

Глава 25. ЦИФРОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ – ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ И ИСПЫТАНИЙ УСТРОЙСТВ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ

Новаш И.В., Романюк Ф.А.

*Белорусский национальный технический университет
г. Минск, Беларусь, E-mail: faromanuk@bntu.by, novashiv@tut.by*

Введение

На современном этапе развития энергетики активно создаются и внедряются в эксплуатацию микропроцессорные защиты оборудования с изменяемыми алгоритмами функционирования. Цифровые устройства релейной защиты получают массовое распространение в распределительных сетях и на трансформаторных подстанциях. В распределительных сетях Белорусской энергосистемы уже эксплуатируются микропроцессорные устройства релейной защиты линий электропередачи, силовых трансформаторов, сборных шин как зарубежных, так и отечественных производителей. Это обуславливает необходимость их исследований и испытаний, как на этапе разработки, так и в начальный период эксплуатации.

Компьютерное моделирование позволяет на основе математической модели с помощью ЭВМ проводить серию вычислительных экспериментов, в ходе которых могут исследоваться свойства объектов или процессов, находиться их оптимальные параметры и режимы работы. Например, располагая уравнением, описывающим протекание того или иного процесса можно изменяя его коэффициенты, начальные и граничные условия, исследовать, как при этом будет вести себя объект, т.е. спрогнозировать поведение объекта в различных условиях.

Вычислительный эксперимент позволяет заменить дорогостоящий натурный эксперимент расчетами на ЭВМ. Он дает возможность в короткие сроки и без значительных материальных затрат осуществить исследование большого числа вариантов изучаемого объекта или процесса для различных режимов его эксплуатации, что значительно сокращает сроки разработки сложных систем и их внедрение в производство.

Метод цифрового моделирования позволяет решать научные и конструкторские задачи при исследовании новых способов выполнения защит и алгоритмов их функционирования, выборе и оптимизации параметров элементов, проверке работоспособности на этапе подготовки к технической реализации. Он может быть применен при проведении всесторонних испытаний новых образцов защиты, получение первого опыта эксплуатации, а также при оценке влияния действия защиты на режимы работы энергосистемы.

1. Вычислительный эксперимент, как метод для испытаний устройств релейной защиты

1.1 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 способствовали, с одной стороны, возрастающая сложность подлежащих изучению вопросов, трудность, 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 [1].

Необходимость совершенствования устройств релейной защиты и автоматики (РЗА) и установления общих закономерностей в их поведении при разнообразных видах повреждений в энергосистеме требует усиления качественного и количественного анализа аварийных режимов защищаемых электроэнергетических объектов. Наиболее совершенным методом количественного анализа является вычислительный эксперимент, позволяющий провести комплексное исследование поведения устройств РЗА с учетом возникающих повреждений [2].

Проведение вычислительного эксперимента требует разработки так называемых компьютерных программных комплексов (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 их воспроизведения на компьютере.

КПК можно разделить на программные комплексы, реализующие вычислительный эксперимент для исследования аварийных режимов защищаемого объекта, и программные комплексы, позволяющие 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, соответствующим реальным условиям эксплуатации. КПК второй группы реализуют модель исследуемой защиты, и в ходе 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 компьютерный испытательный комплекс (КИК), позволяющий отрабатывать новые принципы построения цифровых защит и проверять их работоспособность при аварийных режимах, которые невозможно искусственно повторить на реальных энергетических объектах.

Основное требование, предъявляемое к КИК, – 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, а КПК и модель цифрового устройства релейной защиты (ЦУРЗ) образуют КИК для проведения испытаний методом вычислительного эксперимента (рис. 1).



Рисунок 1 – Компьютерный испытательный комплекс

Структура математических моделей ОЭО и ЦУРЗ может быть жесткой или гибкой.

1.1.1 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.

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 отдельный анализ и оценку свободных и вынужденных составляющих 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.

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

Каждая из перечисленных выше групп 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 потокосцепления 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 практически невозможно вследствие наличия среди алгебраических уравнений нелинейных характеристик $H=f(B)$ ферромагнитных элементов магнитопