вторичных токов трансформатора тока ТА2 на стороне НН;
- aar – контрольный файл результатов с мгновенными значениями основных параметров режима с повышенной разрядностью на промежутке времени 0,041 с;

- KZTRANS2.exe – головная программа КПК;
- A1.dat – файл исходных данных для расчета режимов силового трансформатора;
- PDKDLL.dll – компьютерный модуль расчетов режимов силового трансформатора;
- GrafTT.xmcd – программа визуализации результатов расчета в математическом пакете MathCad из файлов TOKI12, TOKI20TA1 и TOKI20TA2;
- Manual_KZTRANS2.pdf – инструкция пользователя;
- Msvcrtd.dll, msvcrtd.dll, Dforrtd.dll, Dforrtd.dll – программные динамические модули КПК.

Расчетная схема для исследования рабочих и аварийных режимов подстанции с двухобмоточным силовым трансформатором, приведена на рис. 2.15.

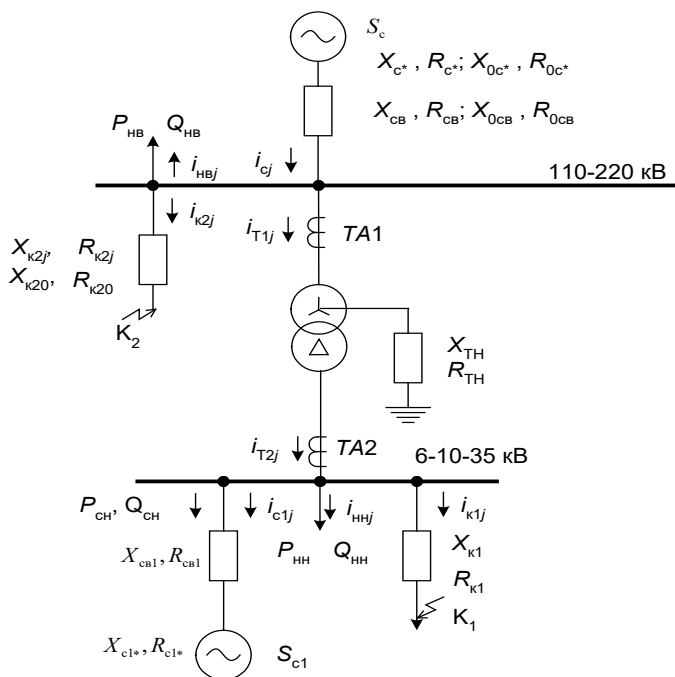


Рис. 2.15. Расчетная схема узла нагрузки КПК KZTRANS2

Питающая система на стороне ВН – система конечной мощности с симметричной системой ЭДС прямой последовательности и неизменными амплитудой и частотой. Система характеризуется суммарной номинальной мощностью источников, внутренними сопротивлениями прямой и нулевой последовательности в относительных единицах (о. е.) и сопротивлениями связи в именованных единицах. Силовой трансформатор – двухобмоточный трансформатор со схемой соединения обмоток $Y_0/\Delta-11$.

К шинам ВН и НН присоединены активно-индуктивные нагрузки, определяющие доаварийный режим функционирования защищаемого трансформатора. На шинах НН предусмотрена связь с источником питания конечной мощности и ветвь КЗ с задаваемыми переходными сопротивлениями. Система на стороне НН характеризуется установленной мощностью источника, внутренними сопротивлениями прямой последовательности в о. е. и сопротивлениями связи в Ом. Ветви КЗ при соответствующем задании параметров и места их включения используются в расчете режимов КЗ на выводах трансформатора и в расчете режимов внешних КЗ на шинах НН и ВН трансформаторной подстанции.

КПК KZTRANS2 позволяет получать в качестве эталонных результатов моделирования временную последовательность численных величин мгновенных значений вторичных токов, которые впоследствии могут быть использованы в ИПК или ИПАК для проверки правильности функционирования наиболее сложной в реализации защиты силового трансформатора – микропроцессорной токовой дифференциальной защиты.

Контролируемые данной защитой сигналы – это мгновенные значения вторичных токов ТТ $TA1$ и $TA2$, установленных на сторонах ВН и НН силового трансформатора.

Мгновенные значения вторичных токов ТТ рассчитываются в КПК для различных режимов силового трансформатора:

- доаварийного режима, предшествующего аварийному;
- аварийного режима – режим КЗ на сторонах ВН и НН трансформатора в зоне действия дифференциальной защиты и вне зоны;
- послеаварийных режимов, возникающих после ликвидации аварийных режимов;

– аномальных режимов – режим включения ненагруженного силового трансформатора со стороны ВН и режим перевозбуждения трансформатора.

Интерактивное диалоговое окно КПК KZTRANS2 (рис. 2.16) аналогично по составу и функциональным возможностям диалоговому окну КПК UKZLINE. Параметры элементов расчетной схемы (питающих систем, силового трансформатора, трансформаторов тока), параметры вычислительного процесса и исходного режима аналогичны рассмотренным параметрам в КПК UKZLINE.

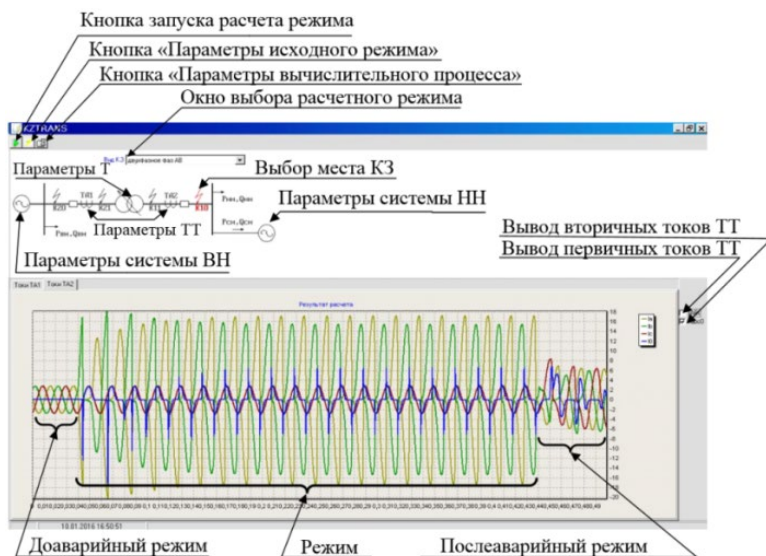


Рис. 2.16. Диалоговое окно КПК KZTRANS2

2.3. Компьютерный программный комплекс KZTRANS3

КПК KZTRANS3 «Режимы трехфазного трехобмоточного трансформатора» (рис. 2.17) предназначен для расчета информационных входных сигналов дифференциальной защиты трехфазного трехстержневого трехобмоточного трансформатора с расщепленной вторичной обмоткой со схемой соединения обмоток $Y_0/\Delta/\Delta-11-11$. Расчетная схема узла нагрузки приведена на рис. 2.18.

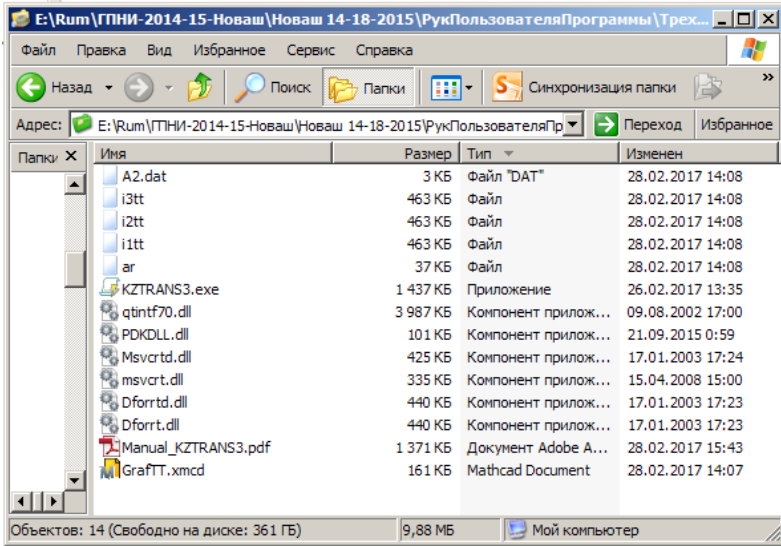


Рис. 2.17. Компьютерный программный комплекс KZTRANS3

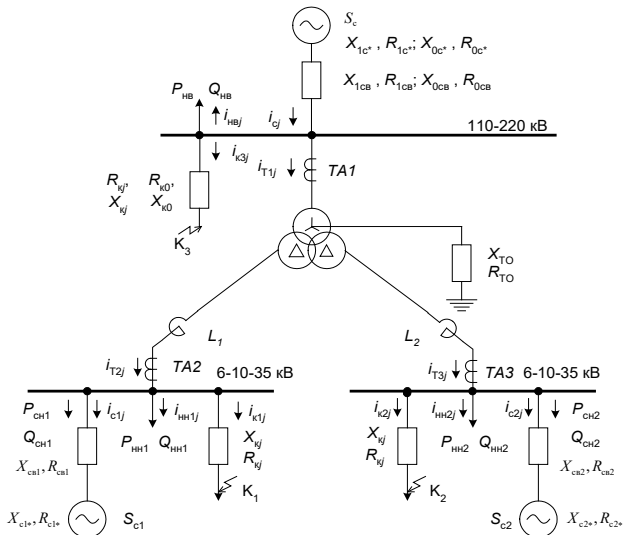


Рис. 2.18. Расчетная схема узла нагрузки КПК KZTRANS3

Интерактивное окно КПК KZTRANS3 представлено на рис. 2.19.

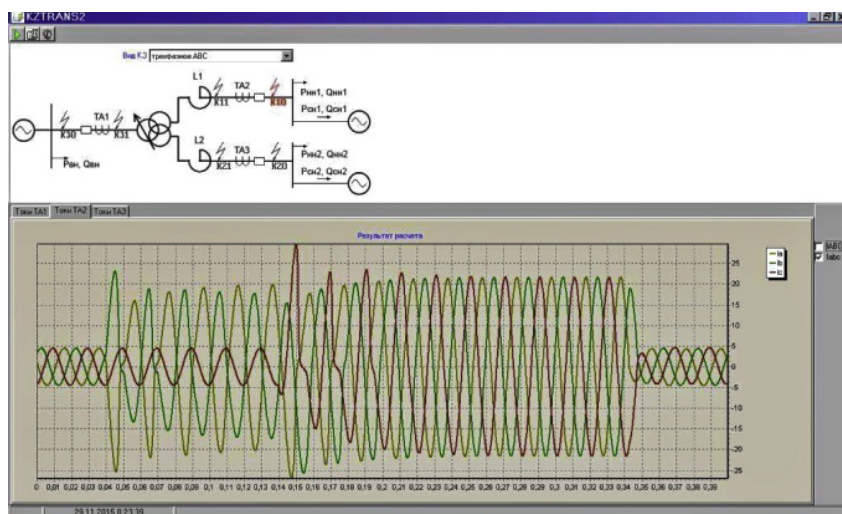


Рис. 2.19. Диалоговое окно КПК KZTRANS3

КПК KZTRANS3 практически повторяет все функции КПК KZTRANS2. Результаты расчета КПК – первичные и вторичные токи ТТ $TA1$, $TA2$ и $TA3$ – сохраняются во внешних файлах:

- $i1tt$ – файл результатов мгновенных значений первичных и вторичных токов трансформатора тока $TA1$;
- $i2tt$ – файл результатов мгновенных значений первичных и вторичных токов трансформатора тока $TA2$;
- $i3tt$ – файл результатов первичных и вторичных токов трансформатора тока $TA3$;

2.4. Компьютерный программный комплекс РежимыАД

КПК РежимыАД для расчета рабочих и аварийных режимов асинхронного двигателя (АД) разработан на основе комплексной математической модели узла электропитания собственных нужд электростанций с асинхронным двигателем (рис. 2.20) [32, 33].

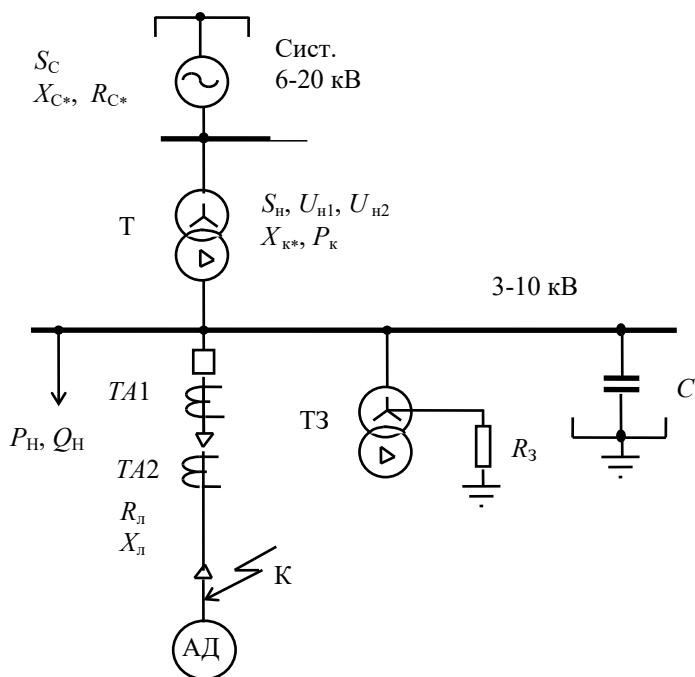


Рис. 2.20. Расчетная схема узла электропитания собственных нужд электростанций с асинхронным двигателем

Состав КПК Режимы АД представлен на рис. 2.21:

- ddi – файл результатов мгновенных значений токов АД;
- ddr – контрольный файл с мгновенными значениями основных параметров режима на промежутке времени 0,041 с;
- avdvig2019.exe – головная программа КПК;
- dv – файл исходных данных для расчета режимов АД;
- GRAF-DV.xmcd – программа визуализации результатов расчета в MathCad;
- AVDVIG.BAT – пакетный файл для запуска КПК.

Головная программа avdvig2019.exe разработана в системе программирования Fortran PowerStation 4.0. в виде расчетного модуля без создания и использования интерактивных графических окон, предназначенных для редактирования исходных данных к расчету и визуализации результатов.

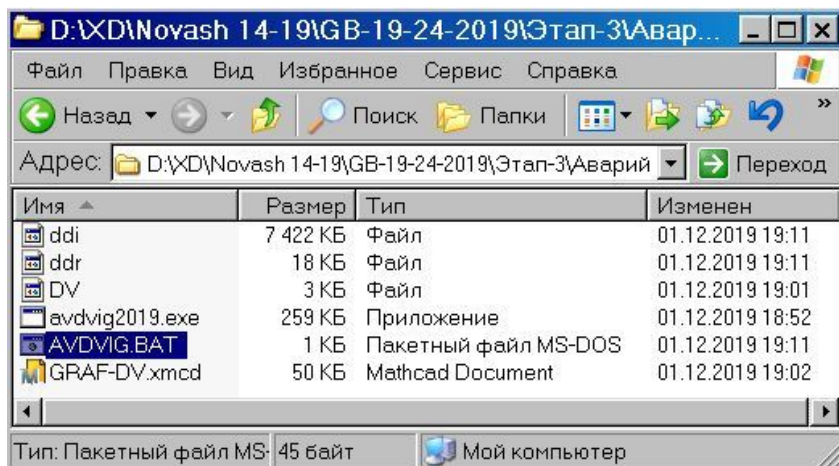


Рис. 2.21. Компьютерный программный комплекс РежимыАД

По разработанной методике в [18] программный комплекс разработан с минимальными трудозатратами. Редактирование файла исходных данных может осуществляться с помощью любого текстового редактора. Структура файла исходных данных DV аналогична структуре файлов исходных данных ранее рассмотренных КПК. Визуализация результатов расчета, сохраняемых во внешнем файле результатов ddi, выполняется с помощью программного файла GRAF-DV.xmcd в среде математического пакета MathCad.

В связи с полной симметрией питающих элементов и самого электродвигателя из несимметричных режимов рассматриваются следующие: двухфазное замыкание фаз A и B ; однофазное замыкание на землю фазы A ; исчезновение напряжения питания в фазе C .

Исходными данными для расчета наряду с параметрами элементов расчетной схемы и электродвигателя являются параметры, предшествующего установившегося режима узла питания: действующее значение напряжения на шинах узла, начальная фаза напряжения фазы A , активная и реактивная мощность стационарной нагрузки на шинах узла, коэффициент загрузки электродвигателя, частота напряжения в питающей системе.

Вид аварийного режима задается знаком KZ в файле исходных данных.

Программный комплекс позволяет выполнять расчеты рабочих и аварийных режимов АД, и может быть использован для испытания релейных защит АД с проведением вычислительного эксперимента на любом компьютере, входящем в состав ИПАК.

Комплекс предназначен для испытаний работоспособности и оценки технической эффективности многофункционального устройства цифровой защиты АД и позволяет воспроизводить следующие аварийные режимы:

$KZ = 0$ – потеря нагрузки вследствие внезапной разгрузки приводимого механизма;

$KZ = 1$ – заклинивание приводного механизма;

$KZ = 10$ – однофазное замыкание на землю при незаземленной нейтрали;

$KZ = 11$ – то же, при заземленной нейтрали через активное сопротивление;

$KZ = 2$ – двухфазное замыкание фаз A и B ;

$KZ = 3$ – трехфазное одновременное замыкание фаз;

$KZ = 123$ – развивающееся трехфазное замыкание, начинающееся с замыкания фаз A и B ;

$KZ = -10$ – обрыв фазы A в цепи электродвигателя;

$KZ = -11$ – исчезновение напряжения фазы A ;

$KZ = -3$ – внезапное симметричное снижение напряжения (симметричное замыкание в питающей сети);

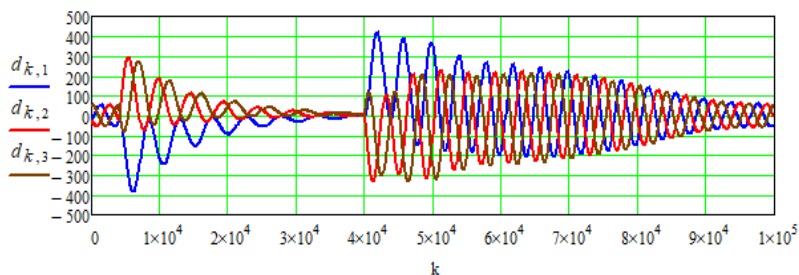
$KZ = -2$ – внезапное несимметричное снижение напряжения (несимметричное замыкание в питающей сети).

Во внешнем файле результатов `ddi` сохраняются мгновенные значения первичных и вторичных токов ТТ. В качестве примера на рис. 2.22 приведены результаты расчета аварийного режима АД при внезапном симметричном снижении напряжения питания (симметричное замыкание в питающей сети, $KZ = -3$).

KZ= -3 - внезапное симметричное снижение напряжения
(симметричное замыкание в питающей сети)

$$d := \text{READPRN}(\text{"ddi"})_*$$

$d =$	0	1	2	3	4	5	6	7
0	0	-28.345	-24.058	52.404	0	-1.57	-1.337	2.907
1	$5 \cdot 10^{-6}$	-28.276	-24.132	52.407	0	-1.566	-1.341	2.907
2	$1 \cdot 10^{-5}$	-28.206	-24.205	52.411	0	-1.562	-1.345	2.907
3	$1.5 \cdot 10^{-5}$	-28.137	-24.278	52.415	0	-1.558	-1.349	...



Графики вторичных токов измерительных ТТ

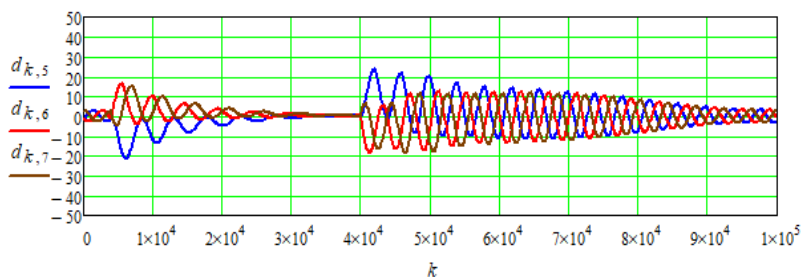


Рис. 2.22. Результаты расчета аварийного режима АД при внезапном симметричном снижении напряжения питания

2.5. Компьютерные программные комплексы для расчета режимов комплектной трансформаторной подстанции

2.5.1. КПК РежимыКТП для расчета аварийных режимов комплектной трансформаторной подстанции

КПК РежимыКТП для расчета рабочих и аварийных режимов распределительных линий 0,4 кВ комплектных трансформаторных подстанций (КТП) разработан на основе математической модели КТП [18]. Схема электрических соединений КТП 6(10)/0,4 кВ представлена на рис. 2.23.

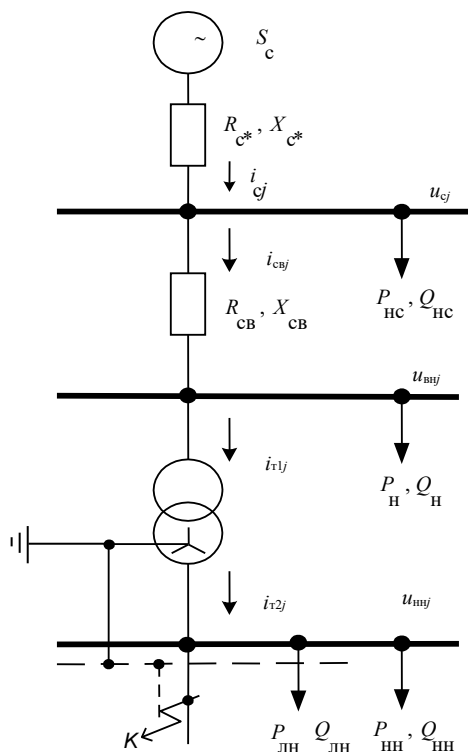


Рис. 2.23. Схема для расчета аварийных режимов КТП

Состав КПК РежимыКТП представлен на рис. 2.24:

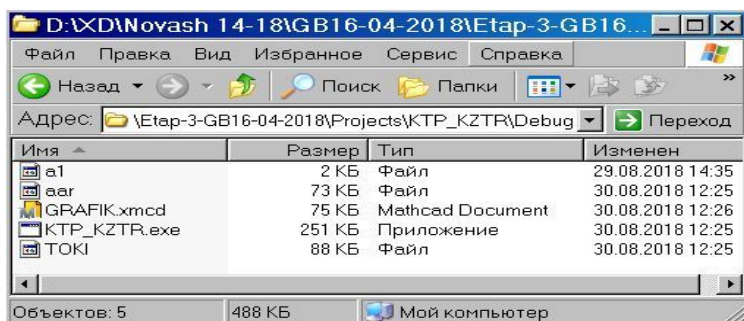


Рис. 2.24. Состав программногo комплекса РежимыКТП

- ТОКИ – файл результатов с выборками мгновенных значений токов КТП;
- aag – контрольный файл с мгновенными значениями основных параметров режима на промежутке времени 0,041 с;
- KTP_KZTR.exe – головная программа КПК;
- a1 – файл исходных данных для расчета режимов КТП;
- GRAFIK.xmcd – программа визуализации результатов расчета.

Головная программа KTP_KZTR.exe КПК РежимыКТП разработана в системе программирования Fortran PowerStation 4.0 и предназначена для выполнения расчетов на любых персональных компьютерах с использованием современных операционных систем. Также как и в КПК РежимыАД головная программа выполнена в виде расчетного модуля без создания и использования интерактивных графических окон, предназначенных для редактирования исходных данных и визуализации результатов расчета. Редактирование файла исходных данных может осуществляться с помощью любого текстового редактора. Визуализация результатов расчета, сохраняемых во внешнем файле результатов ТОКИ, выполняется с помощью программного файла GRAFIK.xmcd, выполненного в среде математического пакета MathCad.

На рис. 2.25 приведены результаты расчета режима КТП при однофазном КЗ в фазе А на нулевой провод.

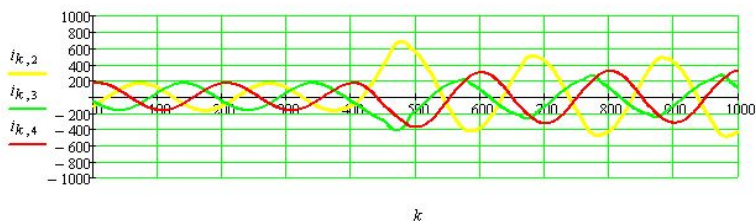
Загрузка численных значений токов из файла ТОКИ

```

ORIGIN := 1
i := READPRN("ТОКИ")
    
```

	1	2	3	4	5	6	7
$i =$	0	-127.31	-51.23	178.55	$1.487 \cdot 10^3$	-828.22	$2.317 \cdot 10^3$
	$1 \cdot 10^{-4}$	-103.56	-60.06	163.62	$1.449 \cdot 10^3$	-894.45	$2.345 \cdot 10^3$
	$2 \cdot 10^{-4}$	-99.55	-64.85	164.4	$1.391 \cdot 10^3$	-963.48	$2.355 \cdot 10^3$
	$3 \cdot 10^{-4}$	-95.42	-69.59	165.01	$1.331 \cdot 10^3$	$1.032 \cdot 10^3$	$2.364 \cdot 10^3$
	$4 \cdot 10^{-4}$	-91.18	-74.26	165.44	$-1.27 \cdot 10^3$	$1.099 \cdot 10^3$...

Графики токов на стороне ВН силового трансформатора КТП при КЗ фазы А на нулевой провод



Графики токов на стороне НН силового трансформатора КТП при КЗ фазы А на нулевой провод

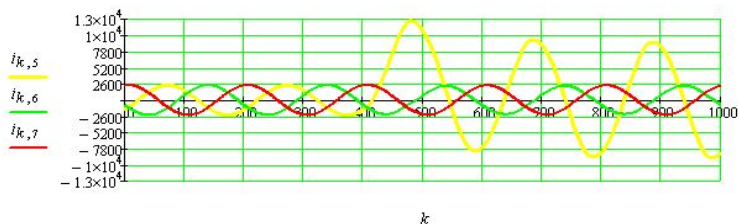


Рис. 2.25. Расчет однофазного КЗ в фазе А на нулевой провод

2.5.2. КПК Включение КТП

КПК Включение КТП для расчета режимов включения силового трансформатора КТП разработан на основе математической модели режимов включения КТП [18]. Схема электрических соединений КТП для расчета режима включения силового трансформатора со схемой соединения первичных обмоток Y_0 приведена на рис. 2.26, а, а со схемой соединения Δ – на рис. 2.26, б.

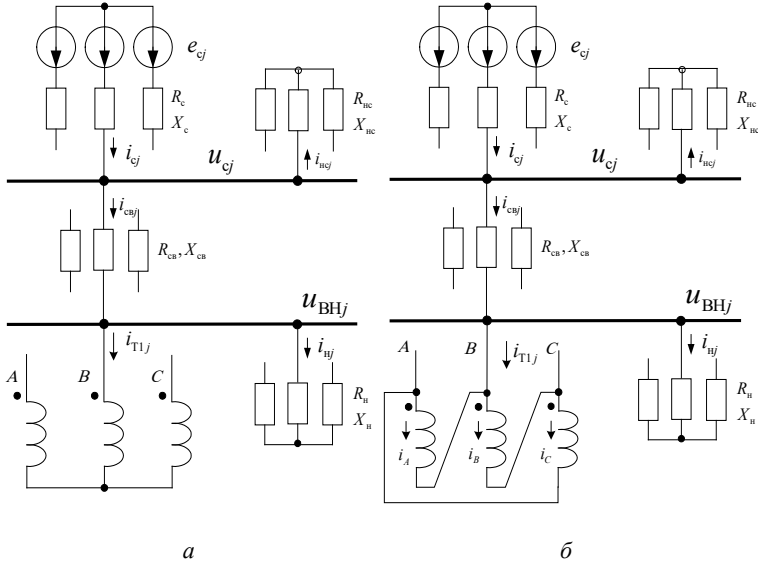


Рис. 2.26. Схемы КТП для режима включения силового трансформатора: а – со схемой первичных обмоток Y_0 ; б – со схемой первичных обмоток Δ

Состав КПК ВключениеКТП представлен на рис. 2.27:

- ТОКИТР – файл результатов с выборками мгновенных значений токов силового трансформатора КТП;
- aag – контрольный файл с мгновенными значениями основных параметров режима на промежутке времени 0,041 с;
- КТР_WKTR.exe – головная программа КПК;
- a1 – файл исходных данных для расчета режимов КТП;
- GRAFIK.xmcd – программа визуализации результатов расчета;

Головная программа КТР_WKTR.exe КПК ВключениеКТП разработана в системе программирования Fortran PowerStation 4.0 аналогично, как и головная программа КТР_KZTR.exe КПК РежимыКТП. Данная программа выполнена в виде расчетного модуля без создания и использования интерактивных графических окон, предназначенных для редактирования исходных данных и визуализации результатов расчета. Визуализация результатов расчета, сохраняемых во внешнем файле результатов ТОКИ, выполняется с по-

мощью программного файла GRAFIK.xmcd, выполненного в среде математического пакета MathCad.

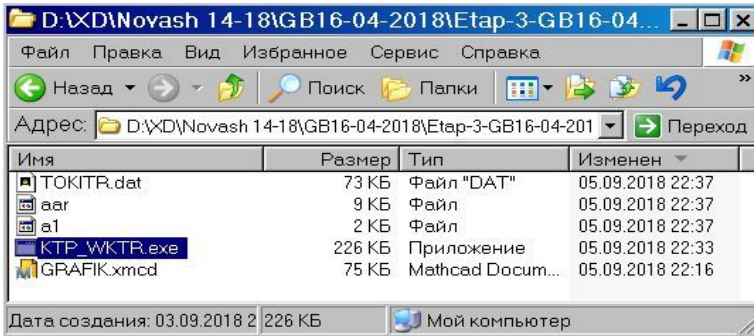


Рис. 2.27. Состав прогпрммного комплекса ВключениеКТП

На рис. 2.28 приведены результаты расчета режима включения КТП со схемой соединения первичных обмоток силового трансформатора Y_0 («звезда» с нулевым выводом).



Рис. 2.28. Расчет режима включения силового трансформатора со схемой соединения первичных обмоток Y_0

2.6. Проведение испытаний с помощью ИПАК

Кафедра «Электрические станции» БНТУ располагает ИУ СМС 356 компании OMICRON (рис. 2.29), которая используется для проведения научно-исследовательских и лабораторных работ. Данная ИУ укомплектована набором ПО, которое обеспечивает ее управление и настройку, визуализацию полученных результатов, автоматизацию процессов тестирования и прочие функции. В ПО входят специализированные программы, обеспечивающие выбор, воспроизведение и просмотр заранее подготовленных осциллограмм в формате COMTRADE: Advanced TransPlay и TransView.

Несомненным преимуществом данной ИУ является возможность воспроизведения заранее подготовленных файлов осциллограмм тестовых воздействий в формате COMTRADE.



Рис. 2.29. Испытательная установка OMICRONCMC 356

2.6.1. Преобразование результатов расчета КПК в формат COMTRADE

Формат COMTRADE состоит из набора четырех текстовых ASCII-файлов, имеющих одинаковое название и отличающихся только расширением. Каждый файл предназначен для хранения определенной информации.

Файл заголовка имеет расширение *****.HDR и создается источником данных. Данный файл не имеет строго определенной синтаксической структуры и его наличие в составе формата COMTRADE является опциональным. В данном файле хранится общая информация об ОЗО и параметрах самого регистратора.

Файл данных имеет расширение *****.DAT и содержит значение каждой выборки данных регистрируемых аналоговых величин. Также в файле хранятся и значения регистрируемых дискретных каналов, которые соответствуют сигналам «включено» или «отключено» и имеют значения 1 или 0. Каждой выборке каждого канала в данном файле присваивается метка времени.

Файл конфигурации имеет расширение *****.CFG и содержит информацию, необходимую для правильного воспроизведения данных из файла данных (*****.DAT). Такой информацией являются: версия формата COMTRADE, время пуска регистратора, частота дискретизации, количество регистрируемых аналоговых и дискретных каналов, наименование данных каналов, единицы измерения, минимальные и максимальные значения выборок по каждому каналу, частота энергосистемы, коэффициенты трансформации измерительных трансформаторов и т. д.

Структура файла конфигурации (*****.CFG) с комментариями приведена на рис. 2.30.

```

Device,43,1999 // Устройство, № регистратора, версия стандарта
11,3A,8D // Общее число каналов, число аналоговых, число дискретных
1,1a_HV,,,A,6.872818795E-003,0,0,-32768,32767,400,5,S
2,1b_HV,,,A,7.387351588E-003,0,0,-32768,32767,400,5,S    аналоговые
каналы
3,1c_HV,,,A,7.886495758E-003,0,0,-32768,32767,400,5,S
1,A_block_2nd,,,0
2,B_block_2nd,,,0
3,C_block_2nd,,,0
4,ov_block_2nd,,,0    дискретные каналы
5,A_block_5th,,,0
6,B_block_5th,,,0
7,C_block_5th,,,0
8,ov_block_5th,,,0
50 // Частота сети
1 // Число частот дискретизации
1200,241 // Частота дискретизации, число выборок
09/03/2016,23:21:25.747000 // Метка времени начала регистрации
09/03/2016,23:21:25.947000 // Метка времени конца регистрации
ASCII // Тип файла
    
```

Рис. 2.30. Структура файла конфигурации формата COMTRADE

Информационный файл имеет расширение *****.INF и содержит любую другую дополнительную информацию в произвольном порядке. Данный файл, как и файл заголовка является необязательным в структуре формата COMTRADE.

Преобразовать результаты расчетов КПК, сохраненные во внешних файлах, в формат COMTRADE можно с помощью файл-функции write_comtrade.m [34] в СДМ MATLAB. По результатам преобразования формируются два текстовых ASCII-файла (*****.DAT и *****.CFG), описанной выше структуры, содержащие результаты моделирования КПК в виде, пригодном для их физического воспроизведения ИУ типа СМС 356 в составе ИПАК.

Рассмотрим последовательность создания COMTRADE-файла на примере результатов расчета КПК UKZLINE.

Для сохранения результатов расчета КПК в формат COMTRADE необходимо выполнить следующие действия:

1. Файлу результатов расчета необходимо присвоить расширение *****.mat (ТОКИ_ТТ.mat).
2. Файл результатов «ТОКИ_ТТ.mat» загружается в область данных Workspase СДМ MATLAB (рис. 2.31).

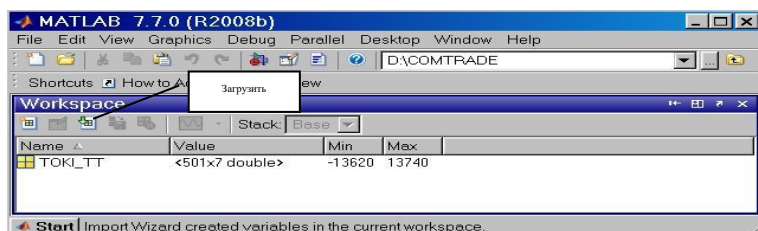


Рис. 2.31. Загрузка файла ТОКИ_ТТ.mat в область Workspase MATLAB

3. Открывается файл ТОКИ_ТТ и выбирается столбец данных нужного графика тока (рис. 2.32).

4. Создается новый файл «unnamed» в области Workspasee командой Create Variable from Selection (рис. 2.33).

5. Созданный файл «unnamed» переименовывается в «ТОК_ТТ1» командой Rename (рис. 2.34).

6. Создается файл «ТОК_ТТ1.cfg» с одним графиком тока в формате COMTRADE командой (рис. 2.35):

2. Компьютерные программные комплексы ...

write_comtrade('D:\COMTRADE\TOK_TT1.cfg',50,12800,TOK_TT
1,'A','S'), где write_comtrade – имя файла-функции write_comtrade.m;

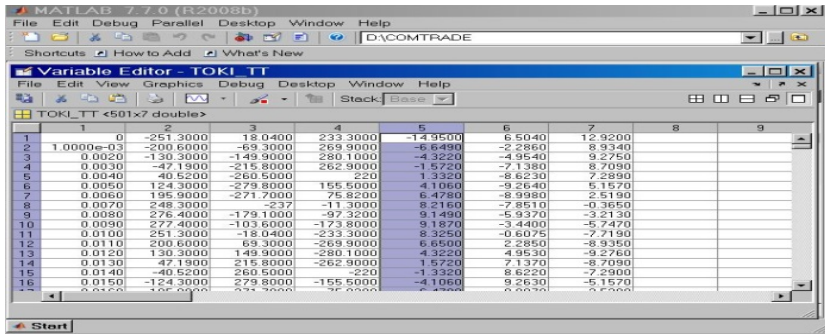


Рис. 2.32. Выделение столбца данных нужного графика тока

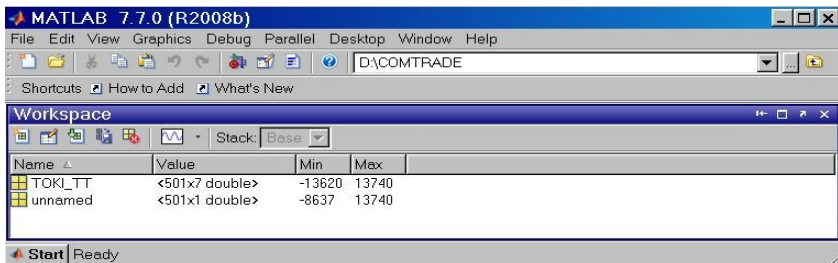


Рис. 2.33. Создание файла «unnamed» в области Workspasee

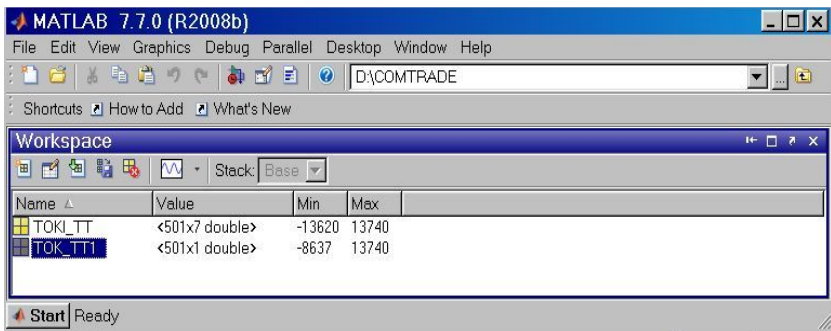


Рис. 2.34. Переименование файла «unnamed» в «TOK_TT1»

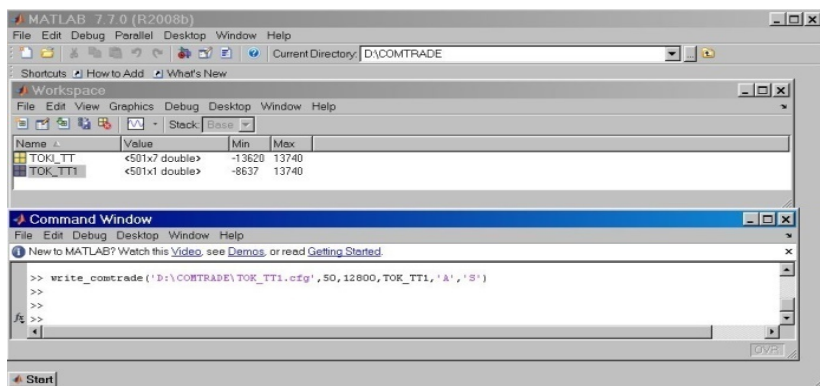


Рис. 2.35. Создание COMTRADE-файла результатов «TOK_TT1.cfg»

D:\COMTRADE\TTi2A.cfg – путь расположения создаваемого файла TOK_TT1.cfg;

50, 12800 – частота сигнала (тока) 50 Гц, частота дискретизации 12800 Гц при числе 256 точек на периоде сигнала с частотой 50 Гц ($50 \cdot 256 = 12800$);

TOK_TT1.cfg – имя создаваемого файла в формате COMTRADE;
 ‘A’ – признак токового сигнала (‘V’ – признак сигнала напряжения);
 ‘S’ – признак параметра вторичной обмотки (‘P’ – первичной).

Используемый файл-функция write_comtrade.m должен находиться в области Current Directory СДМ MATLAB, в которой и создается COMTRADE-файл результатов TOK_TT1.cfg и вспомогательный файл TOK_TT1.dat (рис. 2.36).



Рис. 2.36. Область CurrentDirectory СДМ MATLAB

Файл конфигурации имеет расширение *****.cfg и содержит информацию необходимую для правильного воспроизведения данных графика тока, хранящуюся в файле данных с расширением *****.dat.

Просмотр графика тока из COMTRADE-файла TOK_TT1.cfg может осуществляться с помощью специализированной программы TransPlay из комплекта программного обеспечения OMICRON Test Universe, обеспечивающей выбор, воспроизведение и просмотр подготовленных осциллограмм в формате COMTRADE (рис. 2.37).

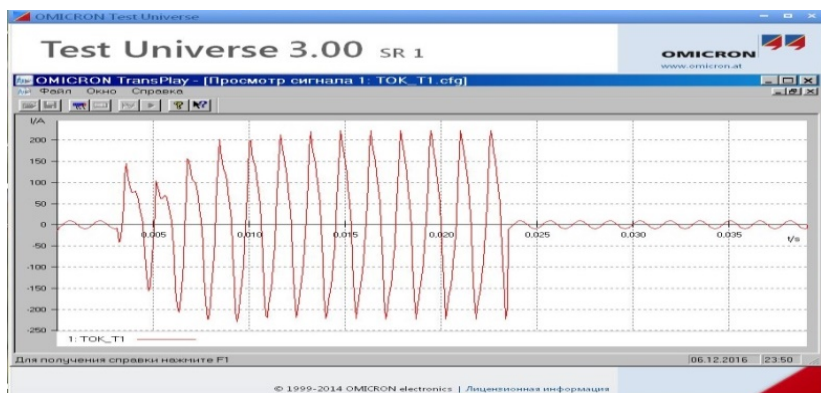


Рис. 2.37. График тока из COMTRADE-файла TOK_T1.cfg

2.5.2. Функциональные испытания токовой защиты в составе микропроцессорной защиты МР801

В качестве объекта испытания выбрана МТЗ мгновенного действия в составе отечественной микропроцессорной защиты МР801, разработанной и произведенной ОАО «Белэлектромонтажнадка» (ОАО «БЭМН»). МР801 является современным устройством, включающим в себя набор различных функций, в частности микропроцессорную токовую защиту. Данная МТЗ широко используется на электрических подстанциях Республики Беларусь для защиты электрооборудования.

ИПАК для проведения испытаний МТЗ в составе МР801 рассмотрен в главе 1 (см. рис. 1.7). Моделирование аварийных режимов ОЗО осуществлялось в КПК UKZLINE.

Подача тестовых воздействий в МТЗ осуществлялась в режиме разомкнутого контура с использованием предлагаемого ИПАК (см. рис. 1.7). Для этого, сигналы вторичного тока ТТ, полученные с помощью КПК UKZLINE, преобразовывались в формат COMTRADE и далее физически воспроизводились при помощи ИУ СМС 356. К аналоговым выходам СМС 356 были подключены аналоговые входы тока испытуемой МТЗ, выведенные на лицевую панель испытательного стенда (рис. 2.38). Испытательный стенд защиты МР801 выполнен ОАО «БЭМН» по заказу кафедры «Электрические станции» БНТУ. Все тестовые воздействия были сформированы при различных номинальных параметрах модели ТТ, что позволило получить характерные формы его вторичного тока при различных режимах функционирования ЭС, соответствующие как незначительной, так и глубокой степени насыщения ТТ.

Управление ИУ осуществлялось при помощи переносной компьютера с установленным на нем специализированным программным обеспечением TransPlay, обеспечивающим выбор и воспроизведение заранее подготовленных осциллограмм в формате COMTRADE.



Рис. 2.38. ИПАК для МР801

После подачи в МТЗ каждого тестового воздействия проводилось сохранение записей его аварийного регистратора в формате COMTRADE, в которых зафиксированы время срабатывания испытуемой защиты и форма подводимых тестовых воздействий (рис. 2.39). Анализ записей аварийного регистратора осуществлялся при помощи ПО Advanced TransView.

Проведенные эксперименты позволили выявить особенности срабатывания МТЗ в составе МР801, которые не проявлялись при синусоидальных формах тестовых воздействий. Так, при насыщении ТТ, вследствие наличия в токе повреждения экспоненциально затухающей апериио-

дической составляющей, вычисляемое цифровым фильтром в составе измерительного органа (ИО) тока МТЗ МР801 действующее значение полезного сигнала оказалось существенно заниженным по сравнению с его истинным значением.

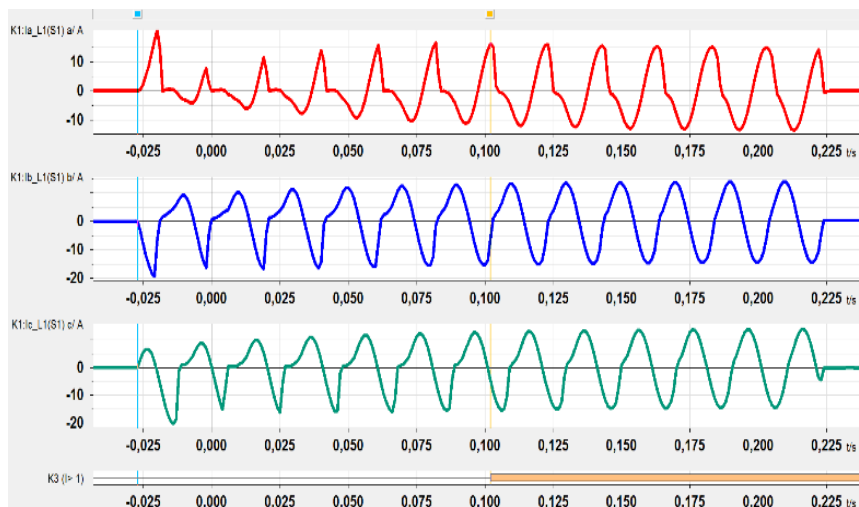


Рис. 2.39. Визуальная интерпретация файла аварийной осциллограммы МТЗ в составе МР801

Занижение величины действующего значения токового сигнала приводило к максимальному замедлению срабатывания МТЗ на время равное длительности 8 периодов промышленной частоты (0,16 с). Следует отметить, что указанная особенность характерна не только для МТЗ в составе МР801, но и для МТЗ в составе микропроцессорных защит других производителей. Повысить быстродействие и правильность функционирования МТЗ в указанных условиях можно, используя разработанный на кафедре «Электрические станции» ИО тока МТЗ, специально предназначенный для функционирования в условиях глубокого насыщения ТТ.

3. ИСПЫТАТЕЛЬНЫЕ ПРОГРАММНЫЕ КОМПЛЕКСЫ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ МОДЕЛЕЙ РЕЛЕЙНЫХ ЗАЩИТ

Основным достоинством ИПК является то, что они могут быть реализованы только с использованием компьютера и позволяют проводить испытания модели защиты на стадии проектирования и отработки ее функциональных возможностей методом вычислительного эксперимента.

Использование среды моделирования MATLAB-Simulink и пакета расширения SimPowerSystems является де-факто стандартом при моделировании режимов функционирования ОЭО и МТЗ [28, 37–40]. Дружественный интерфейс пользователя, простота создания модели ОЭО, широкие возможности визуализации результатов моделирования и их экспорта, возможность создания дополнительных пользовательских блоков моделей, отличает данную среду моделирования от иных программных комплексов предназначенных для моделирования ОЭО – PSCAD/EMTDC [41], EMTP-RV [42], ATP [43], функционирование которых основано на алгоритмах Г. Доммеля [44].

Все блоки моделей, входящие в библиотеку данного пакета расширения, проверены в лабораториях канадского производителя электроэнергии – компании Hydro-Québec, где подтверждена правильность их математического описания.

Особым преимуществом Simulink-SimPowerSystems является возможность сочетания различных подходов при моделировании. Например, первичную часть ОЭО (электрооборудование) можно реализовать с использованием блоков моделей SimPowerSystems, а вторичную – МТЗ с использованием блоков моделей Simulink, отражающих лишь алгоритм ее функционирования, а не ее электрическую схему.

Также достоинством блоков моделей SimPowerSystems является то, что в качестве исходных данных могут быть использованы номинальные значения параметров моделируемого электрооборудования, большинство из которых доступны в каталожных данных.

Исходя из вышеизложенного, целесообразно рекомендовать среду моделирования MATLAB-Simulink совместно с пакетом расширения SimPowerSystems для разработки и реализации КПК и ИПК с гибкой структурой.

3.1. Испытательный программный комплекс TransformerDIFF

ИПК Transformer DIFF «Модель цифровой дифференциальной защиты силового трансформатора» позволяет исследовать большинство характерных режимов функционирования цифровой дифференциальной токовой защиты (ДЗТ) силового трансформатора. ИПК может быть использован, как для анализа функционирования существующих цифровых устройств релейной защиты, так и для разработки и проверки алгоритмов функционирования новых устройств защиты на этапе внедрения их в производство.

Дифференциальная защита является защитой с абсолютной селективностью, действующая без выдержки времени и реагирующая только на повреждения в защищаемой зоне [36]. Принцип действия дифференциальной защиты основан на сравнении токов со всех сторон защищаемого объекта.

ИПК Transformer DIFF [27, 35] разработан в MATLAB-Simulink (версия R2011b) с использованием пакета расширения SPS. Структурная схема модели приведена на рис. 3.1.

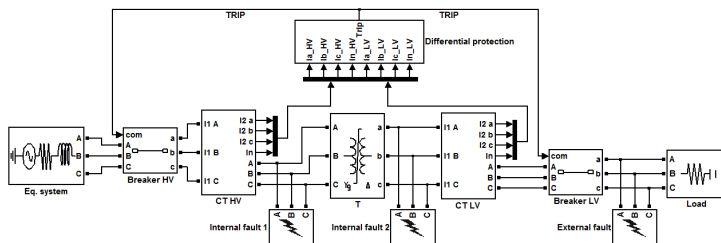


Рис. 3.1. Структура ИПК Transformer DIFF в MATLAB-Simulink

Схема модели включает в себя: источник питания (Eq system), трехфазный силовой трансформатор (Т), трехфазные группы трансформаторов тока со стороны ВН (CT HV) и НН (CT LV) силового трансформатора, цифровую дифференциальную защиту (Differential protection), трехфазные силовые выключатели со стороны ВН (Breaker HV) и НН (Breaker LV) силового трансформатора, нагрузку (Load), блоки создания трехфазного КЗ в зоне действия ДЗТ (Internal fault 1 и Internal fault 2) и блок создания трехфазного КЗ вне зоны действия ДЗТ (External fault).

Математические модели основных электроэнергетических объектов представляются библиотечными блоками пакета SPS. Дополнительно в ИПК реализованы отсутствующие в стандартной библиотеке SPS блоки, такие как трехфазная группа трансформаторов тока и микропроцессорная токовая дифференциальная защита (МПТДЗ).

3.1.1. Моделирование микропроцессорной токовой дифференциальной защиты силового трансформатора

На рис. 3.2 приведена блок-схема цифровой обработки контролируемых сигналов – сигналов вторичного тока со стороны ВН (HV) и НН (LV) защищаемого силового трехфазного трансформатора. Токи i_{a_HV} , i_{b_HV} , i_{c_HV} – вторичные токи трехфазной группы ТТ, расположенной со стороны ВН силового трансформатора; токи i_{a_LV} , i_{b_LV} , i_{c_LV} – вторичные токи трехфазной группы ТТ, расположенной со стороны НН силового трансформатора.

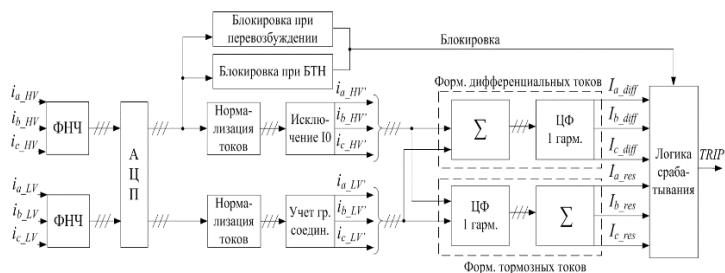


Рис. 3.2. Блок-схема цифровой обработки контролируемых сигналов МПТДЗ

Блок «Фильтр нижних частот» (ФНЧ) содержит активный фильтр нижних частот 2-го порядка. Назначение данного аналогового фильтра заключается в подавлении спектральных компонентов, частота которых превышает половину частоты дискретизации. Блок «Аналого-цифровой преобразователь» (АЦП) осуществляет преобразование выборок отсчетов выходного сигнала блока ФНЧ в цифровой код. Число выборок из аналогового непрерывного входного сигнала на период промышленной частоты (50 Гц) может быть принято равным 24. Частота дискретизации сигнала при этом составляет 1200 Гц.

В блоках «Блокировка при броске тока намагничивания» (Блокировка при БНТ) и «Блокировка при перевозбуждении» формируется сигнал блокировки срабатывания МПТДЗ при аномальных режимах функционирования защищаемого силового трансформатора.

Блок «Нормализация токов» осуществляет приведение вторичных токов, поступающих с выхода блока АЦП, к одному базису, т. е. перевод данных значений в о. е. Для этого токи с каждой стороны умножаются на нормирующие коэффициенты, которые для каждой стороны силового трансформатора рассчитываются следующим образом:

$$K_{HV} = \frac{\sqrt{3}U_{1\text{НОМ}}I_{1\text{НОМ}}}{S_{\text{НОМ}}I_{2\text{НОМ}}}, \quad (3.1)$$

$$K_{LV} = \frac{\sqrt{3}U_{2\text{НОМ}}I_{1\text{НОМ}}}{S_{\text{НОМ}}I_{2\text{НОМ}}},$$

где $I_{1\text{НОМ}}$ и $I_{2\text{НОМ}}$ – номинальный первичный и вторичный ток ТТ с соответствующей стороны силового трансформатора.

Блок «Исключение I_0 » реализует исключение тока нулевой последовательности из токов высшей стороны силового трансформатора (данная операция применяется только в случае заземления нейтрали силового трансформатора), для чего токи стороны ВН силового трансформатора должны быть умножены на матрицу коэффициентов M_1 [45]:

$$M_1 = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix}.$$

Блок «Учет группы соединений» осуществляет компенсацию фазового сдвига между токами стороны НН силового трансформатора и токами стороны ВН. Например, для моделируемого силового трансформатора со схемой соединения $Y/\Delta-11$ токи со стороны обмотки Δ опережают токи стороны обмотки Y на 30° . Для компенса-

ции указанного фазового сдвига, токи со стороны обмотки, соединенной в Δ , необходимо умножить на матрицу M_2 [45]:

$$M_2 = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix}.$$

Блок «Формирователь дифференциальных токов» (Форм. дифференциальных токов) осуществляет формирование дифференциальных (рабочих) токов для каждой фазы в соответствии с выражением [45]:

$$I_{\text{diff}} = |i_{\text{HV}'} + i_{\text{LV}'}|.$$

При этом за положительное направление тока принято направление «к защищаемому объекту».

В блоке «Формирователь тормозных токов» (Форм. тормозных токов) выполняется формирование тормозных токов для каждой фазы по принятому из [45] способу:

$$I_{\text{res}} = |i_{\text{HV}'}| + |i_{\text{LV}'}|.$$

Во всех вышеприведенных формулах оператор « $| \cdot |$ » соответствует операции вычисления действующего значения. Данная операция выполняется в блоке «Цифровой фильтр 1-й гармоники» (ЦФ 1 гарм.). В этом блоке реализован цифровой фильтр, предназначенный для определения действующего значения основной гармоники сигнала, содержащего высшие гармоники и апериодическую составляющую. В качестве такого фильтра применен цифровой фильтр, реализующий однопериодное дискретное преобразование Фурье, в котором по отсчетам косинусной $I^C(n)$ и синусной $I^S(n)$ ортогональных составляющих входного сигнала определяется действующее значение основной гармоники сигнала $I(n)$ [46, 47]:

$$I^C(n) = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} i(n) \cos(2\pi n / N);$$

$$I^S(n) = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} i(n) \sin(2\pi n / N);$$

$$I(n) = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(I^C(n))^2 + (I^S(n))^2},$$

где $n = 0 \dots N - 1$ – номер отсчета контролируемого сигнала в окне наблюдения;

$i(n)$ – отсчеты входного сигнала;

N – число отсчетов на период промышленной частоты.

На выходе блоков для каждой фазы формируются соответственно дифференциальные I_{a_diff} , I_{b_diff} , I_{c_diff} и тормозные I_{a_res} , I_{b_res} , I_{c_res} токи. Данные токи поступают в блок «Логика срабатывания», где формируется команда на срабатывание или несрабатывание защиты, исходя из заданной характеристики МПТДЗ (рис. 3.3) с учетом наличия или отсутствия сигнала блокировки.

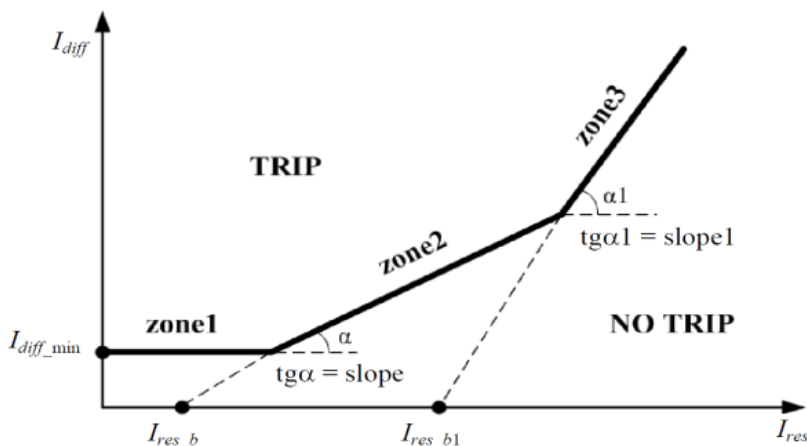


Рис. 3.3. Представление характеристики МПТДЗ

Цифровая обработка контролируемых сигналов в реальных МПТДЗ трансформаторов различных производителей в целом соответствует рассмотренной блок-схеме. Отличие может заключаться в способе формирования тормозного тока и типах используемых ЦФ. Кроме того, в некоторых МПТДЗ блокировка срабатывания при аномальных режимах работы защищаемого трансформатора осуществляется на основе анализа дифференциальных токов, а не токов, протекающих со стороны ВН. В представленной модели также не рассматривается функционирование дифференциальной токовой отсечки.

Работу дифференциальной защиты с торможением удобно анализировать с помощью диаграммы, ось абсцисс которой соответствует току торможения I_{res} , а ось ординат – дифференциальному току I_{diff} .

Характеристика дифференциальной защиты трансформатора с торможением представляет собой три участка (зоны) с разными углами наклона к оси абсцисс. Область диаграммы, расположенная выше ломаной кривой, образованной тремя отрезками, соответствует наличию внутреннего повреждения (TRIP); область, расположенная ниже данной кривой, соответствует отсутствию повреждения в зоне (NO TRIP). Как только траектория рабочей точки, определяемая мгновенными координатами (I_{res} , I_{diff}), которые рассчитываются в блоках формирования рабочих и тормозных токов, перемещается из области NO TRIP в область TRIP, дифференциальная защита фиксирует повреждение в защищаемой зоне. Условие фиксации повреждения для каждой фазы можно описать следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} I_{diff} > I_{diff_min}; \\ I_{diff} > slope \cdot (I_{res} - I_{res_b}); \\ I_{diff} > slope1 \cdot (I_{res} - I_{res_b1}), \end{cases}$$

где I_{diff_min} – минимальный порог срабатывания дифференциальной защиты;

$slope$, $slope1$ – наклон второго и третьего участка характеристики цифровой ДЗТ соответственно;

$I_{\text{res_b}}$, $I_{\text{res_bl}}$ – координаты точки пересечения оси абсцисс со вторым и третьим наклонным участком.

3.1.2. Исследование работы микропроцессорной токовой дифференциальной защиты трансформатора

Следует отметить, что все приведенные далее осциллограммы, диаграммы и выражения относятся к фазе A ; время возникновения повреждения $t = 0$ с; рассматриваемый аварийный режим – трехфазное КЗ с экспоненциально затухающей аperiodической составляющей (ЭЗАС). Питание трансформатора осуществляется только со стороны ВН. Для возможности получения осциллограмм дифференциального и тормозного токов, а также траектории перемещения рабочей точки на протяжении всего времени моделирования, действие МПТДЗ на отключение силовых выключателей со сторон ВН и НН выведено. Будем считать, что команда на отключение выключателей начинает формироваться логикой защиты в момент пересечения рабочей точкой ломанной кривой, разделяющей области NO TRIP и TRIP, с учетом наличия или отсутствия сигнала блокировки.

Внутренне повреждение силового трансформатора при отсутствии насыщения ТТ

Режим работы модели (см. рис. 3.1) для рассматриваемого случая (внутреннее КЗ-1): выключатели сторон ВН (Breaker HV) и НН (Breaker LV) включены, повреждение задается блоком создания трехфазного КЗ в зоне действия ДЗТ (Internal fault 1).

При внутреннем повреждении, вследствие отсутствия подпитки места повреждения со стороны НН ($i_{LV}=0$), токи протекают только со стороны ВН. Поэтому величины I_{diff} и I_{res} имеют одинаковые значения (рис. 3.4, б). Мгновенные координаты рабочей точки равны между собой:

$$I_{\text{diff}} = |i_{\text{HV}} + 0| = I_{\text{res}} = |i_{\text{HV}} + 0|.$$

Траекторией ее перемещения является переходящая из области NO TRIP в область TRIP наклонная линия, изображенная на рис. 3.4, а. Это свидетельствует о том, что модель МПТДЗ правиль-

но отработала в рассматриваемом режиме, т. е. сформировала команду на отключение силовых выключателей ВН и НН.

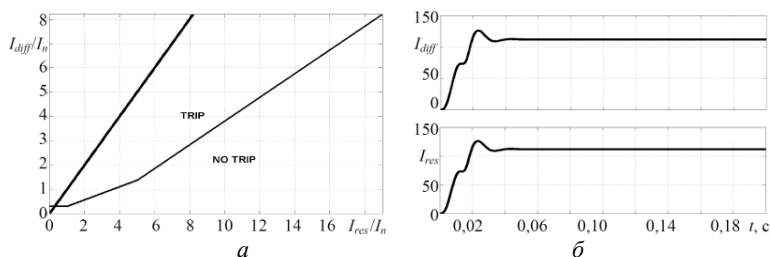


Рис. 3.4. Результаты работы модели МПТДЗ при внутреннем повреждении: *a* – траектория перемещения рабочей точки; *б* – графики токов I_{diff} и I_{res}

Внешнее повреждение со стороны НН силового трансформатора при отсутствии насыщения ТТ

Режим работы модели (см. рис. 3.1) для рассматриваемого случая: выключатели сторон ВН (Breaker HV) и НН (Breaker LV) включены, повреждение задается блоком создания трехфазного КЗ вне зоны действия ДЗТ (External fault).

При данном виде повреждения токи со сторон ВН и НН равны между собой, но имеют разное направление протекания по отношению к защищаемому трансформатору: i_{HV} протекает «к защищаемому объекту», что принято за положительное направление, а i_{LV} протекает «от защищаемого объекта», что принято за отрицательное направление. Поэтому дифференциальный ток (рис. 3.5, б)

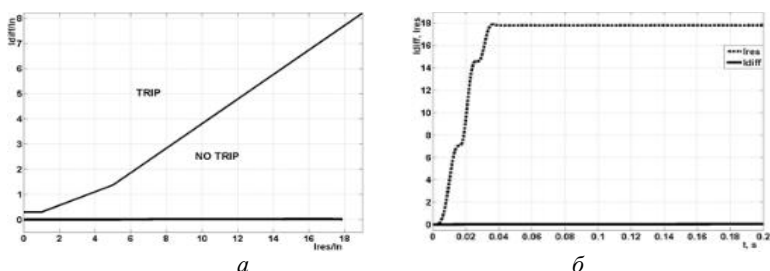


Рис. 3.5. Результаты работы модели МПТДЗ при внешнем повреждении без насыщения ТТ:

a – траектория перемещения рабочей точки; *б* – графики токов I_{diff} и I_{res}

$$I_{\text{diff}} = |i_{\text{HV}} - i_{\text{LV}}| = 0.$$

Ложный дифференциальный ток, появляющийся вследствие изменения положения отпаек РПН и при протекании намагничивающего тока трансформатора на осциллограммах и диаграммах не показан. Траектория перемещения точки с мгновенными координатами $(I_{\text{res}}, I_{\text{diff}})$, приведенная на рис. 3.5, *a*, представляет собой параллельную оси абсцисс линию. Как и ожидалось, срабатывания ДЗТ в данном режиме не произошло, т.е. команда на отключение силовых выключателей не была сформирована.

Внешнее повреждение со стороны НН силового трансформатора, сопровождающееся насыщением ТТ

Для исключения ложной работы ДЗТ при насыщении ТТ уставка срабатывания увеличивается пропорционально протекающему сквозному току, что позволяет иметь высокую чувствительность при повреждениях, сопровождающихся небольшими токами, а также позволяет исключать излишнее срабатывание при внешнем повреждении, из-за насыщения ТТ. Вышесказанное справедливо при правильном выборе ТТ и правильно заданной характеристике ДЗТ.

Режим работы модели (рис. 3.1) для рассматриваемого случая: выключатели сторон ВН (BreakerHV) и НН (BreakerLV) включены, повреждение задается блоком создания трехфазного КЗ вне зоны действия ДЗТ (Externalfault). В этом случае произошло излишнее срабатывание ДЗТ при внешнем КЗ. Причиной срабатывания является дифференциальный ток (рис. 3.6, *б*), появившийся вследствие насыщения ТТ со стороны НН силового трансформатора. Насыщение ТТ приводит к неполной трансформации первичного тока во вторичные цепи ТТ, что и дает нарушение равенства токов со сторон ВН и НН, т. е. дифференциальный ток

$$I_{\text{diff}} = |i_{\text{HV}} - i_{\text{LV}}| \neq 0.$$

В данном режиме значение I_{diff} в первый момент времени практически равно нулю, и рабочая точка перемещается вправо по оси абсцисс. Однако по мере насыщения ТТ происходит перемещение

рабочей точки в область срабатывания, при этом ее траектория имеет характерную петлевидную форму, что отображено на рис. 3.6, а.

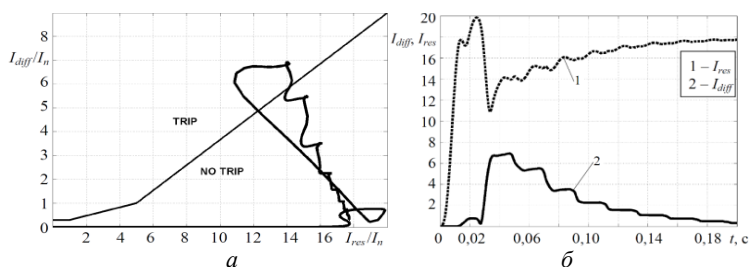


Рис. 3.6. Результаты работы модели МПТДЗ при внешнем повреждении с насыщением ТТ:
 а – траектория перемещения рабочей точки; б – графики токов I_{diff} и I_{res}

Избежать ложного срабатывания в данном случае можно следующими способами:

- 1) использовать ТТ с большей номинальной кратностью и (или) большей номинальной мощностью;
- 2) увеличить угол наклона третьего участка характеристики цифровой ДЗТ;
- 3) использовать специальные алгоритмы распознавания режима насыщения измерительных ТТ, которые блокируют работу цифровой ДЗТ или автоматически увеличивают наклон третьего участка характеристики до момента выхода ТТ из режима насыщения [48].

Режим перевозбуждения силового трансформатора

Режим перевозбуждения силового трансформатора возникает при повышенном уровне напряжения питания (относительно номинального) или при сниженном уровне его частоты (по отношению к номинальной), или при сочетании двух данных факторов. Данный режим сопровождается увеличением температуры конструктивных частей трансформатора, повышенным уровнем шума и вибрации.

Условие возникновения перевозбуждения трансформатора со стороны ВН может быть описано выражением [49]:

$$\frac{U}{f} > \left(\frac{U_{1\text{ ном}}}{f_{\text{ном}}} \right) K,$$

где U – текущее напряжение питания обмотки ВН трансформатора;
 f – частота текущего напряжения питания обмотки ВН;

K – значение в относительных единицах магнитного потока в точке излома характеристики намагничивания.

Выполнение данного условия приводит к повышению магнитного потока до значений, вызывающих насыщение стального магнитопровода трансформатора, что, в свою очередь, обуславливает резкое увеличение тока намагничивания, воспринимаемого ДЗТ в качестве дифференциального (рабочего) тока. Указанное обстоятельство может привести к ложному срабатыванию защиты, так как перевозбуждение трансформатора в течение определенного времени не является аварийным режимом. Работа ДЗТ при возникновении данного режима должна быть заблокирована, а отключение трансформатора должно происходить от специальной защиты с зависимой от U/f выдержкой времени.

Рассмотрим случай повышенного напряжения питания при номинальной частоте. Режим работы модели (см. рис. 3.1) для рассматриваемого случая: выключатель стороны ВН (Breaker HV) включен, а выключатель стороны НН (Breaker LV) отключен. Для характеристики намагничивания моделируемого трехфазного трансформатора, заданной в соответствии с [50], резкое увеличение тока намагничивания будет происходить при превышении напряжением питания значения $1,15U_{\text{ном}}$, при котором $K = 1,15$. График вторичного тока фазы A трехфазной группы ТТ на стороне ВН при питании обмотки ВН силового трансформатора трехфазным напряжением величиной $1,35U_{\text{ном}}$ представлен на рис. 3.7.

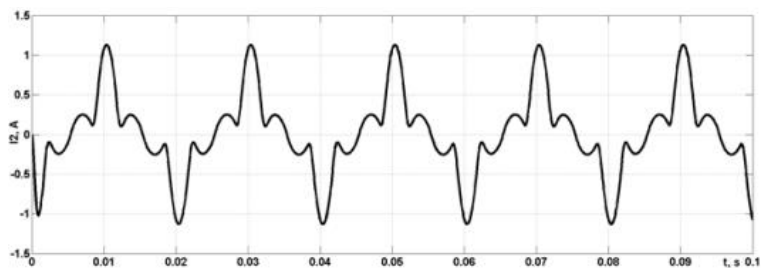


Рис. 3.7. График вторичного тока фазы A трехфазной группы ТТ на стороне ВН при перевозбуждении силового трансформатора

Режим перевозбуждения не сопровождается насыщением ТТ, так как протекающий через них ток имеет малую амплитуду и не содержит аperiodической составляющей. Поэтому ТТ не вносят дополнительных гармонических составляющих во вторичный ток.

Гармонический состав вторичного тока ТТ имеет ярко выраженное процентное содержание нечетных гармоник по отношению к основной. Как видно из табл. 3.1, доминирующими являются 3-, 5- и 7-я гармоники. В зависимости от схемы соединения обмотки силового трансформатора в протекающем со стороны подачи напряжения токе может отсутствовать 3-я гармоника [51].

Таблица 3.1

Гармонический состав вторичного тока фазы А трехфазной группы ТТ на стороне ВН при перевозбуждении трехфазного силового трансформатора

Номер гармоники	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Содержание, %	100	0,26	35,33	0,17	42,09	0,18	11,54	0,22	2,2

Повышенное содержание 5-й гармоники является наиболее достоверным показателем возникновения режима перевозбуждения. Поэтому блокирование работы ДЗТ при перевозбуждении силового трансформатора в цифровых устройствах защиты основано на сравнении процентного содержания 5-й гармоники с заданной уставкой. Изменение процентного содержания пятой гармоники (I_5 / I_{1ratio} , %) во времени приведена на рис. 3.8.

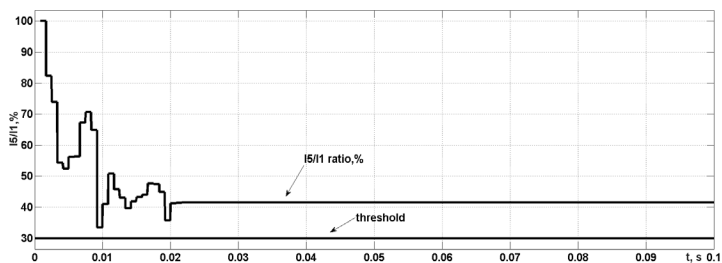


Рис. 3.8. Изменение содержания 5-й гармоники во вторичном токе фазы А трехфазной группы ТТ на стороне ВН при перевозбуждении силового трансформатора

После выделения цифровыми фильтрами за время одного периода промышленной частоты процентного содержания 5-й гармоники, устанавливается ее истинное значение, которое превышает заданную уставку (threshold), что приводит к блокированию ДЗТ.

Бросок тока намагничивания

Данный режим, как и режим перевозбуждения, связан с резким возрастанием тока намагничивания силового трансформатора вследствие насыщения его магнитопровода. Причины возникновения броска тока намагничивания (БТН) в основном следующие: включение ненагруженного трансформатора под напряжение, восстановление напряжения после ликвидации внешнего КЗ, включение параллельно работающего трансформатора.

Рассмотрим режим включения ненагруженного трансформатора под напряжение со стороны ВН: выключатель стороны НН (Breaker LV) отключен, выключатель стороны ВН (Breaker HV) включается в момент подачи напряжения (рис. 3.1). В данном случае происходит скачкообразное изменение напряжения на зажимах силового трансформатора, что вызывает переходный процесс установления номинального магнитного потока. Результирующий магнитный поток будет определяться суммой двух составляющих: установившейся и апериодической, затухающей с определенной постоянной времени. До момента затухания апериодической составляющей (установление номинального магнитного потока) значение результирующего магнитного потока может превосходить его номинальное значение. Этим и обусловлено резкое возрастание тока намагничивания в данном режиме.

Максимальная величина БТН может превышать номинальный ток трансформатора в 5–10 раз [52]. БТН зависит от многих факторов: мощности трансформатора, постоянной времени питающей системы, фазы включения, остаточной намагниченности магнитопровода трансформатора, наклона характеристики намагничивания в области насыщения. Графики первичного (сплошная линия) и приведенного вторичного (штриховая линия) тока фазы *A* трехфазной группы ТТ на стороне ВН при трехфазном БТН представлены на рис. 3.9. В отличие от режима перевозбуждения БТН в каждой из фаз будет различен из-за отличия фаз напряжения в момент

включения и, как следствие, разного значения аperiodической составляющей возникающего магнитного потока.

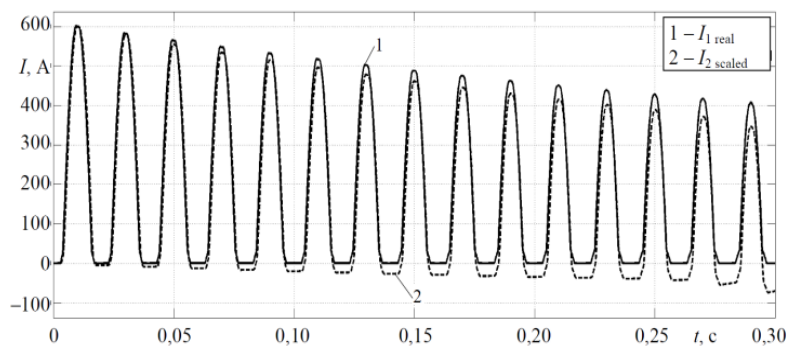


Рис. 3.9. Графики первичного тока (сплошная линия) и приведенного вторичного тока (штриховая линия) фазы *A* трехфазной группы ТТ на стороне ВН при трехфазном БТН

Для рассматриваемого на рис. 3.9 режима в связи с наличием длительно затухающей аperiodической составляющей характерно насыщение ТТ, что и является причиной искажения трансформируемого первичного тока. Данный факт обуславливает некоторое различие в гармоническом составе первичного и вторичного токов ТТ.

В режиме с БТН, как и при перевозбуждении, ДЗТ воспринимает возникающий ток намагничивания, как ток внутреннего КЗ, так как бросок тока возникает только со стороны питания. Однако отключения трансформатора в данном режиме происходить не должно.

Гармонический состав 1-го периода представленного на рис. 3.9 вторичного тока фазы *A* трехфазной группы ТТ на стороне ВН приведен в табл. 3.2. Как видно из табл. 3.2, преобладающими по отношению к основной являются 2-я и 3-я гармоники. Процентное содержание 2-й гармоники доминирует по отношению ко всем остальным высшим гармоникам, содержащимся во вторичном токе. Учитывая, что в зависимости от схемы соединения обмотки силового трансформатора со стороны питания 3-я гармоника может отсутствовать [51], то именно повышенное содержание 2-й гармоники является наиболее достоверным показателем режима с БТН.

Таблица 3.2

Гармонический состав 1-го периода вторичного тока фазы *A* трехфазной группы ТТ на стороне ВН при БТН

Номер гармоники	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Содержание, %	100	20,2	10,7	1,74	2,6	1,28	1,2	0,6	0,02

Блокировка ДЗТ в режиме с БТН силового трансформатора в микропроцессорных защитах основано на сравнении процентного содержания 2-й гармоники с заданной уставкой. Изменения процентного содержания 2-й гармоники (I_2 / I_{1ratio} , %) представленного на рис. 3.9 вторичного тока фазы *A* трехфазной группы ТТ на стороне ВН при трехфазном БТН приведена на рис. 3.10. Вычисляемое процентное содержание превышает заданную уставку (Threshold), что приводит к блокированию ДЗТ в режиме с БТН. Следует отметить, что по мере затухания БТН процентное содержание 2-й гармоники увеличивается.

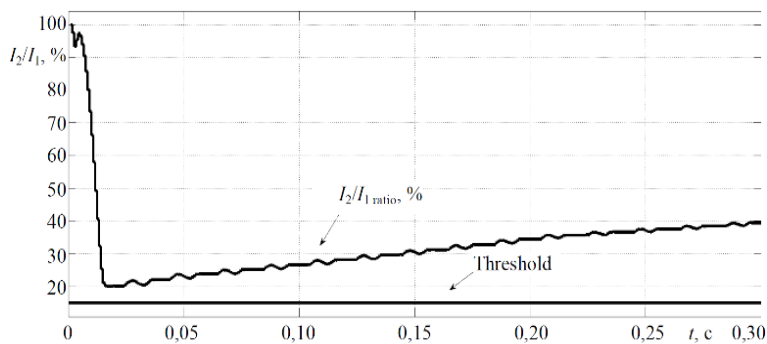


Рис. 3.10. Изменение содержания 2-й гармоники во вторичном токе фазы *A* трехфазной группы ТТ на стороне ВН при БТН

Недостатки алгоритмов блокировки, основанных на гармоническом анализе

Наличие высших гармоник в токах не всегда свидетельствует о возникновении режима перевозбуждения или с БТН. Так, при КЗ,

сопровождающихся насыщением ТТ, в их вторичном токе появляются высшие гармоники (нечетные – при токе КЗ без апериодической составляющей, четные и нечетные – при ее наличии). Поэтому алгоритмы блокировки, основанные на гармоническом анализе тока, могут вызывать замедление срабатывания ДЗТ при внутренних КЗ. График вторичного тока фазы *A* трехфазной группы ТТ на стороне ВН защищаемого трансформатора при их насыщении вследствие протекания тока КЗ с апериодической составляющей при внутреннем КЗ приведен на рис. 3.11.

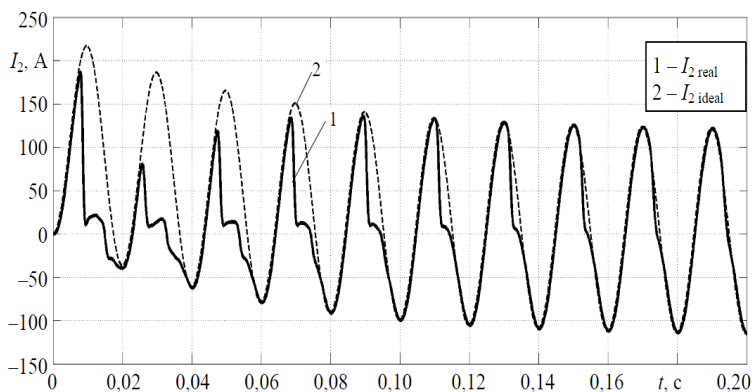


Рис. 3.11. Графики токов фазы *A* трехфазной группы ТТ на стороне ВН при их насыщении вследствие протекания тока КЗ с апериодической составляющей:
1 – вторичного тока ТТ; 2 – приведенного ко вторичной стороне первичного тока ТТ

Режим работы модели (см. рис. 3.1) для рассматриваемого случая: выключатели сторон ВН (Breaker HV) и НН (Breaker LV) включены, повреждение задается блоком создания трехфазного КЗ в зоне действия ДЗТ (Internal fault 1).

Изменение процентного содержания 2-й гармоники во вторичном токе фазы *A* трехфазной группы ТТ на стороне ВН в рассматриваемом случае (рис. 3.11) приведено на рис. 3.12. Данный режим сопровождается ложным блокированием цифровой ДЗТ рассмотренным алгоритмом определения режима БТН. Время блокирования составляет около 0,155 с, или 7,75 периодов промышленной частоты.

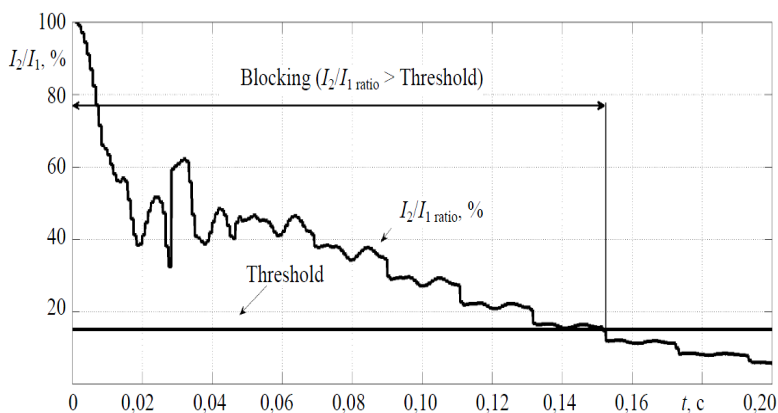


Рис. 3.12. Ложное блокирование работы ДЗТ при внутреннем КЗ, сопровождающимся насыщением ТТ, алгоритмом определения режима БТН

Для повышения надежности срабатывания МПТДЗ следует использовать дополнительные способы идентификации аномальных режимов силового трансформатора. Для режима с БТН могут быть использованы: метод оценки отношения тока 2-й гармоники прямой последовательности к току основной гармоники обратной последовательности [53]; метод оценки разности фаз между токами основной и 2-й гармоник [54] или метод идентификации режима по форме тока [55]. Перечисленные методы в сочетании с традиционным способом блокировки по гармоническому составу позволят повысить быстродействие защиты при внутренних повреждениях, сопровождающихся насыщением ТТ.

3.2. Испытательный программный комплекс для исследования цифровых фильтров

ИПК Digital Filter позволяет исследовать работоспособность различных типов ЦФ, используемых в измерительных органах цифровых токовых защит электроустановок. Назначение ЦФ заключается в выделении полезного сигнала (обычно это основная гармоника, реже – высшая, кратная основной) и в максимально возможном подавлении помехи.

Комплекс разработан в среде MATLAB (версия R2011b). Модель фрагмента электрической сети и основных элементов измерительного органа тока цифровой защиты реализованы с использованием библиотечных блоков пакета расширения Simulink-SimPower-Systems (рис. 3.13).

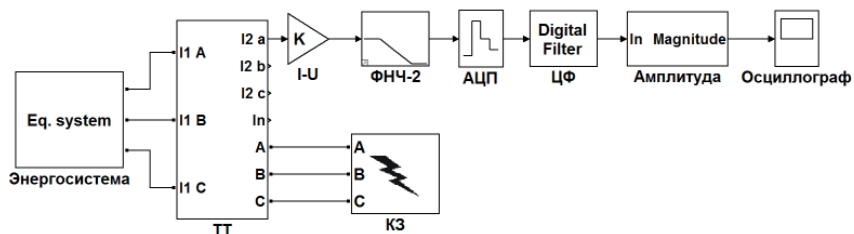


Рис. 3.13. Структура ИПК Digital Filter

Структура ИПК включает в себя следующие элементы:

1. Энергосистема, в которой задаются: номинальное напряжение $U_{\text{ном}}$, ток трехфазного КЗ $I_{\text{кз}}$ и эквивалентная постоянная времени энергосистемы τ .

2. Трехфазная группа трансформаторов тока (блок ТТ).

3. Блок КЗ используется для моделирования времени наступления и вида КЗ.

4. Входной преобразователь ($I \rightarrow U$), который обеспечивает преобразование входного вторичного тока ТТ в пропорциональное напряжение заданного уровня.

5. Антиализинговый ФНЧ второго порядка (ФНЧ-2).

6. АЦП с квантованием по времени $T = 0,02 / N$, равным периоду дискретизации сигнала.

7. ЦФ, в котором осуществляется определение основной гармоники сигнала. Параметры блока – предварительно рассчитанные коэффициенты фильтров.

8. Блок определения амплитуды (Амплитуда) основной гармоники.

В блоке ЦФ формируются различные алгоритмы построения фильтра: ЦФ на основе метода наименьших квадратов (МНК), на основе дискретного преобразования Фурье (ДПФ), формирователи ортогональных составляющих (ФОС).

Принципы построения и математические модели ЦФ будут подробно рассмотрены в п. 4.3.

Переходные процессы в фильтрах МНК, косинусном фильтре (КФ) и ФОС представлены на рис. 3.14. ЦФ на основе МНК имеет наихудшие показатели качества и не может быть рекомендован к использованию в цифровых устройствах РЗ. Наиболее достоверно амплитуда основной гармоники вторичного тока ТТ определяется КФ.

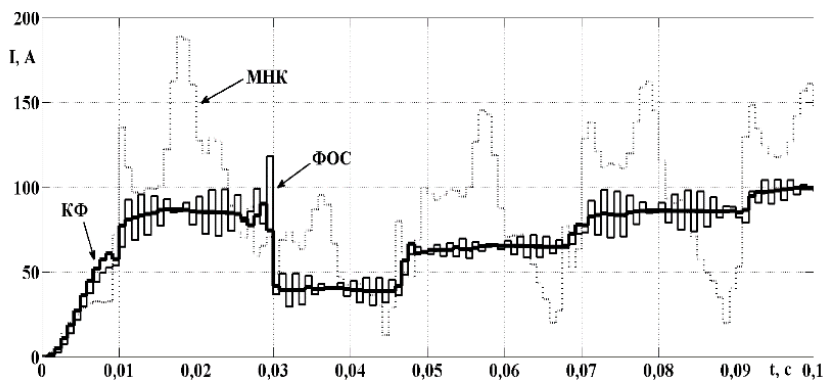


Рис. 3.14. Переходный процесс в цифровых фильтрах

3.3. Испытательный программный комплекс для исследования токовых защит асинхронного двигателя

ИПК Режимы АД предназначен для исследования функций цифровой токовой защиты двигателей в системе электропитания собственных нужд электростанции (см. рис. 1.13).

Комплекс разработан в среде MATLAB (версия R2011b). Модель фрагмента системы электропитания и основных элементов измерительного органа тока цифровой защиты реализованы с использованием библиотечных блоков пакета расширения Simulink-SimPowerSystems.

ИПК состоит из: модели энергосистемы (S), модели трехфазной группы ТТ (СТ), позволяющей получать вторичные токи ТТ с учетом насыщения их магнитопроводов, блока токовой защиты двигателя (OC Relay), модели асинхронного двигателя (Asynchronous

Machine SI Units) и блока задания вида коротких замыканий (КЗ) на питающих шинах двигателя (Three Phase Fault).

В системе электропитания двигателей могут возникать различные аварийные режимы: замыкания на землю одной фазы питающей системы, витковые замыкания в обмотках статора двигателя, а также симметричные и несимметричные многофазные замыкания. Испытательный комплекс позволяет исследовать поведение МТЗ АД от междуфазных КЗ и при обрыве питающих фаз. Для защиты двигателя от рассматриваемых видов повреждений применяется максимальная токовая защита мгновенного действия (токовая отсечка), которая отстраивается от пусковых токов и токов самозапуска электродвигателя.

Работа токовой защиты мгновенного действия

Проверка работоспособности модели МТЗ АД осуществляется с использованием сигнала, приближенного к реальным вторичным токам ТТ, включенных в фазы питающей системы, по которым протекают токи статорной обмотки АД. Вторичный ток ТТ (кривая 1 на рис. 3.15) является входным сигналом блока OS Relay (см. рис. 1.13).

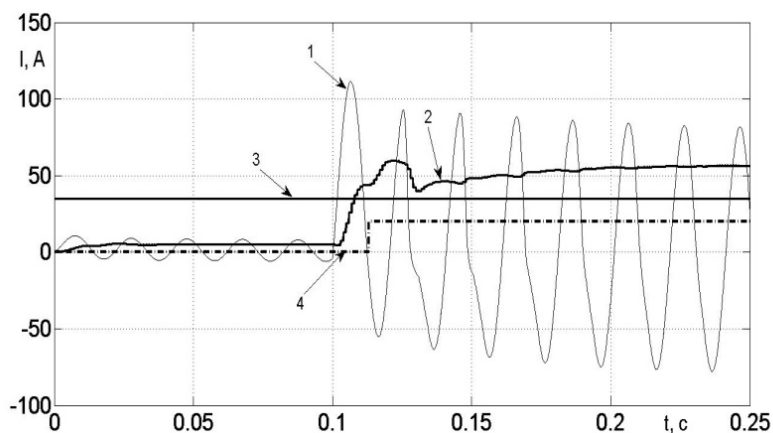


Рис. 3.15. Работа токовой защиты мгновенного действия

Время установления действующего значения входного сигнала, которое формируется на выходе ЦФ (кривая 2 на рис. 3.15) может

составлять в случае искаженного сигнала вторичного тока ТТ – несколько периодов промышленной частоты (зависит от времени затухания апериодической составляющей сигнала). Срабатывание защиты (кривая 4) происходит при условии превышения сигналом 2 уставки срабатывания (кривая 3), через время, установленное параметром успешных отсчетов, превышающих уставку срабатывания.

Результаты расчетов, представленные на рис. 3.15, получены при следующих исходных данных: $t = 0-0,1$ с – пуск двигателя и выход его на установившийся режим работы; $t = 0,1$ с – двухфазное КЗ (между фазами *A* и *B*); $t = 0,12$ с – отключение КЗ мгновенной токовой отсечкой при уставке срабатывания $t_y = 35$ А.

Изменения токов обмоток статора АД для указанного режима представлены на рис. 3.16. В момент времени $t = 0,12$ с выходной сигнал trip с выхода блока защиты OS Relay (см. рис. 1.13) подается на вход com блока трехфазного выключателя Three-Phase Breaker, который под воздействием этого сигнала отключает АД от питающей системы. Токи всех трех фаз обмотки статора снижаются до нуля.

Работа токовой защиты с выдержкой времени

На рис. 3.17 представлены результаты моделирования работы максимальной токовой защиты АД при двухфазном КЗ между фазами *A* и *B* и указанных выше исходных данных, но срабатывающей с выдержкой времени $\Delta t = 0,2$ с.

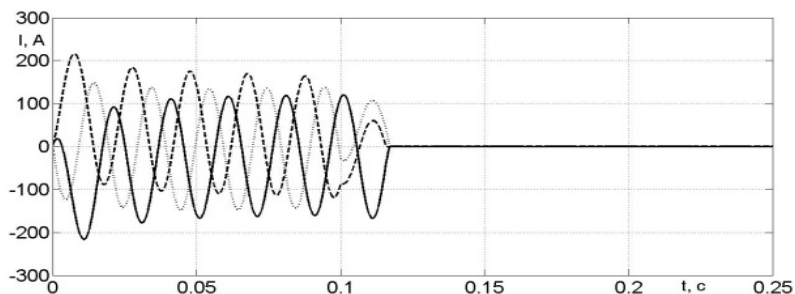


Рис. 3.16. Графики токов фаз статорной обмотки АД

Как видно из рис. 3.17, срабатывание измерительного органа защиты, также как и в предыдущем случае (рис. 3.15), наступает в момент времени $t = 0,12$ с, однако непосредственное отключение АД

происходит в момент $t = 0,32$ с, т. е. после обрабатывания защитой указанной выдержки времени. Реакция токов статора для рассмотренного случая приведена на рис. 3.18.

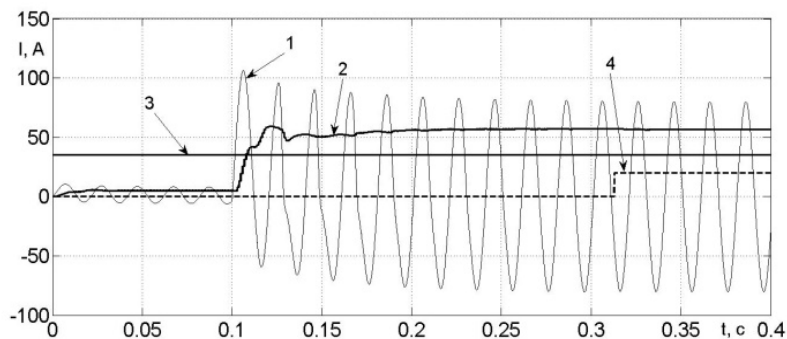


Рис. 3.17. Работа токовой защиты с выдержкой времени

На рис. 3.19–3.21 соответственно приведены графики угловой частоты вращения ротора, электромагнитного момента и токов ротора АД.

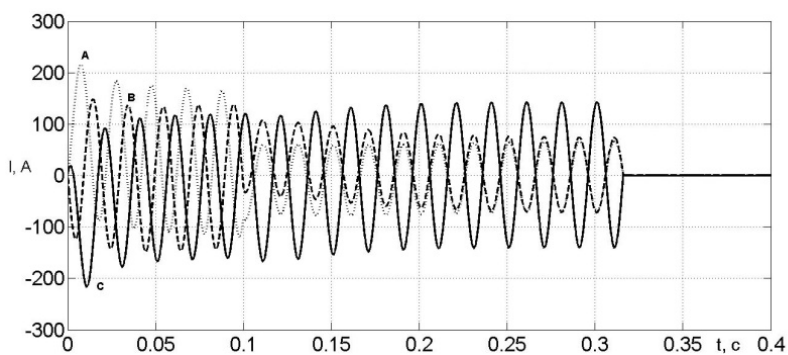


Рис. 3.18. Графики токов фаз статорной обмотки двигателя при его отключении с выдержкой времени

Указанные параметры получены с использованием блока изменения переменных (`mis_abc`) АД (Machines Measurement Demux) (см рис. 1.13). Блок `mis_abc` предназначен для извлечения перемен-

ных состояния из вектора измеряемых переменных электрической машины (АД). Блок работает совместно с моделями синхронных и асинхронных машин. Окно задания параметров этого блока приведено на рис. 3.22. Для извлечения требуемой переменной из вектора измеряемых переменных необходимо отметить ее флажком.

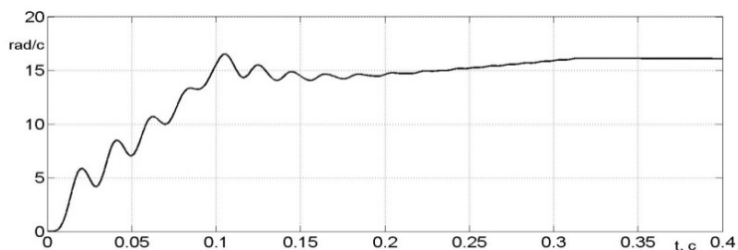


Рис. 3.19. График угловой частоты вращения ротора АД

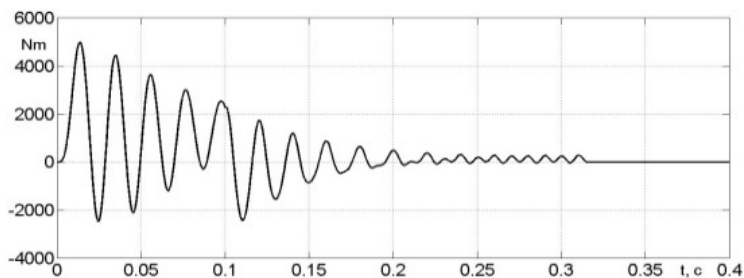


Рис. 3.20. Графики электромагнитного момента АД

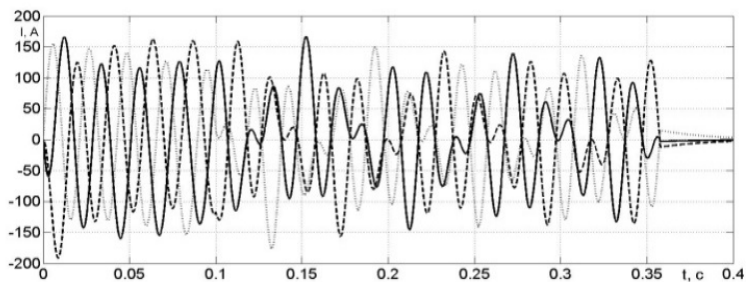


Рис. 3.21. Графики токов ротора АД

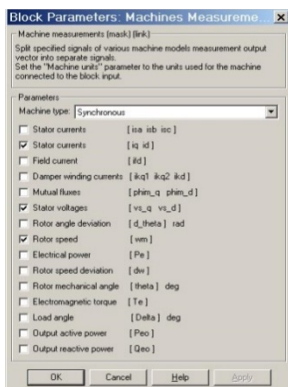


Рис. 3.22. Окно задания параметров блока *Machines Measurement Demux*

4. РАЗРАБОТКА И РЕАЛИЗАЦИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ПРОГРАММНЫХ КОМПЛЕКСОВ С ГИБКОЙ СТРУКТУРОЙ

4.1. Расчет параметров библиотечных блоков моделей пакета SimPowerSystems

Модели большинства электроэнергетического оборудования рассмотренных в данной работе ИПК представляются библиотечными блоками моделей пакета расширения SimPowerSystems [38]. Задание параметров этих блоков таких как напряжение, частота, активная и реактивная мощности и т. п., обычно не вызывает затруднений. Практически в каждом библиотечном блоке модели имеется несколько основных параметров, для получения значения которых требуется произвести дополнительные расчеты.

Питающая система представляется стандартным блоком модели трехфазного источника напряжения «Three-Phase Source». К основным параметрам, требующим дополнительного расчета их значений, относятся: собственное сопротивление источника R_s , Ом, и собственная индуктивность источника L_s , Гн. Значение индуктивности питающей системы L_s может быть определено по заданному току короткого замыкания $I_k^{(3)}$ на шинах ОЭО напряжением $U_{ном}$, на котором производятся испытания.

$$L_c = \frac{U_{ном}}{\sqrt{3}I_k^{(3)}\omega}, \quad (4.1)$$

где ω – номинальная угловая частота.

Значение активного сопротивления R_s может быть определено исходя из значения постоянной времени ЭЗАС тока повреждения (например, при времени $\tau = 0,05$ с сопротивление $R_s \cong 20 L_s$).

Линия электропередачи представляется стандартным блоком модели трехфазной последовательной RLC -цепи «Three-Phase Series RLC Branch».

Защищаемая линия характеризуется длиной $L_{л}$, удельными активным $R_{уд}$ и реактивным $X_{уд}$ сопротивлениями:

4. Разработка и реализация элементов программных комплексов с гибкой структурой

$$R_{л} = R_{уд} L_{л}, \quad (4.2)$$

$$X_{л} = X_{уд} L_{л}. \quad (4.3)$$

Нагрузка представляется стандартным блоком модели трехфазной последовательной *RLC*-нагрузки «Three-Phase Series RLC Load».

Асинхронная электрическая машина представляется стандартным блоком модели асинхронной электрической машины «Asynchronous Machine SI Units». Подробный расчет параметров асинхронной машины изложен в [38]. В окне задания параметров можно выбрать готовую модель (Preset Model) машины из каталога, в котором указаны следующие параметры: мощность в л. с. (HP), напряжение, частота сети и частота вращения в оборотах в минуту (PRM). Чтобы начать расчет схемы, содержащей модели электрических машин, с установившегося режима, предварительно необходимо инициализировать схему с помощью графического интерфейса пользователя Powergui.

Выключатель представляется стандартным блоком модели силового трехфазного выключателя переменного тока «Three-Phase Breaker». Управление им осуществляется внешними сигналами (1 / 0 – включить / отключить).

Повреждение (КЗ) представляется стандартным блоком модели трехфазного короткозамыкателя «Three-Phase Fault». Моделирует трехфазное устройство, замыкающее фазы между собой, а также на землю.

4.1.1. Методика расчета параметров блока модели трехфазного силового трансформатора

В библиотеке пакета расширения SimPowerSystems имеется несколько блоков моделей силовых трансформаторов – с учетом и без учета нелинейных свойств его магнитопровода, однофазных и трехфазных, двух – и трехобмоточных. Особый интерес представляет модель трехфазного двухобмоточного трансформатора с учетом нелинейных свойств его магнитопровода, которая является важнейшим элементом для моделирования ОЭО.

4. Разработка и реализация элементов программных комплексов с гибкой структурой

Во всех блоках моделей трансформаторов библиотеки SimPowerSystems параметры задаются в о. е. В более поздних версиях SimPowerSystems имеется возможность задавать параметры, как в о. е., так и в именованных единицах.

Блок модели трехфазного двухобмоточного трансформатора «Three-phase Transformer (Two Windings)» построен на основе моделей трех однофазных трансформаторов. Методика расчета значений параметров блока модели трехфазного двухобмоточного трансформатора с учетом нелинейных свойств его магнитопровода в доступных русско- и англоязычных источниках отсутствует.

Основы расчета схемы замещения трехфазного трансформатора, а также особенности расчета параметров стандартного блока модели однофазного трансформатора без учета нелинейных свойств его магнитопровода изложены в [56, 57]. Схема замещения однофазного трансформатора из библиотеки SimPowerSystems приведена на рис. 4.1 [37].

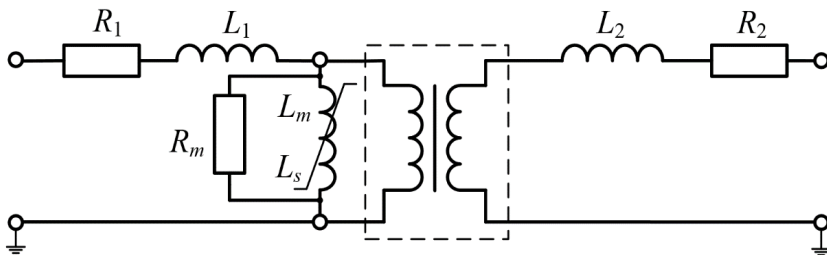


Рис. 4.1. Схема замещения силового однофазного двухобмоточного трансформатора

Подлежат расчету в о. е. следующие параметры блока модели «Three-phase Transformer (Two Windings)»: активное сопротивление первичной и вторичной обмотки трансформатора R_1 (о. е.), R_2 (о. е.); индуктивность первичной и вторичной обмотки трансформатора L_1 (о. е.), L_2 (о. е.); активное сопротивление и индуктивность ветви намагничивания R_m (о. е.), L_m (о. е.). Индуктивность L_m учитывает действие основного магнитного потока, а активное сопротивление R_m эквивалентно потерям в стали магнитопровода.

4. Разработка и реализация элементов программных комплексов с гибкой структурой

В табл. 4.1 приведены каталожные данные трехфазного двухобмоточного трансформатора ТДН-16000/110 со схемой соединения обмоток $Y_0/\Delta-11$ [58].

Таблица 4.1

Каталожные данные трансформатора ТДН-16000/110

Параметр	Значение	Параметр	Значение
$S_{\text{ном}}$, МВА	16	$U_{1\text{ном}}$, кВ	115
$U_{\text{к}}$, %	10,5	$U_{2\text{ном}}$, кВ	10,5
$P_{\text{к}}$, кВт	85	I_0 , %	0,7
P_0 , кВт	19	$f_{\text{ном}}$, Гц	50

Следует отметить, что в о. е. индуктивность и индуктивное сопротивление имеют одинаковое значение.

В табл. 4.2 в качестве примера для трансформатора ТДН-16000/110 приведен расчет в о. е. параметров блока модели трехфазного двухобмоточного трансформатора «Three-phase Trans-former (Two Windings)», в котором используются только каталожные данные силового трансформатора (табл. 4.1): $S_{\text{ном}}$ – номинальная мощность трансформатора, ВА; $P_{\text{к}}$ – мощность потерь короткого замыкания, Вт; $U_{\text{к}}$ – напряжение короткого замыкания, %; P_0 – мощность потерь холостого хода, Вт; I_0 – ток холостого хода, %. В модели также необходимо задать значения номинальных напряжений обмоток ВН и НН напряжения силового трансформатора $U_{1\text{ном}}$ и $U_{2\text{ном}}$, В соответственно и номинальную частоту $f_{\text{ном}}$, Гц.

Преобразовав приведенные в табл. 4.2 расчетные выражения, получим упрощенные выражения для расчета параметров схемы замещения рис. 4.1, в которых используются только каталожные параметры (табл. 4.3).

Как видно из табл. 4.2 и табл. 4.3, рассчитанные значения параметров схемы замещения двухобмоточного трансформатора отличаются незначительно.

4. Разработка и реализация элементов программных комплексов с гибкой структурой

Таблица 4.2

Расчет параметров блока модели трехфазного трансформатора «Three-phase Transformer (Two Windings)»

Наименование величин	Расчетное выражение
1	2
Номинальная мощность фазы трансформатора, МВА	$S_{\text{фном}} = \frac{S_{\text{ном}}}{3} = \frac{16 \cdot 10^6}{3} = 5,33$
Фазное напряжение первичной обмотки при соединении «звезда», кВ	$U_{1\phi} = \frac{U_{1\text{ном}}}{\sqrt{3}} = \frac{115 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} = 66,4$
Номинальный фазный ток первичной обмотки при соединении «звезда», А	$I_{1\text{фном}} = \frac{S_{\text{фном}}}{U_{1\phi}} = \frac{5,33 \cdot 10^6}{66,4 \cdot 10^3} = 80,27$
Из опыта холостого хода:	
Фазный ток холостого хода трансформатора, А	$I_{0\phi} = \frac{I_0 I_{1\text{фном}}}{100} = \frac{0,7 \cdot 80,27}{100} = 0,56$
Полное сопротивление ветви намагничивания схемы замещения при холостом ходе, кОм	$Z_0 = \frac{U_{1\phi}}{I_{0\phi}} = \frac{66,4 \cdot 10^3}{0,56} = 118,57$
Мощность потерь холостого хода на фазу, кВт	$P_{0\phi} = \frac{P_0}{3} = \frac{19 \cdot 10^3}{3} = 6,33$
Коэффициент мощности холостого хода:	$\begin{aligned} \cos(\varphi_0) &= \frac{P_{0\phi}}{U_{1\phi} \cdot I_{0\phi}} = \\ &= \frac{6,33 \cdot 10^3}{66,4 \cdot 10^3 \cdot 0,56} = 0,17 \end{aligned}$
Активное сопротивление ветви намагничивания, кОм	$\begin{aligned} R_m &= \frac{Z_0}{\cos(\varphi_0)} = \\ &= \frac{118,57 \cdot 10^3}{0,17} = 697,47 \end{aligned}$

4. Разработка и реализация элементов программных комплексов с гибкой структурой

Продолжение табл. 4.2

Индуктивное сопротивление ветви намагничивания, кОм	$X_m = \frac{Z_0}{\sin(\varphi_0)} =$ $= \frac{118,57 \cdot 10^3}{\sqrt{1-0,17^2}} = 120,3$
Из опыта короткого замыкания:	
Фазное напряжение короткого замыкания, кВ	$U_{\text{кф}} = \frac{U_{1\phi} U_{\text{к}}}{100} = \frac{66,4 \cdot 10,5}{100} = 6,97$
Полное сопротивление короткого замыкания, Ом	$Z_{\text{к}} = \frac{U_{\text{кф}}}{I_{1\text{фном}}} = \frac{6,97 \cdot 10^3}{80,27} = 86,83$
Мощность потерь короткого замыкания на фазу, кВт	$P_{\text{кф}} = \frac{P_{\text{к}}}{3} = \frac{85 \cdot 10^3}{3} = 28,33$
Коэффициент мощности короткого замыкания:	$\cos(\varphi_{\text{к}}) = \frac{P_{\text{кф}}}{U_{\text{кф}} I_{1\text{фном}}} =$ $= \frac{28,33 \cdot 10^3}{6,97 \cdot 10^3 \cdot 80,27} = 0,051$
Активное сопротивление короткого замыкания, Ом	$R_{\text{к}} = Z_{\text{к}} \cdot \cos(\varphi_{\text{к}}) =$ $= 86,83 \cdot 0,051 = 4,43$
Индуктивное сопротивление короткого замыкания, Ом	$X_{\text{к}} = Z_{\text{к}} \sin(\varphi_{\text{к}}) =$ $= 86,83 \cdot \sqrt{1-0,051^2} = 86,72$
Базисные условия:	
Базисное значение тока, А	$I_{\text{баз}} = I_{1\text{фно}} = 80,27$
Базисное значение сопротивления, Ом	$R_{\text{баз}} = \frac{U_{1\phi}}{I_{\text{баз}}} = \frac{66,4 \cdot 10^3}{80,27} = 827,2$

4. Разработка и реализация элементов программных комплексов с гибкой структурой

Окончание табл.4.2

Перевод полученных значений в о. е. (индуктивность и активное сопротивление первичной и вторичной обмотки в о. е. будут равны):	
Активное сопротивление ветви намагничивания:	$R_{m(oe)} = \frac{R_m}{R_{\delta_{\text{баз}}}} = \frac{697,47 \cdot 10^3}{827,2} = 843,2$
Индуктивность ветви намагничивания:	$L_{m(oe)} = \frac{X_m}{R_{\delta_{\text{баз}}}} = \frac{120,3 \cdot 10^3}{827,2} = 145,4$
Активное сопротивление первичной и вторичной обмотки трансформатора:	$R_{1(oe)} = R_{2(oe)} = \frac{1}{2} \frac{R_k}{R_{\delta_{\text{баз}}}} = \frac{4,43}{827,2 \cdot 2} = 0,0027$
Индуктивность первичной и вторичной обмотки трансформатора:	$L_{1(oe)} = L_{2(oe)} = \frac{1}{2} \frac{X_k}{R_{\delta_{\text{баз}}}} = \frac{86,72}{827,2 \cdot 2} = 0,0524$

Таблица 4.3

Упрощенные формулы расчета параметров схемы замещения однофазного трансформатора

Параметр	Значение, о. е.
$R_1 = R_2$	$R_{1(oe)} = R_{2(oe)} = \frac{1}{2} \frac{P_k}{S_{\text{НОМ}}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{85 \cdot 10^3}{16 \cdot 10^6} = 0,0027$
$L_1 = L_2$	$L_{1(oe)} = L_{2(oe)} = \frac{1}{2} \frac{U_k}{100} = \frac{1}{2} \cdot \frac{10,5}{100} = 0,0525$
R_m	$R_{m(oe)} = \frac{S_{\text{НОМ}}}{P_0} = \frac{16 \cdot 10^6}{19 \cdot 10^3} = 842,1$
L_m	$L_{m(oe)} \approx \frac{100}{I_0} = \frac{100}{0,7} = 142,9$

4.1.2. Методика расчета параметров, описывающих нелинейные свойства магнитопровода

Нелинейные свойства магнитопровода блока модели трансформатора «Three-phase Transformer (Two Windings)» из библиотеки SimPowerSystems описываются зависимостью амплитудных значений потокосцепления Ψ от тока намагничивания I_{μ} . Для перевода характеристики $B(H)$ в $\Psi(I_{\mu})$ необходимо располагать геометрическими параметрами трансформатора, которые зачастую отсутствуют.

Включение ненагруженного силового трансформатора под напряжение вызывает насыщение его магнитопровода. Это приводит к возникновению значительным БНТ в его фазных обмотках. Максимальная величина этого тока зависит от нескольких факторов: фазы включения, остаточной намагниченности, значения потокосцепления в точке излома характеристики намагничивания («knee-point») и наклона характеристики намагничивания в области глубокого насыщения, которому соответствует индуктивность L_s ветви намагничивания схемы замещения фазы трансформатора на рис 4.1.

Наклон характеристики намагничивания в области глубокого насыщения основном зависит от значения индуктивности «air-core inductance» – L_{ac} . Значение L_s связано с L_{ac} зависимостью [37]:

$$L_s = L_{ac} - L_1,$$

где L_1 – индуктивность первичной обмотки.

Анализ зарубежных и отечественных источников [59–67] показал, что однозначность в оценке параметров характеристики намагничивания отсутствует, однако можно указать диапазоны изменений этих параметров. Так, вне зависимости от мощности трансформатора, индуктивность L_{ac} рекомендуется принимать равной удвоенному значению напряжения (индуктивности) короткого замыкания (о. е.), а точка излома характеристики намагничивания («knee-point») лежит в пределах 1,1–1,2 о. е.

В рассматриваемом случае амплитудная характеристика $\Psi(I_{\mu})$ представляется двумя прямыми, каждая из которых характеризуется своими значениями индуктивности в о. е. (рис. 4.2). Первая прямая соответ-

4. Разработка и реализация элементов программных комплексов с гибкой структурой

ствует функционированию трансформатора в номинальном режиме (наклон данной прямой определяется значением L_m). Вторая – работе трансформатора с вошедшим в режим глубокого насыщения магнитопроводом (наклон данной прямой определяется значением L_s). Точка излома характеристики намагничивания («knee-point») – начало насыщения (на рис. 4.2 данная точка обозначена как «Point2»).

Рассчитаем координаты базисных точек амплитудной характеристики применительно к рассматриваемому трансформатору ТДН-16000/110 при условии отсутствия остаточной намагниченности магнитопровода. В этом случае, для точки Point1 имеем следующие координаты: $\Psi_{\text{point1}} = 0$ о. е., $i_{\text{point1}} = 0$ о. е.

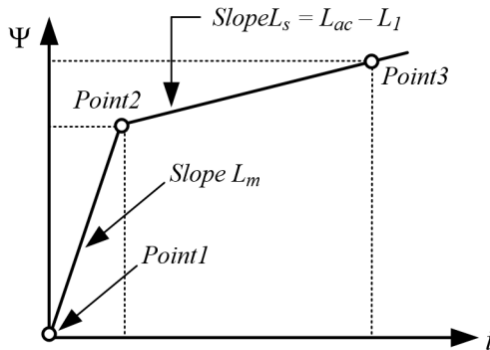


Рис. 4.2. Представление характеристики намагничивания магнитопровода трансформатора

Примем значение потокоцепления Ψ_{point2} в точке излома характеристики намагничивания равным 1,15 о. е., тогда значение тока намагничивания будет равно:

$$i_{\text{point2}} = \frac{\Psi_{\text{point2}}}{L_m} = \frac{1,15}{145,4} = 0,0079 .$$

Значение L_{ac} рассчитаем, как удвоенное значение напряжения короткого замыкания:

4. Разработка и реализация элементов программных комплексов с гибкой структурой

$$L_{ac} = \frac{2U_k}{100} = 2 \cdot \frac{10,5}{100} = 0,21.$$

Таким образом, наклон характеристики в области насыщения будет равен:

$$\text{Slope } L_s = L_{ac} - L_1 = 0,21 - 0,052 = 0,158$$

Значение потокосцепления при насыщении стали магнитопровода ($i_{\text{point3}} = 1$ о. е.) будет равно:

$$\Psi_{\text{point3}} = \Psi_{\text{point2}} + \text{Slope } L_s = 1,15 + 0,158 = 1,308$$

Выразив выше приведенные расчетные выражения через каталожные данные трансформатора, получим более удобные формулы для расчета координат характерных точек кривой намагничивания трансформатора (табл. 4.4) [68].

Таблица 4.4

Формулы расчета координат характерных точек кривой намагничивания магнитопровода трансформатора

Характерная точка	Ψ , о. е.	I_μ , о. е.
Point1	$\Psi_{\text{point1}} = 0$	$i_{\text{point1}} = 0$
Point2	$\Psi_{\text{point2}} = 1,15$	$i_{\text{point2}} = \frac{\Psi_{\text{point2}} I_0}{100} = \frac{1,15 \cdot 0,7}{100} = 0,0081$
Point3	$\Psi_{\text{point3}} = \Psi_{\text{point2}} + \frac{1,5U_k}{100} = 1,15 + \frac{1,5 \cdot 10,5}{100} = 1,308$	$i_{\text{point3}} = 1$

4. Разработка и реализация элементов программных комплексов с гибкой структурой

4.1.3. Окно задания значений параметров модели трехфазного двухобмоточного трансформатора

Окно задания значений параметров модели трехфазного двухобмоточного трансформатора (вкладка Configuration) приведено на рис. 4.3.

На вкладке Configuration (рис. 4.3) в полях Winding 1 connection (ABC terminals) и Winding 2 connection (abc terminals) из выпадающего списка можно выбрать схему соединения первичной и вторичной обмоток:

- Y – «звезда»;
- Yn – «звезда» с нейтралью;
- Yg – «звезда» с заземленной нейтралью;
- Delta (D1) – «треугольник» первой группы;
- Delta (D11) – «треугольник» одиннадцатой группы.

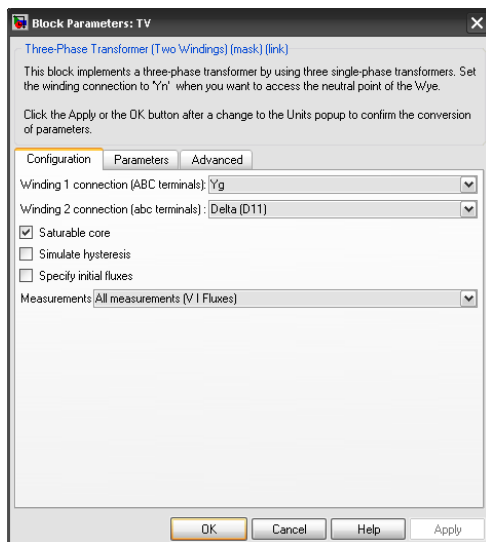


Рис. 4.3. Окно задания значений параметров модели трансформатора (вкладка Configuration)

4. Разработка и реализация элементов программных комплексов с гибкой структурой

При установке флажка в поле *Saturable core* (Насыщающийся сердечник) используется модель трансформатора, учитывающая насыщение его магнитопровода. В этом случае на вкладке *Parameters* (рис. 4.4) задается только активное сопротивление цепи намагничивания в о. е. (поле *Magnetization resistance* R_m (pu)).

При установке флажка в поле *Simulate hysteresis* в характеристике намагничивания магнитопровода трансформатора учитывается гистерезис (при броске тока намагничивания относительная ширина петли гистерезиса столь мала, что ей можно пренебречь [60]).

При установке флажка в поле *Specify initial fluxes* в модели имеется возможность задать начальные потоки для каждой фазы трансформатора (в данной работе вопрос задания остаточной намагниченности не рассматривается).

В поле *Measurements* (Измерения) из выпадающего списка можно выбрать передаваемые в блок измерений переменные, которые затем можно увидеть с помощью виртуального осциллографа.

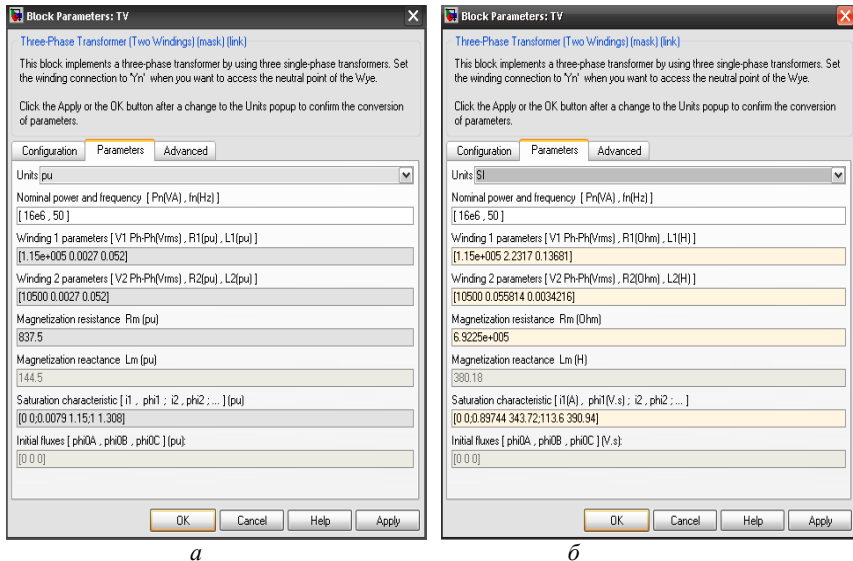


Рис. 4.4. Окно задания параметров модели трансформатора *Parameters*:
a – в о. е.; *б* – в именованных единицах

4. Разработка и реализация элементов программных комплексов с гибкой структурой

Остальные параметры задаются на вкладке Parameters (рис. 4.4).

В поле Units из выпадающего списка можно выбрать способ задания значений параметров трансформатора:

pu – в о. е.; SI – в именованных единицах.

Название следующих полей приведено при установленном в поле Units значении pu.

В поле Nominal power and frequency [Pn(VA), fn(Hz)] задаются номинальная полная мощность трансформатора (ВА) и частота переменного тока (Гц).

В полях Winding 1 parameters [V1 Ph-Ph(Vrms), R1(pu), L1(pu)] и Winding 2 parameters [V2 Ph-Ph(Vrms), R2(pu), L2(pu)] задаются параметры первичной и вторичной обмотки трансформатора: линейное действующее напряжение (В), рассчитанное активное сопротивление обмотки (о. е.) и рассчитанная индуктивность обмотки (о. е.).

В поле Magnetization resistance Rm (pu) (Активное сопротивление цепи намагничивания в о. е.) вводится рассчитанное значение активного сопротивления ветви намагничивания.

Поле Magnetization reactance Lm (pu) (Индуктивность цепи намагничивания в о. е.) доступно только при моделировании линейного трансформатора (флажок в поле Saturable core на вкладке Configuration не установлен). В данное поле вводится рассчитанное значение индуктивности ветви намагничивания.

В поле Saturationcharacteristic [i1, phi1; i2, phi2; ...] (pu) (Характеристика намагничивания магнитопровода) задаются координаты характерных точек кривой намагничивания – пары значений намагничивающего тока и потокосцепления в о. е.

Поле Initial fluxes [phi0A, phi0B, phi0C] (pu) доступно только при установленном флажке в поле Specify initial fluxes на вкладке Configuration.

Вкладка Advanced в задании параметров трансформатора не участвует.

Окно параметров в именованных единицах (рис. 4.4, б) автоматически пересчитывает все параметры в именованные единицы (из выпадающего списка поля Units необходимо выбрать значение SI). Такой вид окна удобен для проверки рассчитанных параметров в соответствии с выбранными базисными условиями.

4. Разработка и реализация элементов программных комплексов с гибкой структурой

4.1.4. Сравнение результатов моделирования режимов трехфазного трансформатора с помощью модели библиотеки SimPowerSystems и КПК KZTRANS2

Проверка рассчитанных в п. 4.1.1 и 4.1.2 параметров блока модели силового трансформатора проводилась путем сравнения результатов моделирования режима БНТ, возникающего вследствие насыщения стали магнитопровода ненагруженного силового трансформатора, при его включении на холостой ход со стороны ВН. Результаты были получены в КПК, реализованном в MATLAB-Simulink-SimPowerSystems с использованием блока модели «Three-phase Transformer (Two Windings)», и в КПК KZTRANS2 (рис. 4.5).

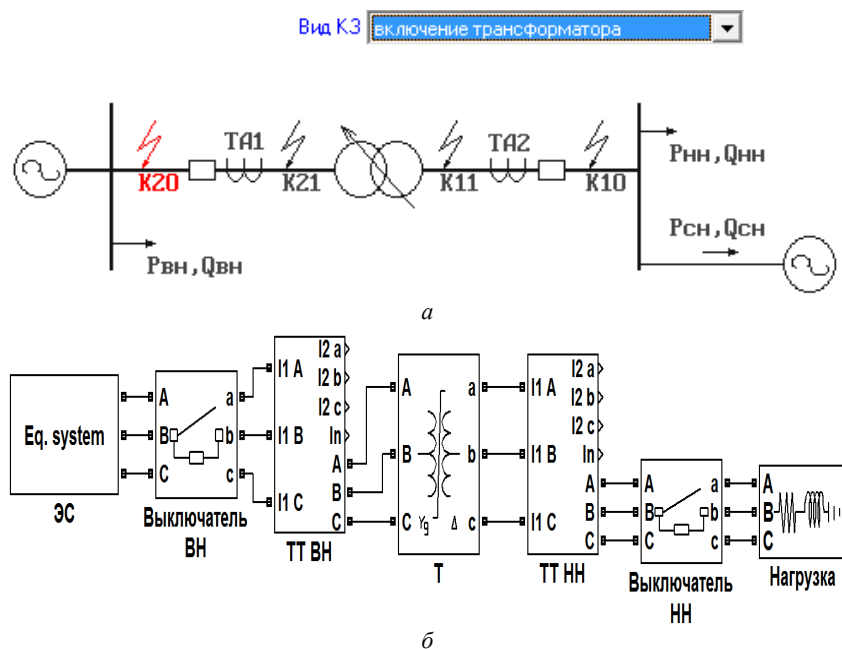


Рис. 4.5. Модель ОЭО для проверки рассчитанных параметров блока модели силового трансформатора:
а – реализованный в КПК KZTRANS2; б – реализованный в Simulink-SimPowerSystems

4. Разработка и реализация элементов программных комплексов с гибкой структурой

Структура модели, параметры элементов ОЭО и время включения выключателя со стороны ВН задавались идентичными.

Пересчет характеристики намагничивания $B(H)$ магнитопровода силового трансформатора, используемой в ПК KZTRANS2, в характеристику $\Psi(I_m)$ модели трансформатора в составе КПК, реализованного в MATLAB-SimulinkSimPowerSystems, производился двумя способами.

В первом случае пересчет производился с использованием специализированного «искусственного» алгоритма [69] и геометрических параметров магнитной системы моделируемого трансформатора, рассчитанных по эмпирическим выражениям [18].

Во втором случае использовалась рассмотренная в п. 4.1.2 упрощенная методика, основанная на использовании только номинальных параметров трансформатора.

Высокое совпадение (93 %) результатов моделирования в различных КПК (рис. 4.6) в части значения пиков БНТ, позволяет сделать вывод о возможности использования рассмотренной методики для расчета параметров блока модели «Three-phase Transformer (Two Windings)» (п. 4.1.1) совместно с упрощенной методикой задания характеристики $\Psi(I_m)$ (п. 4.1.2). Предложенная методика позволяет получать достаточно близкие результаты к эталонным результатам моделирования (КПК KZTRANS2).

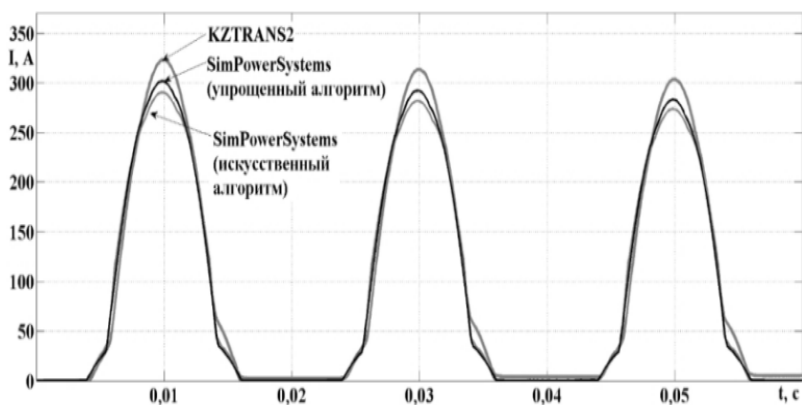


Рис. 4.6. Результаты моделирования режима включения силового трансформатора со стороны ВН на холостой ход (фаза А)

4.2. Разработка и реализация в Simulink блоков модели трехфазной группы трансформаторов тока

Как отмечено выше, в библиотеке пакета SimPowerSystems отсутствует блок модели ТТ [23, 28, 38].

На основании разработанной математической модели однофазного ТТ [20] в [29] была разработана модель трехфазной группы ТТ с соединением вторичных обмоток и нагрузок в звезду с нулевым проводом (рис. 4.7).

Если в качестве нагрузок, подключенных ко вторичным обмоткам и нулевому выводу трехфазной группы ТТ (рис. 4.7), рассматривать МПТЗ и контрольные кабели, то суммарные индуктивности нагрузок ($L_{нА}, L_{нВ}, L_{нС}, L_0$) ввиду их малого значения можно исключить из системы уравнений ТТ. Приняв, что вторичная обмотка равномерно распределена по периметру магнитопровода, в системе уравнений также можно не учитывать ее индуктивность $L_{об}$.

С учетом вышеизложенных допущений, после приведения дифференциальных уравнений к виду, удобному для численного интегрирования, математическое описание трехфазной группы ТТ принимает вид (4.4).

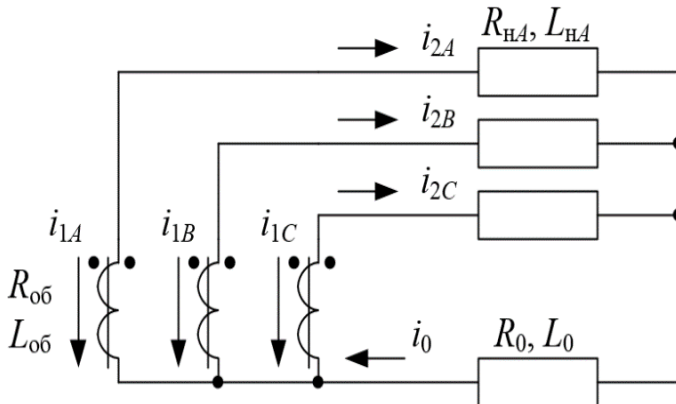


Рис. 4.7. Трехфазная группа ТТ с соединением вторичных обмоток и нагрузок в звезду с нулевым проводом

4. Разработка и реализация элементов программных комплексов с гибкой структурой

$$\begin{cases} \frac{dB_j}{dt} = \frac{1}{w_2 s_c} [(R_{об} + R_n) i_{2j} + R_0 i_0]; \\ i_{2j} = \frac{w_1}{w_2} i_{1j} - \frac{l_c}{w_2} H_j; \\ B_j = f(H_j); \\ i_0 = i_{2A} + i_{2B} + i_{2C}; \\ j = A, B, C; \end{cases} \quad (4.4)$$

где $R_{об}$ – активное сопротивление вторичной обмотки;

R_n – активное сопротивление нагрузки;

s_c – сечение стали магнитопровода;

l_c – средняя длина магнитопровода;

w_1, w_2 – число витков первичной и вторичной обмотки соответственно;

i_{1j}, i_{2j} – токи в фазах первичной и вторичной обмоток;

B_j, H_j – магнитная индукция и напряженность магнитного поля в магнитопроводе;

$B_j = f(H_j)$ – средняя характеристика намагничивания электротехнической стали магнитопровода.

4.2.1. Блок модели трехфазной группы трансформаторов тока на основе геометрических параметров магнитной системы ТТ

В Simulink на основании (4.4) разработан блок модели трехфазной группы ТТ, который содержит три модели одиночного ТТ (рис. 4.8).

На рис. 4.9 приведен состав блока «ТТ-А» – реализация математической модели фазы А модели трехфазной группы ТТ. Блоки «ТТ-В» и «ТТ-С» аналогичны блоку «ТА-А». Блок под названием «alg. loop» предназначен для разрыва алгебраической петли во время вычислений.

Блоки «ТТ-А, В, С» представляются блоками «Gain», осуществляющими умножение входного сигнала на коэффициенты, значения которых являются параметрами данных блоков и определяются исходя

4. Разработка и реализация элементов программных комплексов с гибкой структурой

из (4.4). Блоки «Sum» и «Integrator» осуществляют суммирование и интегрирование соответственно. Данные блоки параметров не имеют.

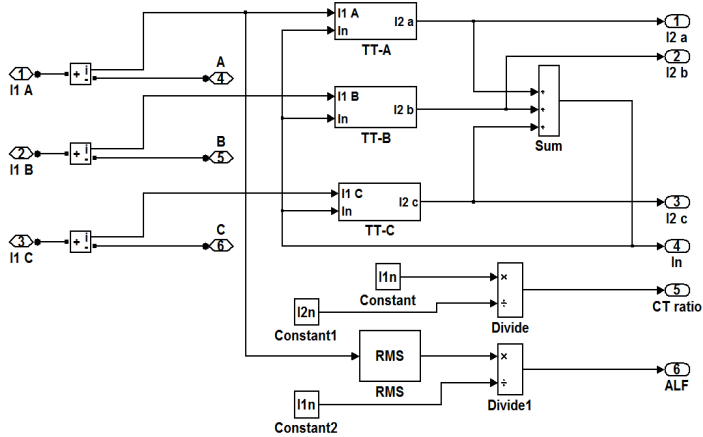


Рис. 4.8. Модель трехфазной группы трансформаторов тока

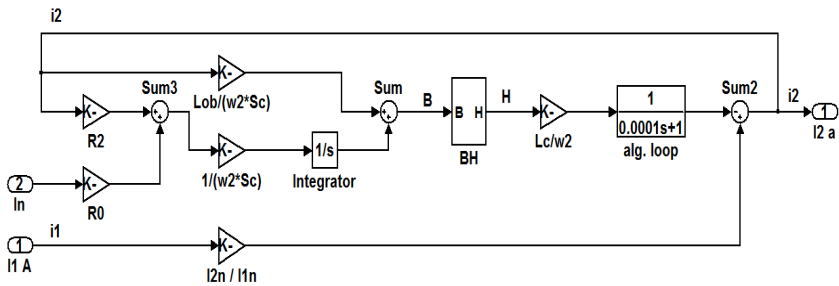


Рис. 4.9. Реализация математической модели фазы *A* в трехфазной группе трансформаторов тока

Особое внимание при моделировании ТТ уделяется учету нелинейных свойств его магнитопровода. Для того, чтобы максимально приблизить исходную характеристику намагничивания к задаваемой, область насыщения исходной кривой аппроксимируется 25 парами значений *B* и *H* (блок «BH» на рис. 4.9). При этом кривая индукции в области насыщения имеет плавную форму, что позволя-

4. Разработка и реализация элементов программных комплексов с гибкой структурой

ет получать более точные результаты расчетов. Для аппроксимации принята типовая кривая намагничивания [70]. Следует отметить, что данная кривая практически совпадает с кривой намагничивания стали марки М6Х [71]. На рис. 4.10, *а* представлена аппроксимируемая кривая, а на рис. 4.10, *б* – соответствующий ей участок задаваемой кривой намагничивания в аналогичном диапазоне изменения напряженности магнитного поля.

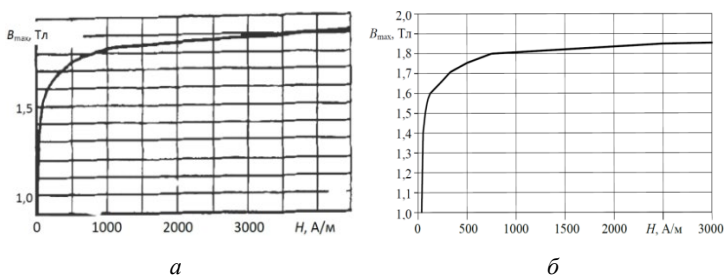


Рис. 4.10. Участок кривой намагничивания:
а – аппроксимируемый участок; *б* – задаваемый участок;

Блок «ВН» представляется блоком «Lookup Table». Параметрами данного блока являются 25 значений B_{\max} и соответствующие им 25 значений H .

4.2.2. Блок модели трехфазной группы трансформаторов тока на основе каталожных данных ТТ

Основной проблемой при моделировании ТТ является отсутствие в каталожных данных геометрических размеров его магнитной системы: сечения и средней длины магнитопровода. Практически известны следующие параметры ТТ: класс точности, номинальная предельная кратность (номинальный коэффициент безопасности – для обмоток, предназначенных для коммерческого учета или измерений), номинальная вторичная нагрузка и коэффициент трансформации. Две важные характеристики – активное сопротивление вторичной обмотки и ВАХ зачастую являются неизвестными.

4. Разработка и реализация элементов программных комплексов с гибкой структурой

Характеристика намагничивания электротехнической стали не зависит от геометрических и номинальных параметров ТТ и отражает только свойство материала, в то время как ВАХ ТТ напрямую зависит от данных параметров. Характеристики намагничивания электротехнических сталей, применяемых для производства магнитопроводов различных типов ТТ, в общем случае подобны. Для создания упрощенной модели ТТ можно принять, что все магнитопроводы ТТ изготовлены из стали одной марки и имеют одинаковую характеристику намагничивания. В качестве характеристики принимается типовая средняя кривая, приведенная в [70], под которой далее и будем понимать характеристику намагничивания.

Система уравнений (4.4) содержит следующие неизвестные константы: w_1 , w_2 , s_c , l_c , $R_{об}$, причем число витков w_1 первичной обмотки ТТ обычно составляет 1 или 2.

Для разрабатываемой модели примем $w_1 = 1$. Число витков вторичной обмотки w_2 может быть вычислено исходя из следующего соотношения (при известном значении w_1):

$$w_2 = \frac{I_{1ном} w_1}{I_{2ном}}, \quad (4.5)$$

где $I_{1ном}$, $I_{2ном}$ – номинальные первичный и вторичный токи ТТ соответственно.

В общем случае, сопротивление вторичной обмотки $R_{об}$ ТТ можно приблизительно вычислить по следующей формуле:

$$R_{об} = R_B w_2, \quad (4.6)$$

где R_B – сопротивление одного витка вторичной обмотки.

В [72] рекомендуется для расчета сопротивления вторичной обмотки ТТ с $I_{2ном} = 5$ А принимать значение R_B равное 0,002 Ом / виток.

Следует отличать ВАХ и характеристику холостого хода ТТ. ВАХ $U_2 = f(I_{02})$ – это зависимость действующего напряжения на зажимах вторичной обмотки U_2 от действующего вторичного тока намагничи-

4. Разработка и реализация элементов программных комплексов с гибкой структурой

вания I_{02} , а характеристика холостого хода $E_2 = f(I_{02})$ – зависимость действующей ЭДС вторичной обмотки E_2 от действующего вторичного тока намагничивания I_{02} . ЭДС E_2 отличается от напряжения U_2 из-за падения напряжения в активном сопротивлении вторичной обмотки R_{06} (индуктивным сопротивлением, как было отмечено выше, мы пренебрегаем). Однако в практике релейной защиты вследствие малой величины сопротивления вторичной обмотки принимается $E_2 \approx U_2$ [73]. Поэтому далее под ВАХ будем понимать зависимость $E_2 = f(I_{02})$.

Координаты ВАХ пропорциональны координатам характеристики намагничивания ТТ, т. е. ВАХ ТТ $E_2 = f(I_{02})$ в определенном масштабе повторяет характеристику намагничивания стали магнитопровода $B_m = f(H)$. Данные характеристики связаны между собой следующими соотношениями:

$$E_2 = \frac{2\pi f w_2 s_c}{\sqrt{2}} B_m = 4,44 f w_2 s_c B_m = 222 w_2 s_c B_m; \quad (4.7)$$
$$I_{02} = \frac{l_c}{w_2} H.$$

По оси $E_2 (B_m)$ данные характеристики пропорциональны $222 w_2 s_c$, а по оси $I_{02} (H)$ пропорциональны l_c / w_2 . Зная значения $222 w_2 s_c$ и l_c / w_2 конкретного ТТ, можно перейти от характеристики $B_m = f(H)$ к характеристике $E_2 = f(I_{02})$. Для вычисления данных значений необходимо определить координаты однозначно определяемой точки на характеристике намагничивания и соответствующей этому же состоянию ТТ точки на ВАХ. Далее, найдя отношение E_2 к B_m и I_{02} к H , вычислить значение $222 w_2 s_c$ и l_c / w_2 соответственно.

Расчетной точкой для вычисления значения $222 w_2 s_c$ может служить, так называемая, точка «knee-point» (точка излома характеристики), а для вычисления значения l_c / w_2 – точка, соответствующая работе ТТ с предельно-допустимой погрешностью ε .

Согласно [74] для обмотки класса точности 10P (5P) справедливо следующее соотношение:

4. Разработка и реализация элементов программных комплексов с гибкой структурой

$$K_{\text{kn}} = \frac{E_{2\text{kn}}}{E_{2\varepsilon}} = \frac{B_{m\text{kn}}}{B_{m\varepsilon}} = 0,74 (0,875), \quad (4.8)$$

где K_{kn} – коэффициент перехода;

$E_{2\text{kn}}$ – ЭДС в точке «knee-point» на ВАХ;

$E_{2\varepsilon}$ – ЭДС в точке, соответствующей работе ТТ с максимально-допустимой погрешностью ε ;

$B_{m\text{kn}}$ – индукция в точке «knee-point» на характеристике намагничивания;

$B_{m\varepsilon}$ – индукция в точке, соответствующей работе ТТ с максимально-допустимой погрешностью ε .

При работе ТТ с максимально-допустимой погрешностью ε (в %) вторичная ЭДС будет равна [74]:

$$E_{2\varepsilon} = K_{\text{ном}} I_{2\text{ном}} (R_{0б} + R_{\text{ном}}), \quad (4.9)$$

где $K_{\text{ном}}$ – номинальная предельная кратность ТТ; $R_{\text{ном}}$ – номинальное активное сопротивление нагрузки ТТ.

Очевидно, что ток намагничивания при работе ТТ с погрешностью ε (в %) равен:

$$I_{02\varepsilon} = \frac{\varepsilon}{100} K_{\text{ном}} I_{2\text{ном}}. \quad (4.10)$$

Переход от вычисленного значения $E_{2\varepsilon}$ к значению вторичной ЭДС в точке излома характеристики осуществляется через соотношение (4.8):

$$E_{2\text{kn}} = E_{2\varepsilon} K_{\text{kn}} = K_{\text{ном}} I_{2\text{ном}} (R_{0б} + R_{\text{ном}}) K_{\text{kn}}. \quad (4.11)$$

Согласно [75] ЭДС точки излома определяется точкой на ВАХ, 10 % увеличение напряжения относительно которой соответствует 50 % увеличению намагничивающего тока. Это же правило справедливо и для характеристики намагничивания $B_m = f(H)$, т. е. индукция точки излома определяется точкой на характеристике

4. Разработка и реализация элементов программных комплексов с гибкой структурой

намагничивания, 10 % увеличение индукции относительно которой соответствует 50 % увеличению напряженности магнитного поля.

Данному определению удовлетворяют следующие координаты точки излома принятой характеристики намагничивания: $B_{mkn} = 1,389$ Тл, $H_{kn} = 51,28$ А/м.

Переход от вычисленного значения к значению индукции в точке $B_{m\epsilon}$ (для обмотки класса 10Р) осуществляется через коэффициент K_{kn} :

$$B_{m\epsilon} = \frac{B_{mkn}}{K_{kn}} = \frac{1,389}{0,74} = 1,877. \quad (4.12)$$

По характеристике $B_m = f(H)$ находится значение H_ϵ , соответствующей работе ТТ с максимально допустимой погрешностью ϵ , – 2220 А/м.

Окончательно получают следующие соотношения:

$$\begin{aligned} \frac{E_{2kn}}{B_{mkn}} &= 222w_2s_c; \\ \frac{I_{02\epsilon}}{H_\epsilon} &= \frac{l_c}{w_2}. \end{aligned} \quad (4.13)$$

Система уравнений, описывающая упрощенную модель трехфазной группы ТТ, принимает следующий вид:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dB_j}{dt} &= \frac{222B_{mkn} \left[(R_B \frac{I_{1НОМ} w_1}{I_{2НОМ}} + R_{Hj}) i_{2j} + R_0 i_0 \right]}{K_{kn} K_{НОМ} I_{2НОМ} (R_B \frac{I_{1НОМ} w_1}{I_{2НОМ}} + R_{НОМj})}; \\ i_{2j} &= \frac{I_{2НОМ}}{I_{1НОМ}} i_{1j} - \frac{\epsilon K_{НОМ} I_{2НОМ}}{100 H_\epsilon} H_j; \\ B_{mj} &= f(H_j); \\ i_0 &= i_{2A} + i_{2B} + i_{2C}. \end{aligned} \right. \quad (4.14)$$

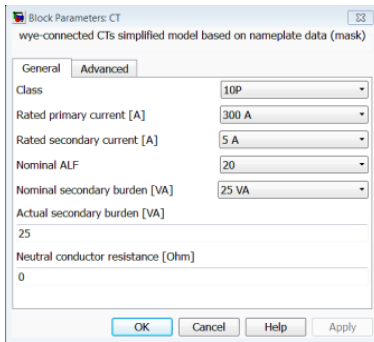
4. Разработка и реализация элементов программных комплексов с гибкой структурой

Для ТТ с $I_{2\text{НОМ}} = 5 \text{ А}$, $w_1 = 1$, $R_B = 0,002 \text{ Ом / виток}$, $\varepsilon = 10 \%$ (обмотка класса 10Р), $B_{\text{мкн}} = 1,389 \text{ Тл}$, $H_\varepsilon = 2220 \text{ А / м}$ получим (4.15).

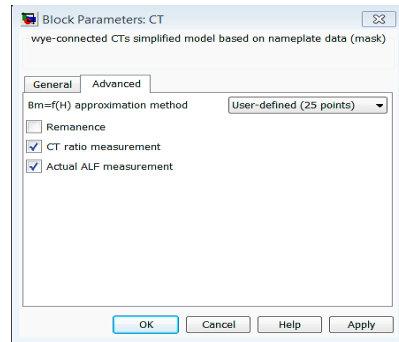
На основе (4.14) в Simulink была разработана упрощенная модель трехфазной группы ТТ [76].

На рис. 4.11 приведено меню задания параметров блока упрощенной модели трехфазной группы ТТ.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dB_j}{dt} = \frac{83,34[(0,0004I_{1\text{НОМ}} + R_{Hj})i_{2j} + R_0i_0]}{K_{\text{НОМ}}(0,0004I_{1\text{НОМ}} + R_{\text{НОМ}j})}, \\ i_{2j} = \frac{5i_{1j}}{I_{1\text{НОМ}}} - 2,25 \cdot 10^{-4} \cdot K_{\text{НОМ}}H_j; \\ B_{mj} = f(H_j); \\ i_0 = i_{2A} + i_{2B} + i_{2C}. \end{array} \right. \quad (4.15)$$



a



б

Рис. 4.11. Меню задания параметров блока модели трехфазной группы ТТ на основе каталожных данных:

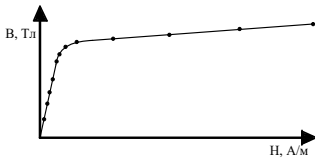
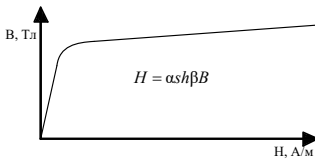
a – вкладка General; *б* – вкладка Advanced

В табл. 4.5 приведена расшифровка меню блока модели трехфазной группы ТТ на основе каталожных данных.

4. Разработка и реализация элементов программных комплексов с гибкой структурой

Таблица 4.5

Пункты меню блока упрощенной модели трехфазной группы ТТ на основе каталожных данных

Пункт меню модели	Назначение	Примечание
1	2	3
Class	Класс точности ТТ	Выбор между классами точности 5Р и 10Р
Ratedprimarycurrent [A]	Номинальный первичный ток, А	Возможен выбор из диапазона 50–4000 А
Rated secondary current [A]	Номинальный вторичный ток, А	Выбор между 1 А и 5 А
Nominal ALF	Номинальная предельная кратность ТТ	Возможен выбор из диапазона 5–50 с шагом 5
Nominal secondary burden [VA]	Номинальная вторичная нагрузка, ВА	Возможен выбор из диапазона 5–50 ВА с шагом 5 ВА
$B_m = f(H)$ approximation method	Метод аппроксимации кривой намагничивания $B_m = f(H)$	Выпадающее меню с пунктами меню: User-defined (25 points) и Ollendorf
User-defined (25 points)	Аппроксимация 25 парами значений $B_m - H$	
Ollendorf	Аппроксимация с помощью формулы Оллendorфа	

4. Разработка и реализация элементов программных комплексов с гибкой структурой

Окончание табл. 4.5.

1	2	3
Actual secondary burden [VA]	Действительная вторичная нагрузка, ВА	Возможен ввод любого не отрицательного значения
Neutral conductor resistance [Ohm]	Сопротивление нулевого провода, Ом	Возможен ввод любого не отрицательного значения
Remanence	Задание остаточной магнитной индукции	При установке флажка возле данного пункта появляются дополнительные пункты меню: PhaseA (B, C) [Тл]
PhaseA [T]	ТТ в фазе A	Задание остаточной намагниченности ТТ в фазе A
PhaseB [T]	ТТ в фазе B	Задание остаточной намагниченности ТТ в фазе B
PhaseC [T]	ТТ в фазе C	Задание остаточной намагниченности ТТ в фазе C
CTratiomeasurement	Измерение коэффициента трансформации ТТ	При установке (снятии) флажка возле данного пункта меню в модели появляется (исчезает) дополнительный порт измерения коэффициента трансформации ТТ
Actual ALF measurement	Измерение действительной кратности протекающего тока	При установке (снятии) флажка возле данного пункта меню в модели появляется (исчезает) дополнительный порт измерения кратности протекающего тока

4. Разработка и реализация элементов программных комплексов с гибкой структурой

В рассматриваемой модели реализована возможность аналитической аппроксимации характеристики намагничивания стали $B_m = f(H)$ двумя способами:

- аппроксимация 25 парами значений B_m-H ;
- аппроксимация с помощью гиперболической функции

$H = \alpha \operatorname{sh}(\beta B_m)$ [77].

Определение коэффициентов гиперболической функции $H = \alpha \operatorname{sh}(\beta B_m)$ может быть выполнен по методу выбранных точек.

Данный метод заключается в произвольном выборе на характеристике намагничивания некоторого числа точек (по количеству независимых коэффициентов формулы).

Выбор точек осуществляется таким образом, чтобы они располагались на характерных участках кривой намагничивания. Целесообразно выбрать две точки: одна до излома кривой намагничивания с координатами $H_1 = 65$ А/м, $B_{m1} = 1,507$ Тл, другая – за коленом с координатами $H_2 = 970$ А/м, $B_{m2} = 1,81$ Тл.

Коэффициенты β и α находятся по выражениям:

$$\beta = \frac{\ln \frac{H_2}{H_1}}{B_{m2} - B_{m1}}; \quad \alpha = \frac{H_2}{\operatorname{sh}(\beta B_{m2})}. \quad (4.16)$$

По результатам расчета получается следующие значения коэффициентов: $\alpha = 0,0001886$, $\beta = 8,92$.

На рис. 4.12 приведено сравнение результатов аппроксимации принятой характеристики намагничивания вышеописанными способами.

Как видно из приведенного рисунка, наибольшее расхождение результатов наблюдается в области рабочих индукций до 1,5 Тл. В области излома и насыщения – расхождения незначительны.

Поскольку проверки правильности функционирования МПТЗ производится для аварийных режимов функционирования ОЭО, при которых индукция ТТ значительно превышает рабочую, то аппроксимация характеристики намагничивания гиперболической функцией для этих случаев является приемлемым решением.

4. Разработка и реализация элементов программных комплексов с гибкой структурой

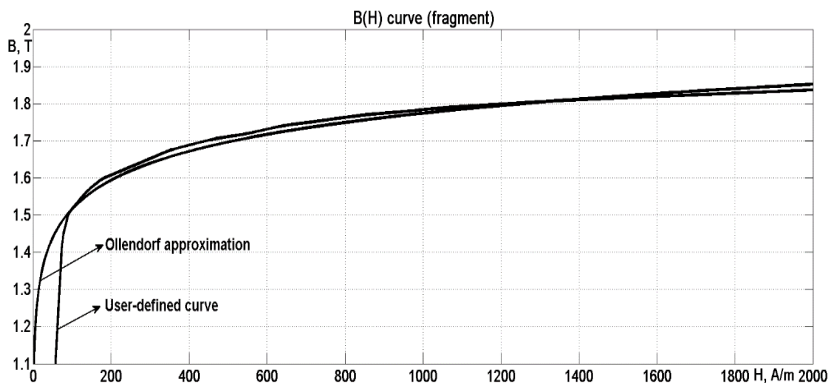


Рис. 4.12. Аппроксимации характеристики намагничивания

4.2.3. Сравнение результатов моделирования трехфазной группы трансформаторов тока с помощью модели библиотеки SimPowerSystems и КПК UKZLINE

Проверка функционирования разработанных в Simulink блоков моделей ТТ проводится путем сравнения результатов моделирования аварийного режима – повреждения (КЗ) на линии Л1 (рис. 4.13), полученных в КПК, реализованном в Simulink-SimPowerSystems, и в КПК UKZLINE. Структура модели (рис. 4.13) и параметры элементов ОЗО задавались идентичными.

В качестве моделируемого, был выбран ТТ типа ТПЛ-10 со следующими параметрами: коэффициент трансформации 400/5 А, класс точности обмотки – 10Р, $K_{\text{НОМ}} = 13$, $S_{\text{НОМ}} = 15$ ВА, $R_{\text{об}} = 0,28$ Ом, $s_c = 0,00112$ м², $l_c = 0,48$ м, $w_1 = 2$, $w_2 = 159$. Данные параметры были заданы для модели ТТ в составе КПК UKZLINE и для аналогичной модели ТТ в составе КПК, реализованного в Simulink-SimPowerSystems. Для упрощенной модели ТТ в составе ПК, реализованного в Simulink-SimPowerSystems, задавались только следующие параметры: коэффициент трансформации 400/5 А, класс точности обмотки – 10Р, $K_{\text{НОМ}} = 13$ и $S_{\text{НОМ}} = 15$ ВА. Для всех моделей действительная вторичная нагрузка была принята равной 5 ВА, а сопротивление нулевого провода – 0,2 Ом.

4. Разработка и реализация элементов программных комплексов с гибкой структурой

Сравнение полученных результатов моделирования приведено на рис. 4.14.

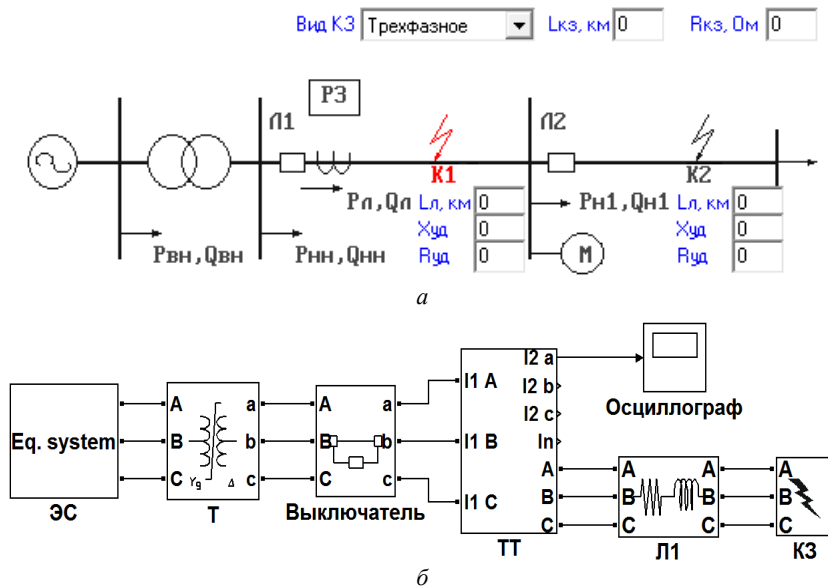


Рис. 4.13. Модель ОЭО для проверки функционирования блока модели трехфазной группы ТТ:

а – в КПК UKZLINE; *б* – в Simulink-SimPowerSystems

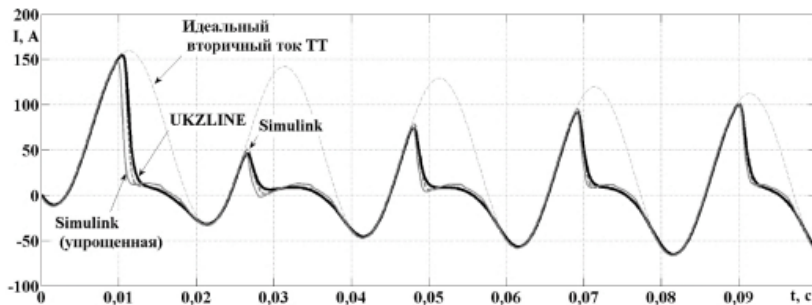


Рис. 4.14. Результаты моделирования режима насыщения трехфазной группы ТТ (фаза А)

4. Разработка и реализация элементов программных комплексов с гибкой структурой

В результате моделирования аварийного режима произошло глубокое насыщение ТТ. Полученное высокое совпадение (95 %) результатов моделирования в различных КПК, позволяет сделать вывод о возможности использования моделей ТТ в составе КПК, реализованных в Simulink-SimPowerSystems, т. к. наблюдается близкое совпадение с результатами моделирования в КПК UKZLINE. Использование упрощенной модели ТТ, разработанной в Simulink, в которой параметры определяются только каталожными данными ТТ, является предпочтительным.

Исходя из результатов сравнения, можно утверждать, что разработанные в Simulink-SimPowerSystems модели трехфазной группы ТТ являются адекватными и могут использоваться при реализации КПК с гибкой структурой.

4.3. Разработка и реализация в Simulink блоков моделей цифровых фильтров в составе измерительных органов тока

4.3.1. Математические модели цифровых фильтров

Основными параметрами цифрового сигнала являются число выборок на период промышленной частоты N и период дискретизации T (время между двумя соседними выборками)

$$T = \frac{1}{f_0 \cdot N}, \quad (4.17)$$

где f_0 – частота основной гармоники, Гц.

Поэтому аналоговому сигналу вида $u(t) = \sin(\omega_0 t)$ соответствует цифровой сигнал вида $u(nT) = \sin\left(\frac{2\pi n}{N}\right)$, где $n = 1, \dots, N$ – целое число, соответствующее номеру выборки; $\omega_0 = 2\pi f_0$ – угловая частота основной гармоники.

Контролируемый МТЗ цифровой сигнал $y(nT)$ содержит полезный сигнал $u(nT)$ и сигнал помехи $e(nT)$:

$$y(nT) = u(nT) + e(nT). \quad (4.18)$$

Цифровой полезный сигнал представляют в виде:

$$\begin{aligned} u(nT) &= U_m \sin\left(\frac{2\pi n}{N} + \varphi\right) = \\ &= U_m \sin\left(\frac{2\pi n}{N}\right) \cos \varphi + U_m \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right) \sin \varphi = \\ &= U_m^s \sin\left(\frac{2\pi n}{N}\right) + U_m^c \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right), \end{aligned} \quad (4.19)$$

где $U_m^s = U_m \sin \varphi$, $U_m^c = U_m \cos \varphi$ – амплитуды соответственно синусной и косинусной ОС.

Функция ЦФ состоит в выделении полезного сигнала $u(nT)$ (это основная гармоника или высшая, кратная основной, и в максимально возможном подавлении помехи $e(nT)$). Сигнал помехи содержит: высшие гармоники основной частоты, затухающие аperiodические составляющие переходного процесса при КЗ, а также затухающие и незатухающие гармонические составляющие с частотой, отличной от основной. Точный учет всех составляющих помехи принципиально невозможен, следовательно, ЦФ всегда будет выделять полезный сигнал с ошибкой тем большей, чем больше истинные выборки входного сигнала $y(nT)$ будут отличаться от полезного сигнала $u(nT)$.

В зависимости от предполагаемых составляющих сигнала помехи реализуются следующие типы ЦФ: ЦФ на основе МНК [78], ЦФ на основе ДПФ [79], ЦФ на основе ФОС [80] и др. Рассмотрим более подробно принципы построения перечисленных выше ЦФ [81].

Метод наименьших квадратов (МНК)

В реализации данного ЦФ контролируемый сигнал представляется состоящим из полезного сигнала основной гармоники, помехи в виде ЭЗАС и 3-й гармоники:

4. Разработка и реализация элементов программных комплексов с гибкой структурой

$$y(nT) = U_a e^{-\frac{nT}{\tau}} + U_{m1} \sin\left(\frac{2\pi n}{N} + \varphi_1\right) + U_{m3} \sin\left(\frac{6\pi n}{N} + \varphi_3\right). \quad (4.20)$$

Выражение (4.20) представляет в первом приближении сигнал тока при повреждении (КЗ) в ОЭО.

ЭЗАС с постоянной времени τ разлагается в ряд Тейлора:

$$e^{-\frac{nT}{\tau}} = 1 - \frac{nT}{\tau} + \frac{n^2 T^2}{2\tau^2} - \frac{n^3 T^3}{6\tau^3} \dots \quad (4.21)$$

При использовании первых трех или четырех членов ряда и представлении основной и 3-й гармоники по (4.20) выражение для любого номера выборки n принимает вид:

$$y(nT) = U_a e^{-\frac{nT}{\tau}} + U_{m1} \sin\left(\frac{2\pi n}{N} + \varphi_1\right) + U_{m3} \sin\left(\frac{6\pi n}{N} + \varphi_3\right). \quad (4.22)$$

Обозначим

$$X_1 = U_a, \quad X_2 = -\frac{U_a}{\tau}, \quad X_3 = \frac{U_a}{2\tau^2}, \quad X_4 = U_{m1}^C, \\ X_5 = U_{m1}^S, \quad X_6 = U_{m3}^C, \quad X_7 = U_{m3}^S,$$

как неизвестные.

Тогда для всех номеров выборок $n = 1, \dots, N$ выражение (4.22) можно записать в матричном виде

$$\mathbf{Y} = \mathbf{A}\mathbf{X}, \quad (4.23)$$

4. Разработка и реализация элементов программных комплексов с гибкой структурой

где

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & T & T^2 & \sin\left(\frac{2\pi}{N}\right) & \cos\left(\frac{2\pi}{N}\right) & \sin\left(\frac{6\pi}{N}\right) & \cos\left(\frac{6\pi}{N}\right) \\ 1 & 2T & 4T^2 & \sin\left(\frac{4\pi}{N}\right) & \cos\left(\frac{4\pi}{N}\right) & \sin\left(\frac{12\pi}{N}\right) & \cos\left(\frac{12\pi}{N}\right) \\ 1 & 3T & 9T^2 & \sin\left(\frac{8\pi}{N}\right) & \cos\left(\frac{8\pi}{N}\right) & \sin\left(\frac{18\pi}{N}\right) & \cos\left(\frac{18\pi}{N}\right) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & nT & n^2T^2 & \sin\left(\frac{2\pi n}{N}\right) & \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right) & \sin\left(\frac{2\pi n}{N}\right) & \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right) \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \\ X_5 \\ X_6 \\ X_7 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{Y} = \begin{bmatrix} y(T) \\ y(2T) \\ y(3T) \\ \dots \\ y(nT) \end{bmatrix}.$$

\mathbf{A} – матрица коэффициентов (главная матрица системы);

\mathbf{X} – вектор-столбец неизвестных;

\mathbf{Y} – вектор-столбец свободных членов.

Квадратная система линейных уравнений в матричном виде решается в виде:

$$\mathbf{X} = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{Y} \tag{4.24}$$

Число выборок N на период промышленной частоты для современных МТЗ составляет $N = 24, 32, \dots$, т. е. число уравнений N ока-

4. Разработка и реализация элементов программных комплексов с гибкой структурой

зывается большим числа неизвестных. Такие системы уравнений называются переопределенными, т. к. в них матрица коэффициентов \mathbf{A} – прямоугольная с числом строк большим числа столбцов. Для решения таких систем используется псевдообращенная матрица \mathbf{A}^+ [82]:

$$\mathbf{A}^+ = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T, \quad (4.25)$$

где \mathbf{A}^T – транспонированная матрица.

Приближенное решение системы уравнений:

$$\mathbf{X} = \mathbf{A}^+ \mathbf{Y}. \quad (4.26)$$

Получение псевдообращенной матрицы является стандартной процедурой для большинства математических пакетов. В MATLAB – это функция $p = \text{pinv}(a)$ [28].

Для рассматриваемого примера, файл-программа на языке программирования MATLAB для вычисления псевдообращенной матрицы приведена ниже:

```
f=50; % Промышленная частота, Гц
N=24; % Число выборок за период промышленной частоты
T=1/(N*f); % Период дискретизации
k=3; % Номер высшей гармоники
for n=0:N-1;
    a(n+1,1)=1;
    a(n+1,2)=n*T;
    a(n+1,3)=T^2*n^2;
    a(n+1,4)=sin(2*pi*n/N);
    a(n+1,5)=cos(2*pi*n/N);
    a(n+1,6)=sin(2*pi*k*n/N);
    a(n+1,7)=cos(2*pi*k*n/N);
end;
x=pinv(a); % Получение псевдообращенной матрицы
x_cos=x(4,:); % Коэффициенты ac
x_sin=x(5,:); % Коэффициенты as
```

4. Разработка и реализация элементов программных комплексов с гибкой структурой

В результате матрица коэффициентов $\mathbf{A}_{[24 \times 7]}$ размером 24 строки на 7 столбцов преобразуется в матрицу $\mathbf{A}^+_{[7 \times 24]}$, причем 4-я и 5-я строки этой матрицы представляют собой коэффициенты a_{cn} и a_{sn} цифровых фильтров для определения косинусной и синусной ОС сигнала основной гармоники по выражениям:

$$u_{cn} = \sum_{n=1}^N a_{cn} y(nT); \quad (4.27)$$

$$u_{sn} = \sum_{n=1}^N a_{sn} y(nT). \quad (4.28)$$

Амплитуда сигнала основной гармоники – полезного сигнала для произвольной выборки n определяется как:

$$U_{mn} = \sqrt{u_{sn}^2 + u_{cn}^2}. \quad (4.29)$$

Дискретное преобразование Фурье (ДПФ)

Невозможность точного учета всех аварийных составляющих в сигнале повреждения позволяет предложить минимально возможную по составу элементов модель, в которой содержится только основная гармоника:

$$y(nT) = U_{m1}^c \sin\left(\frac{2\pi n}{N}\right) + U_{m1}^s \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right). \quad (4.30)$$

В этом случае, рассчитанные по аналогии с (4.22), коэффициенты ЦФ полностью совпадают с коэффициентами ЦФ на основе ДПФ:

$$\begin{aligned} u(nT) &= u_c(nT) + ju_s(nT) = \\ &= \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} y(nT) \left[\cos\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) + j \sin\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) \right], \end{aligned} \quad (4.31)$$

где k – номер выделяемой гармоники.

4. Разработка и реализация элементов программных комплексов с гибкой структурой

Выражение (4.31) удобно представить в виде:

$$u(nT) = \sum_{n=0}^{N-1} y(nT)a_{cn} + j \sum_{n=0}^{N-1} y(nT)a_{sn}, \quad (4.32)$$

где a_{cn} и a_{sn} — коэффициенты соответственно косинусного и синусного фильтров.

В практике построения алгоритмов функционирования зарубежных МТЗ широко используются ЦФ на основе **косинусного фильтра (КФ)** [83, 84], коэффициенты которых определяются из действительной части выражения (4.31):

$$a_{cn} = \frac{2}{N} \cos\left(\frac{2\pi kn}{N}\right). \quad (4.33)$$

Наследуя все преимущества ДПФ, косинусный фильтр является практически нечувствительным к аperiodическим составляющим сигнала.

Формирователи ортогональных составляющих

В рассмотренных выше моделях сигнала, количество уравнений превышало число неизвестных. Если зафиксировать конечный интервал наблюдения (окно данных), длительностью порядка одного периода промышленной частоты, и определить в нем четное число выборок сигнала L , то можно сформировать квадратную матрицу размером $L \times L$ и находить коэффициенты ЦФ по выражению (4.24) путем определения обратной матрицы \mathbf{A}^{-1} . В этом случае, модель сигнала строится с учетом того, что ЭЗАС представляется 2-мя членами ряда Тейлора и тогда на основную и высшие гармоники в каждой строке матрицы коэффициентов приходится $M = L - 2$ элемента [85]. Поскольку каждая гармоника сигнала записывается в виде двух ОС, то для четного L максимальная гармоника в сигнале имеет номер $M / 2$:

4. Разработка и реализация элементов программных комплексов с гибкой структурой

$$y(nT) = \sum_{n=0}^{L-1} \left[U_a - U_a \frac{nT}{\tau} + \sum_{k=1}^{M/2} \left(U_{m1}^c \sin\left(\frac{\pi nk}{N}\right) + U_{m1}^s \cos\left(\frac{\pi nk}{N}\right) \right) \right]. \quad (4.34)$$

Файл-программа для расчета коэффициентов ФОС на языке программирования MATLAB приведена ниже. В отличие от вышеприведенной программы, для определения обратной матрицы используется оператор $x = \text{inv}(a)$ [28]:

```
L=24; % Число выборок – четное
T=0.02/24; % Период дискретизации
N=0.02/T; % Число выборок за период основной частоты
for n=0:L-1; % Формирование матрицы коэффициентов
    a(n+1, 1)=1; % Апероодическая
    a(n+1, L)=n*T; % составляющая
for k=2:2:L-2;
    a(n+1, k)=sin(pi*n*k/N); % Гармоники от 1-ой
    a(n+1, k+1)=cos(pi*n*k/N); % до (L-2)/2
end;
end;
x=inv(a); % Вычисление обратной матрицы
x_cos=x(2,:); % Вывод коэффициентов фильтра
x_sin=x(3,:); % в рабочую область MATLAB
```

Если не учитывать наличие ЭЗАС в сигнале, т.е. положить в приведенной программе члены $a(n+1, 1) = 0$ и $a(n+1, L) = 0$, то полученные коэффициенты ФОС x_cos и x_sin будут совпадать с коэффициентами ЦФ ДПФ.

Совершенствование элементной базы МТЗ позволяет учитывать в модели сигнала все большее число высших гармоник, даже тех, влияние которых существенно ослабляется аналоговым ФНЧ. Все это отрицательно сказывается на точности вычисления коэффициентов ЦФ и, в конечном счете, на качестве фильтрации. Поэтому целесообразно включать в модель сигнала гармоники не выше 7–8, а значение остальных принять равными нулю.

4. Разработка и реализация элементов программных комплексов с гибкой структурой

Все рассмотренные выше реализации ЦФ – КФ, ФОС и МНК представляются парой ОС: косинусной и синусной. Из каждой пары можно выбрать одну ОС с наилучшими показателями качества фильтрации. Значения коэффициентов ЦФ для выбранной ОС при количестве выборок $N = 24$ приведены в табл. 4.6.

Таблица 4.6

Коэффициенты цифровых фильтров

Номер выборки	КФ	ФОС	МНК
1	0,0833	0,0000	-0,1407
2	0,0805	0,1638	-0,0690
3	0,0722	-0,0112	-0,0129
4	0,0589	0,1423	0,0146
5	0,0417	-0,0417	0,0200
6	0,0216	0,1049	0,0229
7	0,0000	-0,0833	0,0420
8	-0,0216	0,0618	0,0823
9	-0,0417	-0,1250	0,1301
10	-0,0589	0,0244	0,1603
11	-0,0722	-0,1555	0,1511
12	-0,0805	0,0028	0,0969
13	-0,0833	-0,1667	0,0127
14	-0,0805	0,0028	-0,0727
15	-0,0722	-0,1555	-0,1315
16	-0,0589	0,0244	-0,1505
17	-0,0417	-0,1250	-0,1363
18	-0,0216	0,0618	-0,1085
19	0,0000	-0,0833	-0,0859
20	0,0216	0,1049	-0,0733
21	0,0417	-0,0417	-0,0571
22	0,0589	0,1423	-0,0123
23	0,0722	-0,0112	0,0830
24	0,0805	0,1638	0,2346

4. Разработка и реализация элементов программных комплексов с гибкой структурой

Вторая ОС определяется путем явного или вычисляемого сдвига выходного сигнала ЦФ на угол $\pi/2$. Явный сдвиг реализуется путем задержки выходного сигнала выбранного ЦФ на $N/4$ выборки (N – четное число).

Вычисление второй ОС по известной первой реализуется использованием двух выборок первой (известной) ОС – текущей u_n и предыдущей u_{n-1} , зафиксированных через период дискретизации T [85]. Тогда значение амплитуды полезного сигнала может быть определено по выражению:

$$U_{mkn} = \frac{\sqrt{u_n^2 + u_{n-1}^2 - 2u_n u_{n-1} \cos\left(\frac{2\pi kn}{N}\right)}}{\sin\left(\frac{2\pi kn}{N}\right)}. \quad (4.35)$$

К достоинствам использования выражения (4.35) следует отнести минимальную вносимую задержку в один период дискретизации T при определении амплитуды полезного сигнала, а также принципиальную невозможность обращения знаменателя в нуль.

4.3.2. Реализация моделей измерительных органов тока в Simulink

Измерительные органы (ИО) тока имеют схожую структуру в зависимости от назначения МПТЗ.

Модель типового ИО тока, разработанного и реализованного в Simulink, приведена на рис. 4.15 [86, 87].

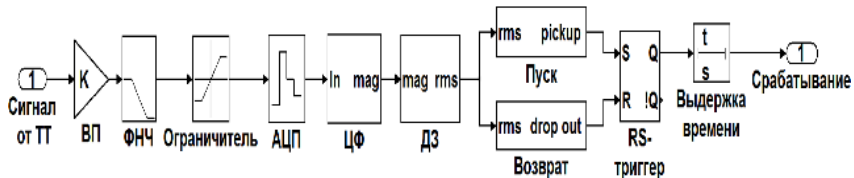


Рис. 4.15. Разработанная модель типового измерительного органа тока

4. Разработка и реализация элементов программных комплексов с гибкой структурой

Входной преобразователь (блок ВП) предназначен для преобразования вторичного тока ТТ в пропорциональное напряжение заданного уровня, определяемое техническими характеристиками применяемых электронных компонентов МТЗ. ВП также обеспечивает гальваническую развязку между внешними и внутренними цепями устройства.

Физически ВП реализуется на базе малогабаритного промежуточного ТТ с экраном между первичной и вторичной обмотками. Вторичная обмотка такого ТТ нагружена на сопротивление определенного значения, зависящего как от параметров самого промежуточного ТТ, так и от напряжения насыщения операционных усилителей (ОУ) на базе которых реализовывается последующий компонент ИО тока МТЗ. Многочисленные испытания [88] показали, что ВП существенно не влияет на точность преобразования входного сигнала, поэтому блок ВП представляется блоком усиления сигнала «Gain». Параметром блока является значение отношения заданного значения напряжения к максимально возможному значению вторичного тока ТТ.

В соответствии с теоремой Найквиста [89] сигнал, подаваемый на вход аналого-цифрового преобразователя (блок АЦП), должен проходить через фильтр низших частот (блок ФНЧ) для подавления компонентов, частота которых превышает половину частоты дискретизации. Физически ФНЧ второго порядка обычно реализуется на базе ОУ. Блок ФНЧ представляется блоком модели «2nd-Order Filter». Основным параметром блока является значение частоты среза.

Ограничитель напряжения (блок Ограничитель) предназначен для ограничения значения входного напряжения АЦП, допустимое значение которого обычно меньше значения напряжения насыщения ОУ в ФНЧ. Блок Ограничитель представляется блоком «Saturation». Параметрами блока являются значения верхнего и нижнего пределов ограничения входного сигнала.

АЦП предназначен для дискретизации выходного непрерывного сигнала ФНЧ. Блок АЦП представляется блоком «Zero-Order Hold». Параметром блока является отношение значения периода промышленной частоты к значению числа выборок за данный период.

4. Разработка и реализация элементов программных комплексов с гибкой структурой

Представление ЦФ может различаться в зависимости от его реализации:

– блоком модели «Discrete Fourier», которым осуществляется одно-периодное ДПФ (рис. 4.16). Параметрами блока являются: значение промышленной частоты, номер гармоники, значение амплитуды которой подлежит определению, и отношение значения периода промышленной частоты к значению числа выборок за данный период;

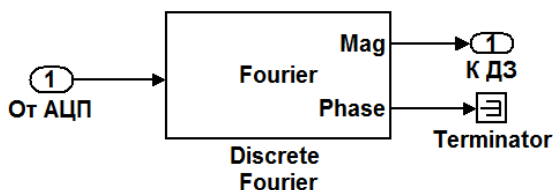


Рис. 4.16. Представление ЦФ блоком модели Discrete Fourier

– двумя блоками моделей «Digital Filter», которыми осуществляется определение косинусной и синусной ОС совместно с дополнительными блоками «Gain», «Math Function», «Sum» и «Sqrt», осуществляющими нормирование, возведение в квадрат, суммирование, извлечение квадратного корня соответственно (рис. 4.17). Основными параметрами блоков «Digital Filter» являются предварительно рассчитанные коэффициенты ЦФ для косинусной (1-й блок модели «Digital filter») и синусной (2-й блок модели «Digital filter») ОС. Параметром блока «Gain» является значение отношения $2 / N$. Блоки «Math Function», «Sum» и «Sqrt» параметров не имеют;

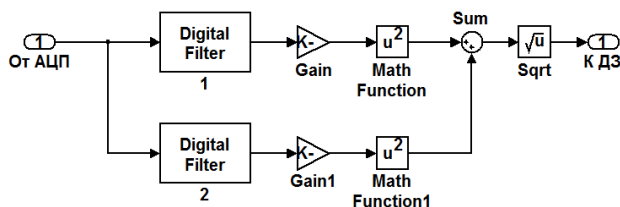


Рис. 4.17. Представление ЦФ двумя блоками моделей Digital Filter совместно с дополнительными блоками

4. Разработка и реализация элементов программных комплексов с гибкой структурой

– блоком модели «Digital Filter», которым осуществляется определение одной из ОС совместно с вышеописанными дополнительными блоками и блоком «Delay», который осуществляет задержку выходного сигнала блока модели «Digital Filter» на четверть периода промышленной частоты (рис. 4.18). Основным параметром блока модели «Digital Filter» являются предварительно рассчитанные коэффициенты ЦФ для одной из ОС. Основным параметром блока «Delay» является значение отношения $N / 4$;

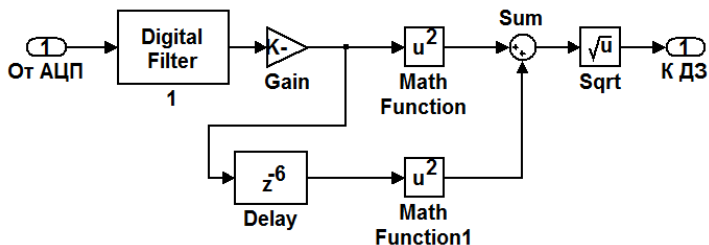


Рис. 4.18. Представление ЦФ блоком модели Digital Filter совместно с дополнительными блоками

– блоком модели «Digital Filter», которым осуществляется определение одной из ОС совместно с вышеописанными дополнительными блоками, реализующим выражение (4.35) (рис. 4.19). Основным параметром блока «Digital Filter» являются предварительно рассчитанные коэффициенты ЦФ для одной из ОС.

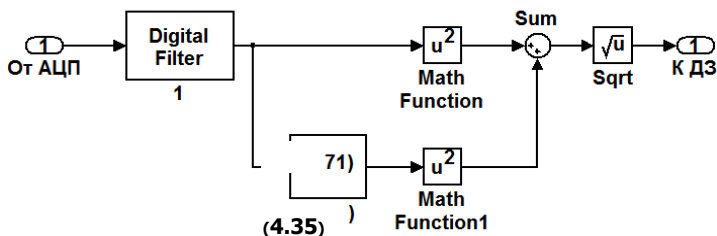


Рис. 4.19. Представление ЦФ блоком модели Digital Filter совместно с дополнительными блоками, реализующими выражение (4.35)

4. Разработка и реализация элементов программных комплексов с гибкой структурой

Определение действующего значения (ДЗ) по значению амплитуды выходного сигнала ЦФ осуществляется блоком ДЗ, который представляется блоком «Gain». Параметром блока является значение $1/\sqrt{2}$.

Для надежного функционирования ИО тока необходимо, чтобы условие его пуска (возврата) выполнялось в течение времени, равного $3T-5T$. Это условие представляется разработанными блоками Пуск и Возврат. Если условие пуска (возврата) выполняется (не выполняется), то на выходе соответствующего блока формируются логические сигналы 1 (0). Сигнал с выхода блока Пуск поступает на S-вход (установить), а сигнал с выхода блока Возврат – на R-вход (сбросить) RS-триггера, представленного блоком модели «S-R Flip-Flop». Прямой выход RS-триггера Q подключается к блоку Выдержка времени, представленного блоком «Discrete On/Off Delay», который начинает отсчет выдержки времени (при условии ее задания), если на его входе присутствует логическая 1. Такое условие возникает тогда, когда действующее значение полезного сигнала превышает значение уставки пуска. Если это условие будет выполняться в течение всей выдержки времени, то на выходе блока Выдержка времени установится логическая 1, являющаяся признаком срабатывания ИО тока. Если за время отсчета выдержки времени действующее значение полезного сигнала станет ниже значения уставки возврата, то ИО тока вернется в исходное состояние, на выходе RS-триггера установится логический 0 и срабатывание ИО тока не произойдет.

В отличие от реальных ИО тока их модели не накладывают никаких физических ограничений, связанных с техническими параметрами используемых электронных компонентов. Поэтому, представленные далее реализации моделей ИО тока не содержат блоков Ограничитель и ВП.

4.3.3. Блок модели измерительного органа тока для функционирования в условиях глубокого насыщения магнитопровода трансформаторов тока

После возникновения в ОЭО аварийного режима, в контролируемом ЦФ сигнале, в течение нескольких периодов промышленной частоты может присутствовать ЭЗАС, являющаяся причиной насыщения ТТ. В этом случае вторичный ток ТТ будет иметь характер-

4. Разработка и реализация элементов программных комплексов с гибкой структурой

ную непериодическую искаженную форму, существенно отличающуюся от формы его первичного тока (рис. 3.11), что приводит к занижению значения амплитуды полезного сигнала, определяемого ЦФ, по сравнению с истинным значением.

Одним из путей решения этой проблемы является использование ИО тока, функционирующего в зависимости от степени насыщения ТТ.

В [90] рассматривается ИО тока, разработанный ведущим центром в области проектирования МПЗ Schweitzer Engineering Laboratories (SEL). Контролируемый сигнал в ИО (вторичный ток ТТ), проходит по основному и дополнительному каналам. Оба канала управляются виртуальным переключателем. Основной канал функционирует в доаварийном режиме или при незначительной степени насыщения ТТ и состоит из цифрового косинусного фильтра. Дополнительный канал функционирует при глубокой степени насыщения ТТ и содержит быстродействующий биполярный пиковый детектор. Биполярный пиковый детектор позволяет определять ориентировочное значение амплитуды контролируемого сигнала как полусумму абсолютных значений максимума положительной и минимума отрицательной его полуволн.

Степень насыщения ТТ определяется по индексу искажения DI в соответствии с выражением:

$$DI = 1 + \sqrt{\frac{2I^2 - I_{m1}^2}{I_{m1}^2}} = 1 + THD, \quad (4.36)$$

где I – действующее значение вторичного тока ТТ;

I_{m1} – значение амплитуды основной гармоники;

THD – коэффициент нелинейных искажений сигнала:

$$THD = \sqrt{\frac{2I^2 - I_{m1}^2}{I_{m1}^2}}. \quad (4.37)$$

Проведенными SEL исследованиями [90] установлено, что пороговое значение индекса искажения, при котором происходит переключение каналов $DI_{\max} = 1,75$. Значение $DI < 1,75$ свидетельствует о незна-

4. Разработка и реализация элементов программных комплексов с гибкой структурой

чительной степени насыщения ТТ, и в этом случае, значение амплитуды полезного сигнала – основной гармоники I_{m1} , определяется ЦФ на основе КФ. Значение $DI > 1,75$ свидетельствует о глубокой степени насыщения ТТ, и в этом случае, значение амплитуды контролируемого сигнала определяется биполярным пиковым детектором.

Для отстройки от возможных кратковременных превышений индексом искажения DI максимального значения, используется таймер, который управляет переключателем.

Однако рассмотренный ИО тока обладает рядом недостатков. При наличии апериодической составляющей в токе повреждения, положительные и отрицательные полуволны сигнала значительно отличаются друг от друга по амплитуде, что приводит к затягиванию времени установления сигнала на выходе биполярного пикового детектора. Кроме того, вблизи порога переключения таймер блокирует включение быстродействующего канала пикового детектора и амплитуда сигнала определяется ЦФ на основе КФ.

В силу вышеизложенного, для повышения быстродействия ИО тока и упрощения его реализации, предлагается формировать его выходной сигнал в виде непрерывного эквивалентного сигнала $I_{eq} = f(THD, I)$, который является функцией действующего значения и коэффициента нелинейных искажений контролируемого сигнала [91, 92]. Коэффициент нелинейных искажений THD учитывает все высшие гармоники, присутствующие в контролируемом сигнале. При этом отпадает необходимость в использовании переключателя каналов.

Как следует из выражения (3.72), для значения $DI_{max} = 1,75$ пороговое значение коэффициента нелинейных искажений THD_{max} будет на 1 меньше, т. е. $THD_{max} = 0,75$. Причем, целесообразно формировать значение эквивалентного сигнала так, чтобы при незначительной степени насыщения ТТ (значение THD находится в диапазоне от 0 до 0,3) оно незначительно отличалось от значения действующего значения контролируемого сигнала $I_{eq} \approx I$, а при глубокой степени насыщении ТТ ($THD > 0,75$) выполнялось условие $I_{eq} \gg I$. При неопределенной степени насыщения ТТ (значение THD находится в диапазоне от 0,3 до 0,75) должно выполняться условие $I_{eq} > I$, т. е. эквивалентный сигнал должен плавно нарастать.

4. Разработка и реализация элементов программных комплексов с гибкой структурой

Наиболее простая нелинейная зависимость, позволяющая выполнить указанные условия:

$$I_{meq} = (THD^2 + 1)I_{m1} , \quad (4.38)$$

где I_{meq} – значение амплитуды эквивалентного сигнала.

С учетом выражений (4.36) и (4.38), значение амплитуды эквивалентного сигнала вычисляется как $I_{meq} = \frac{2I^2}{I_{m1}}$, а его действующее значение:

$$I_{eq} = \frac{I_{meq}}{\sqrt{2}} = \sqrt{2} \frac{I^2}{I_{m1}} = I \frac{I_m}{I_{m1}} , \quad (4.39)$$

где I_m – амплитуда контролируемого сигнала.

При этом, значение k , равное отношению значения амплитуды контролируемого сигнала к значению амплитуды основной гармоники, может быть определено как:

$$k = \frac{I_m}{I_{m1}} = \sqrt{THD^2 + 1} . \quad (4.40)$$

В аварийных режимах, сопровождающихся насыщением ТТ, целесообразно ограничивать получаемое значение I_{eq} из-за его неконтролируемого возрастания за счет резкого увеличения состава высших гармоник вторичного тока ТТ. Так, при $THD_{max} = 0,75$, $k = 1,25$, а при глубокой степени насыщения ТТ величина k становится много большей указанного значения. На рис. 4.20 представлена зависимость $k = f(THD)$, построенная по (4.40), для которой значение k ограничивается на уровне $\sqrt{3}$ при $THD \geq \sqrt{2}$.

Модель, разработанного и реализованного в Simulink, ИО тока приведена на рис. 4.21.

4. Разработка и реализация элементов программных комплексов с гибкой структурой

Для определения амплитуды сигнала основной гармоники (контролируемого сигнала) используется блок ЦФ1, реализованный аналогично ЦФ, рассмотренным в п. 4.3.2.

ЦФ для определения действующего значения контролируемого сигнала (блок ЦФ2) представляется блоком модели «Digital Filter» совместно с дополнительными блоками. Основными параметрами блока «Digital Filter» являются коэффициенты ЦФ равные 1.

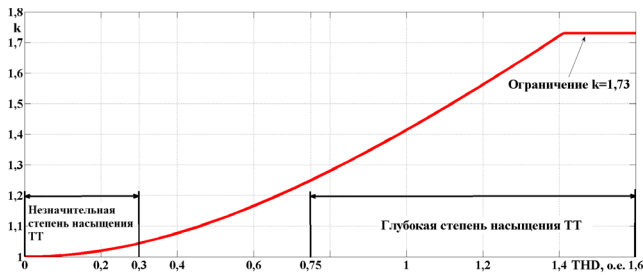


Рис. 4.20. Представление зависимости $k = f(THD)$

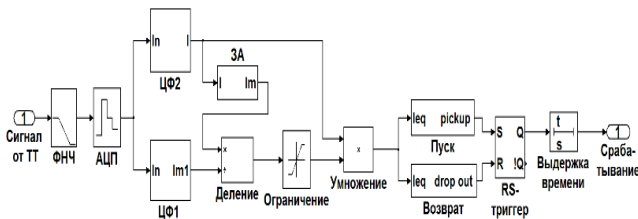


Рис. 4.21. Модель ИО тока для функционирования в условиях глубокого насыщения магнитопровода трансформаторов тока

Определение значения амплитуды (блок ЗА) по действующему значению выходного сигнала блока ЦФ2 представляется блоком «Gain». Параметром блока является значение $\sqrt{2}$.

Блоки Деление и Умножение представляются блоками «Divide» и «Product» соответственно. Данные блоки параметров не имеют.

Ограничение значения отношения амплитуд (блок Ограничение) представляется блоком «Saturation». Параметром блока является значение $\sqrt{3}$.

4. Разработка и реализация элементов программных комплексов с гибкой структурой

Результатом функционирования модели разработанного ИО тока является формирование на выходе блока Умножение действующего значения эквивалентного сигнала I_{eq} . Дальнейшее функционирование предложенного ИО тока аналогично ранее рассмотренному.

4.4. Функциональные испытания моделей измерительных органов тока

4.4.1. Испытания блоков моделей цифровых фильтров в составе типового измерительного органа тока, разработанных в Simulink

Распространенным тестовым воздействием для ЦФ является сигнал основной гармонике в сочетании с ЭЗАС. Такой сигнал, в первом приближении, отображает простейший сигнал тока в аварийном режиме функционирования ОЭО.

На рис. 4.22 приведена реакция трех ЦФ (ЦФ на основе МНК, ЦФ на основе КФ и ЦФ на основе ФОС) на тестовое воздействие вида:

$$y(nT) = e^{-\frac{nT}{\tau}} + \sin\left(\frac{2\pi n}{N}\right), \quad (4.41)$$

где $N = 24$, $\tau = 0,05$ с, $T = 0,02 / N$.

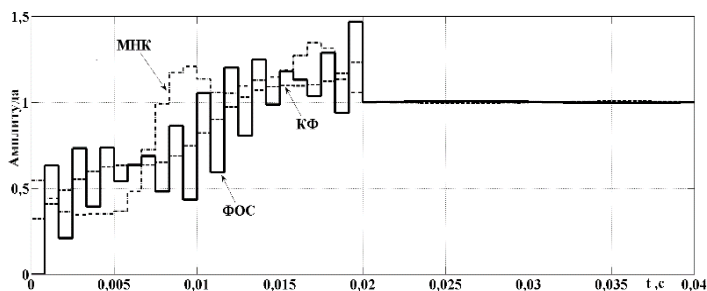


Рис. 4.22. Определение значения амплитуды основной гармоники сигнала ЦФ

4. Разработка и реализация элементов программных комплексов с гибкой структурой

Все ЦФ достоверно определяют значение амплитуды такого тестового воздействия за время, равное длительности одного периода промышленной частоты.

В действительности, информация о режиме функционирования ОЗО передается в МПТЗ через ТТ. Поэтому проверку функционирования ЦФ целесообразно производить тестовым воздействием, приближенным по своей форме ко вторичному току ТТ [81].

Проверка функционирования разработанных в Simulink блоков моделей ЦФ проводится путем подачи на их входы тестовых воздействий – искаженного сигнала вторичного тока ТТ, вследствие его насыщения. Для этого в Simulink-SimPowerSystems разработан ИПК Digital Filter (см. рис. 3.13).

Осциллограммы тестового воздействия – вторичного тока ТТ фазы A трехфазной группы ТТ отличаются по форме от приведенного ко вторичной стороне первичного тока фазы A (см. рис. 3.11). Гармонический состав первичного и вторичного токов ТТ (см. рис. 3.11) за 5 периодов промышленной частоты представлен на рис. 4.23.

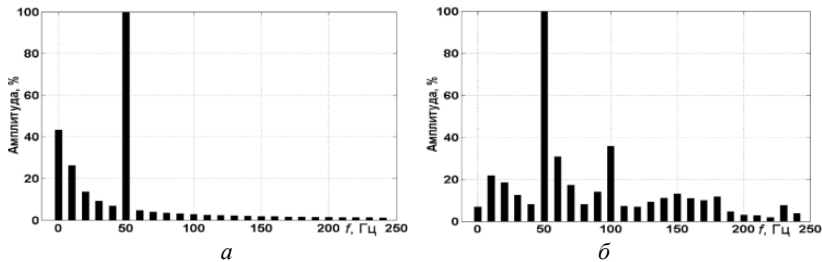


Рис. 4.23. Гармонический состав токов ТТ (см. рис. 3.11):
 a – первичный ток ТТ; b – вторичный ток ТТ

Спектр экспоненциального сигнала вида $y(t) = U_a e^{\frac{t}{\tau}}$ находится с помощью одностороннего преобразования Фурье [93]:

$$F(j\omega) = \int_0^{\infty} U_a e^{\frac{t}{\tau}} e^{j\omega t} dt = \frac{U_a}{\frac{1}{\tau} + j\omega}. \quad (4.42)$$

4. Разработка и реализация элементов программных комплексов с гибкой структурой

Модуль этой функции дает спектр амплитуд (спектральную плотность) сигнала:

$$A(\omega) = \frac{U_a \tau}{\sqrt{\omega^2 \tau^2 + 1}}. \quad (4.43)$$

Амплитудный спектр имеет вид убывающей функции, которая содержит непрерывный спектр частот $\omega = 0, \dots, \infty$. При этом большая часть энергии сигнала сосредоточена в частотном диапазоне вблизи нулевой частоты.

Характерной особенностью искаженного вторичного тока ТТ является наличие в нем интергармоник (гармоник, не кратных основной), которые не учитываются ни в одной известной реализации ЦФ.

На рис. 4.24 показано изменение во времени значения амплитуды основной гармоники 50 Гц и двух составляющих тестового воздействия с наибольшими амплитудными спектрами из рис. 3.11: 2-й гармоники с частотой 100 Гц и интергармоники с частотой 60 Гц. По мере затухания ЭЗАС, составляющая основной гармоники стремится к установившемуся значению, равному значению амплитуды тестового воздействия, а составляющие с частотами 60 Гц и 100 Гц стремятся к нулевому значению.

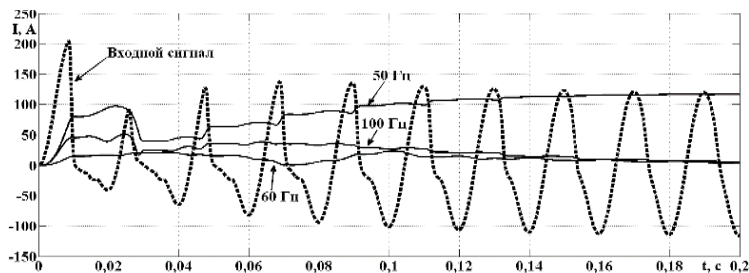


Рис. 4.24. Определение ЦФ амплитуд гармонических составляющих искаженного сигнала

Необходимо отметить, что путем математического и физического моделирования одиночных ТТ установлено, что их преобразовательные свойства в линейных режимах работы достаточно точно

4. Разработка и реализация элементов программных комплексов с гибкой структурой

отображаются передаточной функцией полосового частотного фильтра [93]. Поэтому гармонический состав вторичного тока ТТ вблизи нулевой частоты ослабляется самим ТТ, что при прочих равных условиях, способствует правильной работе ЦФ.

ТТ обеспечивает передачу неискаженного вторичного тока к МТЗ только в случае гармонического характера тока аварийного режима, действующее значение которого не превышает допустимого, и величине вторичной нагрузки равной или менее номинальной. Поэтому ЦФ должен не столько отстраиваться от ЭЗАС тока аварийного режима, сколько, по возможности, правильно работать при искаженном вторичном токе ТТ, вследствие его насыщения.

Процесс установления выходного сигнала ЦФ на основе МНК, КФ и ФОС при исключении из структуры модели (см. рис. 3.13) ФНЧ представлен на рис. 4.25, *a*.

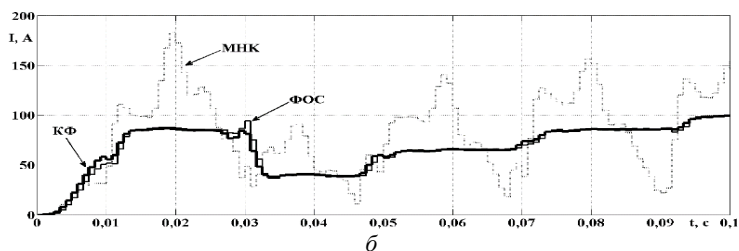
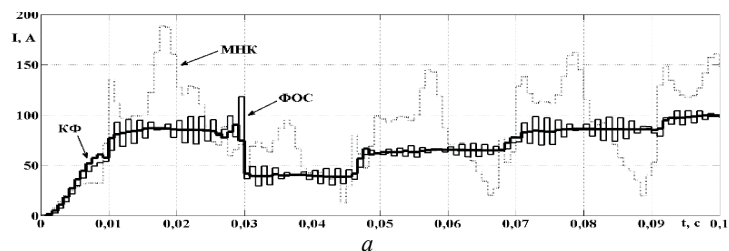


Рис. 4.25. Процесс установления выходного сигнала в ЦФ:
a – без использования ФНЧ; *б* – с использованием ФНЧ

ЦФ на основе МНК демонстрирует наихудшие показатели качества и не может быть рекомендован к использованию в МТЗ. Повышенные биения выходного сигнала ФОС существенно ослабляются,

4. Разработка и реализация элементов программных комплексов с гибкой структурой

если сигнал предварительно проходит через ФНЧ (рис. 4.25, б). Наиболее достоверно значение амплитуды основной гармоники тестового воздействия определяется ЦФ на основе КФ.

4.4.2. Испытания блока модели измерительного органа тока для функционирования в условиях глубокого насыщения трансформаторов тока

Проверка функционирования разработанного в Simulink типового ИО тока (см. рис. 4.21) проводилась путем подачи на его вход тестовых воздействий – искаженного сигнала вторичного тока ТТ, вследствие его насыщения [19]. Для исследования работы ИО тока в условиях глубокого насыщения магнитопроводов ТТ в Simulink-SimPowerSystems была разработана модель со структурой, приведенной на рис. 4.26.

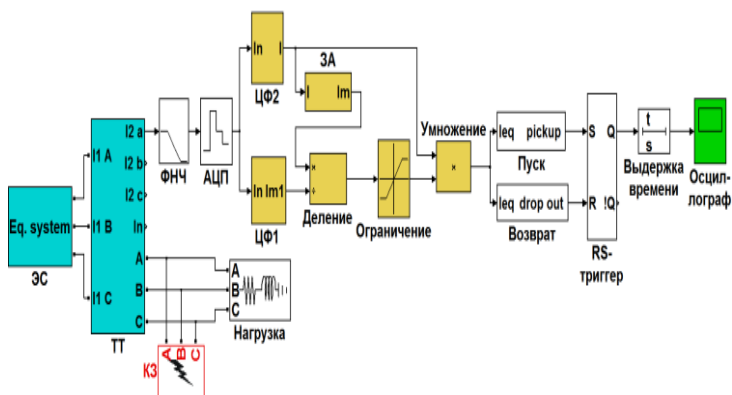


Рис. 4.26. Модель для проверки функционирования ИО тока в условиях глубокого насыщения ТТ

На рис. 4.27 приведены результаты расчетов, полученные с использованием представленной модели. В промежутке времени $t = 0,0-0,02$ с длится доаварийный режим при котором вторичный ток ТТ синусоидален и значение коэффициента нелинейных искажений THD равно нулю. В момент времени $t = 0,02$ с происходит

4. Разработка и реализация элементов программных комплексов с гибкой структурой

КЗ – аварийный режим, форма вторичного тока ТТ искажается (кривая 1), по сравнению с формой идеально трансформируемого тока (кривая 2). При этом, изменяется во времени значение коэффициента THD (кривая 3), которое в первый момент времени после КЗ достигает своего максимального значения, а затем, по мере затухания ЭЗАС, уменьшается до нуля. При этом, значения THD , которые для наглядности выражены в процентах, превышают пороговое значение $THD_{max} = 75\%$ (кривая 4) в течение времени примерно равного 1,5 периодом промышленной частоты ($t = 0,023–0,055$ с).

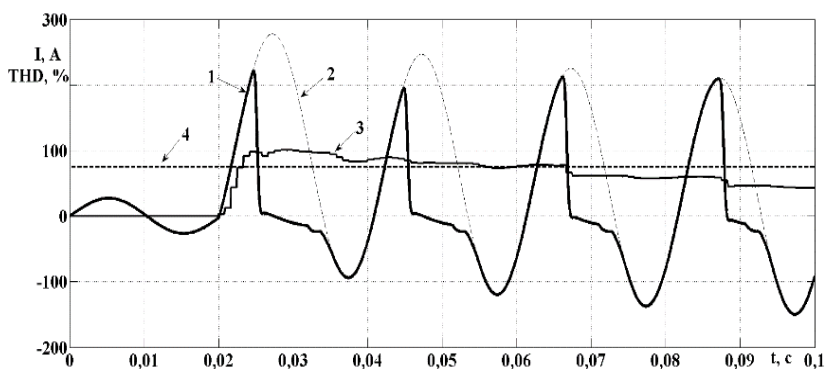


Рис. 4.27. Результаты функционирования ИО тока в условиях глубокого насыщения ТТ:

- 1 – изменение во времени вторичного тока ТТ;
- 2 – изменение во времени приведенного ко вторичной стороне первичного тока;
- 3 – изменение во времени значения коэффициента THD ;
- 4 – пороговое значение $THD_{max} = 75\%$

На рис. 4.28 приведен результат работы предложенного ИО тока (кривая 1) в сравнении с типовым ИО тока (кривая 2). В промежутке времени $t = 0,00–0,04$ с длится доаварийный режим, при котором каждый ИО достоверно определяет действующее значение контролируемого сигнала – синусоидального вторичного тока ТТ. В момент времени $t = 0,04$ с происходит КЗ – аварийный режим, а в момент времени $t = 0,044$ с магнитопровод ТТ входит в глубокое насыщение. Форма вторичного тока ТТ (кривая 3) значительно искажается.

4. Разработка и реализация элементов программных комплексов с гибкой структурой

В предложенном ИО тока с момента времени $t = 0,04$ наблюдается резкое увеличение значения THD , а, следовательно, и определяемого действующего значения эквивалентного сигнала I_{eq} . В момент времени $t = 0,044$ с значение I_{eq} начинает превышать уставку срабатывания (кривая 4), в отличие от действующего значения полезного сигнала, определяемого типовым ИО тока, т. к. из-за искаженной формы сигнала вторичного тока ТТ (контролируемого сигнала), оно оказывается существенно заниженным, по сравнению с его истинным значением. Поэтому действующее значение сигнала, определяемое типовым ИО тока, начинает превышать уставку срабатывания по мере уменьшения степени насыщения ТТ, что происходит только в момент времени $t = 0,087$ с.

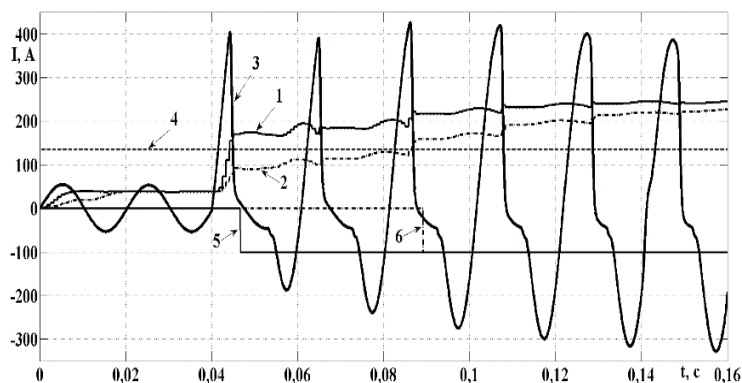


Рис. 4.28. Результат функционирования предложенного ИО тока в сравнении с типовым ИО тока:

- 1 – выходной сигнал разработанного ИО тока;
- 2 – выходной сигнал типового ИО тока; 3 – изменение во времени вторичного тока ТТ; 4 – уставка срабатывания;
- 5 – срабатывание предложенного ИО тока;
- 6 – срабатывание типового ИО тока

После того как определяемые значения превысят уставки срабатывания, проверяется выполнение этого условия в течение времени, равного 3-м последовательным выборкам. В момент времени $t = 0,046$ с происходит срабатывание разработанного ИО тока (сту-

4. Разработка и реализация элементов программных комплексов с гибкой структурой

пенчатое изменение кривой 5), а срабатывание типового ИО тока происходит в момент времени $t = 0,089$ с (ступенчатое изменение кривой 6). Таким образом, быстродействие разработанного ИО тока в рассмотренном случае, как минимум на 2 периода промышленной частоты выше, чем у типового ИО тока.

По мере уменьшения степени насыщения ТТ, форма его вторичного тока приближается к синусоидальной, а разница между определяемыми значениями сравниваемых ИО уменьшается, становясь со временем равной нулю.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На современном этапе развития энергетики активно создаются и внедряются в эксплуатацию микропроцессорные защиты электроэнергетического оборудования с изменяемыми алгоритмами функционирования. Цифровые устройства релейной защиты получают массовое распространение в распределительных сетях и на трансформаторных подстанциях. Это обуславливает необходимость их исследований и испытаний, как на этапе разработки, так и в начальный период эксплуатации.

В монографии рассмотрены вопросы комплексного подхода к исследованию и испытанию микропроцессорных токовых защит и их цифровых устройств. Основным методом исследования принят метод математического моделирования, а проведение испытаний основано на методе вычислительного эксперимента.

Материалы, собранные в монографии, получены в процессе выполнения трех научных тем, выполненных на кафедре «Электрические станции» по Государственной Программе Научных Исследований (ГПНИ) Республики Беларусь в период с 2014 года по 2020 год [94–96].

В ходе выполнения тем ГПНИ разработаны КПК на основе жесткой структуры моделей для исследований методом вычислительного эксперимента аварийных режимов линий электропередач, двух- и трехобмоточных силовых трехфазных трансформаторов, блочных трансформаторных подстанций 6(10) / 0,4 кВ, асинхронных электродвигателей. Разработанные КПК могут быть использованы при испытаниях релейных защит с применением расчетных тестовых информационных сигналов, подаваемых на испытываемую защиту с помощью испытательной установки в составе ИПАК.

Также разработаны ИПК для проведения исследований методом вычислительного эксперимента функциональных свойств проектируемых токовых защит и их цифровых устройств. Рассмотренные в монографии ИПК разработаны с использованием гибкой структуры моделей в системе динамического моделирования MATLAB-Simulink.

Результаты исследований представленных в монографии отражены в статьях, докладах и тезисах научных журналов и конференций, в двух главах коллективных монографий [7, 19], в четырех магистерских и одной кандидатской диссертациях [35], получены пять свидетельств о регистрации компьютерных программ, один патент на изобретение.

Благодаря разрабатываемым компьютерным программным и испытательным комплексам вычислительный эксперимент превращается в эффективный инструмент исследования электромагнитных процессов электроэнергетических установок и испытаний релейных защит и их моделей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. БНТУ. 100 лет истории / К. И. Баландин [и др.]. – Минск : БНТУ, 2020. – 244 с. – ISBN 978-985-583-583-8
2. Разработка программного обеспечения аппаратно-диагностического комплекса для функциональных испытаний микропроцессорных токовых защит линий 6–35 кВ : отчет о НИР. ХД № 287/112д-06 (заключ.) / БГПА. – Минск, 2002. – 130 с.
3. Испытания микропроцессорных устройств релейной защиты: настоящее и будущее [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://relay-protection.ru/index2.php?option=comcontent&task=view&id=90&pop=1&page=0&Itemid=11/>. – Дата доступа : 8.03.2016.
4. Сайт научно-производственного предприятия «Динамика» [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.dynamics.com.ru/>. – Дата доступа : 8.03.2016.
5. Сайт компании «OMICRON» [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://www.omicronenergy.com/ru/>. – Дата доступа : 8.03.2016.
6. Сайт компании «EnnLAB» [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://ennlab.ru/rus>. – Дата доступа : 8.03.2016.
7. Новаш, И. В. Цифровое моделирование и вычислительный эксперимент – перспективные технологии для разработки и испытаний устройств релейной защиты / И. В. Новаш, Ф. А. Романюк // В кн. Перспективные материалы и технологии: монография. В 2-х т. Т. 2 / А. В. Алифанов [и др.] под ред. В. В. Клубовича. – Витебск : УО «ВГТУ», 2017. – С. 471–490.
8. Законьшек, Я., Цифровое моделирование современных энергосистем в реальном времени / Законьшек Я., Славутский А. Л. // Релейная защита и автоматизация. – 2012. – № 01. – С. 66–72.
9. Мочалов, Д. О. Комплексы моделирования в реальном времени для современных энергосистем / Мочалов Д. О., Законьшек Я. В., Шамис М. А. // Релейная защита и автоматизация. – 2013. – № 01(10). – С. 70–74.
10. Сайт «Цифровая подстанция» [Электронный ресурс]. Янез Законшек. Моделирование энергосистем в реальном времени. Пуб-

ликация от 02.12.2013. – Режим доступа : <http://digitalsubstation.ru/blog/2013/12/02/modelling/#more-5206> – Дата доступа : 18.02.2017.

11. Dommel, H. W. «Digital Computer Solution Of Electromagnetic Transients In Single- And Multiphase Networks», Ieee Trans. On Power Apparatus And Systems, Vol. Pas-88, No.4, Pp. 388–399, April 1969.

12. Сайткомпании RTDS Technologies Inc. Kanada [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.rtds.com> – Дата доступа : 26.11.2016.

13. Сайт ЗАО «ЭнЛАБ» [Электронный ресурс]. Полина Гуркова. RTDS установлен в Томском политехническом университете. – Режим доступа : <http://www.enlab.ru/rus/articles/18>. – Дата доступа : 18.02.2017.

14. Сидволл, К. Об опыте использования симуляторов реального времени крупными энергокомпаниями / Сидволл К., Шамис М. А. // ЭнергоStyle. – 2015. – № 03. – С. 20–21.

15. Сайт «Цифровая подстанция» [Электронный ресурс]. Александр Головин. RTDS на кафедре РЗиАЭС НИУ МЭИ. – Режим доступа : <http://digitalsubstation.com/blog/2011/11/23/rtds-na-kafedre-rziae-s-me-i-tu/> – Дата доступа : 18.02.2017.

16. Сайт научно-производственного предприятия «Динамика» [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.dynamics.com.ru/>. – Дата доступа : 8.03.2016.

17. Новаш, И. В. Моделирование энергосистем и испытание устройств релейной защиты в режиме реального и модельного времени / И. В. Новаш // Энергетика. Изв. высш. учеб.заведений и энерг. объединений СНГ. – 2017 – № 3 (60). – С. 198–210.

18. Новаш, И. В. Математическое моделирование коммутационных режимов в электроустановках с трансформаторами / И. В. Новаш, Ф. А. Романюк. – Минск : БНТУ, 2013. – 226 с. – ISBN 978-985-550-236-5.

19. Романюк, Ф. А. Перспективные технологии реализации микропроцессорных защит линий распределительных сетей / Ф. А. Романюк, И. В. Новаш, В. Ю. Румянцев, Ю. В. Румянцев // Перспективные материалы и технологии: монография : в 2 т. – Т. 1 / под ред. В. В. Клубовича. – Витебск : УО «ВГТУ», 2015. – С. 115–139.

20. Романюк, Ф. А. Информационное обеспечение вычислительного эксперимента в релейной защите и автоматике энергосистем / Ф. А. Романюк, В. И. Новаш. – Минск : ВУЗ-ЮНИТИ, 1998. – 174 с.

21. Romanyuk, F. Validation of mathematical model of differential protection / F. Romanyuk, I. Novash, M. Loman, P. Węgierek, M. Szrot // *Przegląd elektrotechniczny*. – 2014. – № 3. – P. 187–190.

22. Ломан, М. С. Микропроцессорная защита силовых понижающих трансформаторов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02 / М. С. Ломан; Белорусский нац. техн. у-нт. – Минск, 2015. – 25 с.

23. SimPowerSystems. User's Guide. The MathWorks, Inc. – 2012. – 411 p.

24. Дэбни, Дж. Simulink 4. Секреты мастерства / Дж. Б. Дэбни, Т. Л. Харман; Пер. с англ. – М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2003. – 403 с.

25. Романюк, Ф. А. Использование цифрового моделирования для разработки и испытаний устройств релейной защиты / Ф. А. Романюк, И. В. Новаш, В. Ю. Румянцев, М. А. Шевалдин // *Энергетическая стратегия*. – 2017. – № 1 (55). – С. 46–49.

26. IEEE Standard. Common Format for Transient Data Exchange (COMTRADE) for Power Systems // Power Systems Relay Committee of the IEEE Power Engineering Society

27. Румянцев, Ю. В. Комплексная модель для исследования функционирования цифровой дифференциальной защиты силового трансформатора / Ю. В. Румянцев // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. – 2016. – № 3. – С. 203–224.

28. Дьяконов, В. П. MATLAB и Simulink для радиоинженеров / В. П. Дьяконов – М. : ДМК_Пресс, 2011. – 975 с.

29. Новаш, И. В. Реализация математической модели трехфазной группы трансформаторов тока в системе динамического моделирования / И. В. Новаш, Ю. В. Румянцев // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. – 2014. – № 3. – С. 19–28.

30. Макаров Е. Г. Mathcad : Учебный курс (+CD). – СПб. : Питер, 2009. – 384 с. : ил.

31. Новаш, И. В., Гармонический анализ токов и напряжений, полученных в результате вычислительного эксперимента. / И. В. Новаш, А. А. Мазуренко, А. В. Куцыло // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. – 2011. – № 2. С. 11–15.

32. Математическое моделирование и вычислительный эксперимент в разработке новых устройств релейной защитной техники:

отчет о НИР / БГПА; рук. В. И. Новаш. – Минск, 1999 г. – 127 с. – № ГР. №19974640.

33. Программное и информационное обеспечение для проверки работоспособности микропроцессорных защит электроустановок собственных нужд электростанций с помощью испытательно-диагностических комплексов: отчет о НИР / БНТУ; рук. И. В. Новаш. – Минск, 2000 г. – 116 с. – № ГР. № 20191011.

34. Программное и информационное обеспечение для проверки работоспособности микропроцессорных защит с помощью испытательно-диагностических комплексов: отчет о НИР / БНТУ; рук. И. В. Новаш. – Минск, 2018 г. – 118 с. – № ГР. №20161527.

35. Румянцев, Ю. В. Программно-аппаратное обеспечение комплексов для функциональных испытаний микропроцессорных токовых защит: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02 / Ю. В. Румянцев ; Белорусский нац. техн. у-нт. . – Минск, 2019. – 25 с

36. Федосеев, А. М. Релейная защита электроэнергетических систем. Релейная защита сетей : учеб. пособие для вузов / А. М. Федосеев. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 520 с.

37. Version 4 [Electronic Resource] / The MathWorks, Inc. © 2005 copyright. – Mode of Access : http://www.mathworks.com/help/re-leases/R14sp2/pdf_doc/physmod/powersys/powersys.pdf. – Date of Access : 01.12.2015.

38. Черных, И. В. Моделирование электротехнических устройств и систем в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink / И. В. Черных. – М. : ДМК Пресс; СПб. : Питер, 2008. – 288 с.

39. Kezunovic, M. The role of digital modeling and simulation in power engineering education / M. Kezunovic, A. Abur, G. Huang, A. Bose, K. Tomsovic // IEEE transactions on power systems. – 2004. – Vol. 19, iss. 1. – P. 64–72.

40. Apostolopoulos, C. A. Real-time implementation of digital relay models using MATLAB/SIMULINK and RTDS / C. A. Apostolopoulos, G. N. Korres // European Transactions on Electrical Power. – 2010. – Vol. 20, iss. 3. – P. 290–305.

41. McLaren, P. G. An accurate software model for off-line assessment of a digital relay / P. G. McLaren, E. N. Dirks, R. P. Jayasinghe, I. Fernando, G. W. Swift, Z. Zhang // Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. – 1996. – Vol. 2. – P. 737–740.

42. Yang, S. Switching transient overvoltage study simulation comparison using PSCAD/EMTDC and EMTP-RV / S. Yang, G. Franklin // Proceedings of IEEE Southeastcon. – 2013. – P. 1–5.

43. Zhang, N. Implementing an advanced simulation tool for comprehensive fault analysis / N. Zhang, M. Kezunovic // IEEE/PES Transmission & Distribution Conference & Exposition: Asia and Pacific. – 2005. – P. 1–6.

44. Dommel, H. W. Electromagnetic Transients Program Reference Manual (EMTP Theory Book) / H. W. Dommel. – Portland : Bonneville Power Administration, 1986. – 483 p.

45. IEEE Guide for Protecting Power Transformers: IEEE C 37.91. – IEEE, 2008. – 139 p.

46. IEEE Guide for Protecting Power Transformers: IEEE Standard. C 37.91–2008.

47. Benmouyal, G. Removal of DC-Offset in Current Waveforms Using Digital Mimic Filtering / G. Benmouyal // IEEE Transactions on Power Delivery. 1995. Vol. 10, No 2. P. 621–630.

48. Ziegler G. (2012) Numerical Differential Protection: Principles and Applications. 2 ed. Erlangen, Germany, Publicis Publishing. 287.

49. Paithankar Y. G., Bhide S. R. (2003) Fundamentals of Power System Protection. New Delhi, Prentice-Hall of India Private Limited. 287.

50. Novash I. V., Rumiantsev Yu. V. (2015) Calculation of Model Parameters of the Three-Phase Transformer from the Library of MatLab-Simulink Taking into Account the Saturation of the Magnetic Conductor. Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Obedinenii SNG [Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.], (1), 12–24 (in Russian).

51. Madzikanda E. A., Negnevitsky M. (2012) Practical Look at Harmonics in Power Transformer Differential Protection. 2012 IEEE International Conference on Power System Technology. POWERCON 2012. Auckland, New Zealand. Article Number 6401274. DOI : 10.1109 / PowerCon.2012.6401274.

52. Иванов-Смоленский, А. В. Электрические машины /А. В. Иванов-Смоленский ; М.: Энергия, 1980. – 928 с.

53. Романюк, Ф. А. Исследование алгоритма блокировки токовых защит трансформатора в режимах броска тока намагничива-

ния / Ф. А. Романюк, М. С. Ломан, А. С. Гвоздицкий // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2014. № 2. С. 5–10.

54. Kulidjian, A. New Magnetizing Inrush Restraining Algorithm for Power Transformer Protection / A. Kulidjian, B. Kasztenny, B. Campbell // IEEE Developments in Power Sys. Protec. Conf. 2001. P. 181–184.

55. Guzman, A. Power Transformer Protection Improvements with Numerical Relays / A. Guzman, H. Altuve, D. Tziouvaras // CIGRE Study Committee B5. – Protection and Automation. 2005. Vol. 11.

56. Вольдек, А. И. Электрические машины: учеб. для студентов вузов / А. И. Вольдек. – 3-е изд., перераб. – Л. : Энергия, 1978. – 832 с.

57. Герман-Галкин, С. Г. Matlab&Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПЭВМ / С. Г. Герман-Галкин. – СПб. : КОРОНА-Век, 2008. – 368 с.

58. Справочник по проектированию электроэнергетических систем / В. В. Ершевич [и др.] ; под ред. С. С. Рокотяна и И. М. Шапиро. – М. : Энергоатомиздат, 1985. – 368 с.

59. Dommel, H. W. Electromagnetic Transients Program Reference Manual (EMTP Theory Book) / H. W. Dommel. – Portland : Bonneville Power Administration, 1986 – 483 p.

60. Электрические цепи с ферромагнитными сердечниками в релейной защите / А. Д. Дроздов [и др.]. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 255 с.

61. EMTDC: Transient Analysis for PSCAD Power System Simulation. User's Guide V4.3.1. – Manitoba HVDC Research Centre, 2010. – 233 p.

62. Martinez, J. A. Power System Transients: Parameter Determination / J. A. Martinez – CRC Press, 2009. – 644 p.

63. Neves, W. L. A. Saturation Curves of Delta-Connected Transformers from Measurements / W. L. A. Neves, H. W. Dommel // IEEE Transactions on Power Delivery. – 1995. – Vol. 10, iss. 3. – P. 1432–1437.

64. Rioual, M. Energization of a No-Load Transformer for Power Restoration Purposes: Modeling and Validation by on Site Tests / M. Rioual, C. Sicre // IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. – 2000. – Vol. 3. – P. 2239–2244.

65. Kahrobaee, S. Investigation and Mitigation of Transformer Inrush Current During Black Start of an Independent Power Producer Plant // S. Kahrobaee, M. C. Algrain, S. Asgarpoor / Energy and Power Engineering. – 2013. – Vol. 5, iss. 01. – P. 1–7.

66. Nagpal, M. Assessing and Limiting Impact of Transformer Inrush Current on Power Quality / M. Nagpal, T. G. Martinich, A. Moshref // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2006. – Vol. 21, iss. 2. – P. 890–896.

67. Руководящие указания по релейной защите. Вып. 12. Токовая защита нулевой последовательности от замыканий на землю. – М. : Энергия, 1980. – 86 с.

68. Новаш, И. В. Расчет параметров модели трехфазного трансформатора из библиотеки MatLab-Simulink с учетом насыщения магнитопровода / И. В. Новаш, Ю. В. Румянцев // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ – Энергетика : международный научно-технический журнал. – 2015. – № 1. – С. 12–24.

69. Prusty, S. A direct piecewise linearized approach to convert rms saturation characteristic to instantaneous saturation curve / S. Prusty, M. Rao // IEEE Transactions on Magnetics. – 1980. – Vol. 16, iss. 1. – P. 156–160.

70. Королев, Е. П. Расчеты допустимых нагрузок в токовых цепях релейной защиты / Е. П. Королев, Э. М. Либерзон. – М. : Энергия, 1980. – 207с.

71. Инструкция по проверке трансформаторов тока, используемых в схемах релейной защиты и измерения: РД 153-34.0-35.301. – 2002. – М. : СПО ОРГРЭС, 2002. – 72 с.

72. Методические указания по выбору параметров срабатывания устройств РЗА подстанционного оборудования производства ЗАО «АРЕВА Передача и Распределение»: Стандарт организации: СТО 56947007-29.120.70.100-2011. – Введ. 13.09.2011. – М. : ОАО «ФСК ЕЭС», 2011. – 284с.

73. Чернобровов, Н. В. Релейная защита энергетических систем: учеб. пособие для техникумов / Н. В. Чернобровов, В. А. Семенов. – М. : Энерго-атомиздат, 1998. – 800 с.

74. Current Transformers: Specification Errors and Solutions. Cahier Technique No 195 [Electronic resource]. – Mode of access : https://download.schneider-electric.com/files?p_enDocType=Cahier+Technique-&p_File_Id=905255698&p_File_Name=ECT195.pdf. – Date of access : 08.12.2014.

75. Instrument transformers – Part 2 : Additional requirements for current transformers : IEC 61869-2:2012. – IEC, 2012. – 140 p.

76. Новаш, И. В. Упрощенная модель трехфазной группы трансформаторов тока в системе динамического моделирования / И. В. Новаш, Ю. В. Румянцев // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ – Энергетика : международный научно-технический журнал. – 2015. – № 5. – С. 23–38.
77. Бессонов, Л. А. Электрические цепи со сталью / Л. А. Бессонов. – М. : Л.: Госэнергоиздат, 1948. – 344 с.
78. Sachdev, M. S. A new algorithm for digital impedance relays / M. S. Sachdev, M. A. Baribeau // IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. – 1979. – Vol. PAS-98, iss. 6. – P. 2232–2240.
79. Phadke, A. G. Synchronized Phasor Measurements and their Applications / A. G. Phadke, J. S. Thorp. – New York : Springer Science & Business Media, 2008. – 248 p.
80. Horton, J. W. Walsh functions for digital impedance relaying of power lines / J. W. Horton // IBM Journal of Research and Development. – 1976. – Vol. 20, iss. 6. – P. 530–541.
81. Румянцев, Ю. В. Реализация цифровых фильтров в микропроцессорных устройствах релейной защиты / Ю. В. Румянцев, Ф. А. Романюк, В. Ю. Румянцев, И. В. Новаш // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ – Энергетика : международный научно-технический журнал. – 2016. – Т.59. – № 5. – С. 397–417.
82. Лоусон, Ч. Численное решение задач метода наименьших квадратов / Ч. Лоусон, Р. Хенсон: пер. с англ. – М. : Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. – 232 с.
83. Rebizant, W. Digital Signal Processing in Power System Protection and Control / W. Rebizant, J. Szafran, A. Wiszniewski. – London : Springer, 2011. – 316 p.
84. Schweitzer III, E. O. Filtering for Protective Relays / E. O. Schweitzer III, D. Hou // WESCANEX 93. Communications, Computers and Power in the Modern Environment. Conference Proceedings. IEEE. – 1993. – P. 15–23.
85. Романюк, Ф. А. Информационное обеспечение микропроцессорных защит электроустановок / Ф. А. Романюк – Минск : УП «Технопринт», 2001. – 133 с.
86. Новаш, И. В. Программно-информационное обеспечение комплексов для функциональных испытаний цифровых токовых защит электроустановок в системе динамического моделирования

MatLab-Simulink / И. В. Новаш, Ф. А. Романюк, Ю. В. Румянцев, В. Ю. Румянцев // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ – Энергетика : международный научно-технический журнал. – 2017. – Т. 60. – № 4. – С. 291–308.

87. A. Romanyuk, F. Application of a software package for transmission line digital overcurrent protection testing in the MATLAB-Simulink environment / F. Romanyuk, I. Novash, Y. Rumiantsev, P. Rogalski // Przegląd Electrotechniczny (Electrical Review). – 2017. – Vol. 93, N 5. – С. 148–151.

88. Kasztenny, B. CT saturation in industrial applications – analysis and application guidelines / B. Kasztenny, J. Mazereeuw, H. DoCarmo // IET 9th International Conference on Developments in Power System Protection (DPSP 2008). – 2008. – P. 386–417.

89. Nyquist, H. Certain topics in telegraph transmission theory / H. Nyquist // Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. – 1928. – Vol. 47, iss. 2. – P. 617–644.

90. Instantaneous overcurrent element for heavily saturated current in a power system [Electronic resource] : pat. US 6757146 B2 / G. Benmouyal, S. E. Zocholl, A. Guzman. – Publ. date 29.06.2004. – Mode of access: <https://www.google.com/patents/US6757146>. – Date of access: 07.04.2014.

91. Румянцев, Ю. В. Цифровой измерительный орган для функционирования в условиях глубокого насыщения трансформатора тока / Ю. В. Румянцев, Ф. А. Романюк, В. Ю. Румянцев, И. В. Новаш, // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ – Энергетика : международный научно-технический журнал. – 2018. – Т. 61. – № 6. – С. 483–493.

92. Измерительный орган тока для функционирования в условиях глубокого насыщения магнитопровода трансформатора тока: пат. 20808 Респ. Беларусь : МПК (2006.01) H 02H 3/08 / Ю. В. Румянцев, Ф. А. Романюк, В. Ю. Румянцев, И. В. Новаш : заявитель Белорус. нац. тех. ун-т. – № а 20150485; заявл. 07.10.2015 ; опубл. 28.02.2017 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2017. – № 1. – С. 129.

93. Ванин, В. К. Релейная защита на элементах вычислительной техники / В. К. Ванин, Г. М. Павлов. – Л. : Энергоатомиздат, 1991. – 336 с.

94. Совершенствование математических моделей элементов распределительных сетей для исследования новых принципов выполнения микропроцессорных защит: отчет о НИР (заключительный по ГБ 14-18, задание 1.1.28) / БНТУ; рук. темы И. В. Новаш. – Минск, – 2015. – 116 с. – № ГР 20141049.

95. Программное и информационное обеспечение для проверки работоспособности микропроцессорных защит с помощью испытательно-диагностических комплексов: отчет о НИР (заключительный по ГБ 16-04 (задание 1.2.04)) / БНТУ; рук. темы И. В. Новаш. – Минск, – 2018. – 115 с. – № ГР 20161527.

96. Программное и информационное обеспечение для проверки работоспособности микропроцессорных защит электроустановок собственных нужд электростанций с помощью испытательно-диагностических комплексов: отчет о НИР (заключительный по ГБ 19–24 (задание 1.2.18)) / БНТУ; рук. темы И. В. Новаш. – Минск, – 2020. – 116 с. – № ГР 20191011.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	3
ПРЕДИСЛОВИЕ.....	4
ВВЕДЕНИЕ.....	6
1. ИСПЫТАТЕЛЬНЫЕ КОМПЛЕКСЫ ДЛЯ ПРОВЕРКИ УСТРОЙСТВ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ.....	10
1.1. Испытательные программно-аппаратные комплексы.....	13
1.1.1. <i>Моделирование энергосистемы и испытание устройств релейной защиты в режиме реального времени.....</i>	<i>16</i>
1.1.2. <i>Моделирование энергосистемы и испытание устройств релейной защиты в автономном режиме модельного времени.....</i>	<i>18</i>
1.2. Испытательные программные комплексы релейных защит.....	20
1.2.1. <i>Математическое моделирование –основа вычислительного эксперимента.....</i>	<i>20</i>
1.2.2. <i>Математические модели с жесткой структурой</i>	<i>22</i>
1.2.3. <i>Математические модели с гибкой структурой.....</i>	<i>24</i>
1.2.4. <i>Компьютерные программные комплексы с жесткой структурой модели обобщенного электроэнергетического объекта.....</i>	<i>25</i>
1.2.5. <i>Компьютерные программные комплексы с гибкой структурой модели обобщенного электроэнергетического объекта.....</i>	<i>28</i>
2. КОМПЬЮТЕРНЫЕ ПРОГРАММНЫЕ КОМПЛЕКСЫ ВЫРАБОТКИ ТЕСТОВЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ РЕЛЕЙНЫХ ЗАЩИТ.....	29
2.1. Компьютерный программный комплекс UKZLINE.....	30
2.1.1. <i>Назначение и состав комплекса.....</i>	<i>30</i>
2.1.2. <i>Исходные данные к расчетам.....</i>	<i>33</i>
2.1.3. <i>Параметры вычислительного процесса.....</i>	<i>35</i>
2.1.4. <i>Параметры исходного режима.....</i>	<i>40</i>
2.1.5. <i>Параметры системы на стороне ВН.....</i>	<i>41</i>
2.1.6. <i>Параметры трансформаторов тока.....</i>	<i>42</i>
2.1.7. <i>Параметры силового трансформатора.....</i>	<i>43</i>
2.1.8. <i>Параметры эквивалентного электродвигателя</i>	<i>44</i>
2.1.9. <i>Расчет входных сигналов защиты от замыканий на землю.....</i>	<i>44</i>

2.1.10. Расчет входных сигналов защиты от междуфазных замыканий	47
2.2. Компьютерный программный комплекс KZTRANS2	51
2.3. Компьютерный программный комплекс KZTRANS3	54
2.4. Компьютерный программный комплекс РежимыАД	56
2.5. Компьютерные программные комплексы для расчета режимов комплектной трансформаторной подстанции	61
2.5.1. КПК РежимыКТП для расчета аварийных режимов комплектной трансформаторной подстанции	61
2.5.2 КПК ВключениеКТП	63
2.6. Проведение испытаний с помощью ИПАК	66
2.6.1. Преобразование результатов расчета КПК в формат COMTRADE	66
2.6.2. Функциональные испытания токовой защиты в составе микропроцессорной защиты МР801	71
3. ИСПЫТАТЕЛЬНЫЕ ПРОГРАММНЫЕ КОМПЛЕКСЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МОДЕЛЕЙ РЕЛЕЙНЫХ ЗАЩИТ	74
3.1. Испытательный программный комплекс TransformerDIFF	75
3.1.1. Моделирование микропроцессорной токовой дифференциальной защиты силового трансформатора	76
3.1.2. Исследование работы микропроцессорной токовой дифференциальной защиты трансформатора	81
3.2. Испытательный программный комплекс для исследования цифровых фильтров	91
3.3. Испытательный программный комплекс для исследования токовых защит асинхронного двигателя	93
4. РАЗРАБОТКА И РЕАЛИЗАЦИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ПРОГРАММНЫХ КОМПЛЕКСОВ С ГИБКОЙ СТРУКТУРОЙ	99
4.1. Расчет параметров библиотечных блоков моделей пакета SimPowerSystems	99
4.1.1. Методика расчета параметров блока модели трехфазного силового трансформатора	100
4.1.2. Методика расчета параметров, описывающих нелинейные свойства магнитопровода	106
4.1.3. Окно задания значений параметров модели трехфазного двухобмоточного трансформатора	109

ОГЛАВЛЕНИЕ

4.1.4. Сравнение результатов моделирования режимов трехфазного трансформатора с помощью модели библиотеки <i>SimPowerSystems</i> и КПК <i>KZTRANS2</i>	112
4.2. Разработка и реализация в Simulink блоков модели трехфазной группы трансформаторов тока	114
4.2.1. Блок модели трехфазной группы трансформаторов тока на основе геометрических параметров магнитной системы <i>ТТ</i>	115
4.2.2. Блок модели трехфазной группы трансформаторов тока на основе каталожных данных <i>ТТ</i>	117
4.2.3. Сравнение результатов моделирования трехфазной группы трансформаторов тока с помощью модели библиотеки <i>SimPowerSystems</i> и КПК <i>UKZLINE</i>	126
4.3. Разработка и реализация в Simulink блоков моделей цифровых фильтров в составе измерительных органов тока	128
4.3.1. Математические модели цифровых фильтров	128
4.3.2. Реализация моделей измерительных органов тока в <i>Simulink</i>	137
4.3.3. Блок модели измерительного органа тока для функционирования в условиях глубокого насыщения магнитопровода трансформаторов тока	141
4.4. Функциональные испытания моделей измерительных органов тока.....	146
4.4.1. Испытания блоков моделей цифровых фильтров в составе типового измерительного органа тока, разработанных в <i>Simulink</i>	146
4.4.2. Испытания блока модели измерительного органа тока для функционирования в условиях глубокого насыщения трансформаторов тока	150
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	154
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	156
ОГЛАВЛЕНИЕ	166

Научное издание

НОВАШ Иван Владимирович
РОМАНЮК Федор Алексеевич
РУМЯНЦЕВ Владимир Юрьевич
РУМЯНЦЕВ Юрий Владимирович

**ИСПЫТАНИЯ МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ
ТОКОВЫХ ЗАЩИТ:
ТЕОРИЯ, МОДЕЛИРОВАНИЕ, ПРАКТИКА**

Подписано в печать 24.11.2021. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Цифровая печать.
Усл. печ. л. 9,82. Уч.-изд. л. 7,68. Тираж 100. Заказ 721.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.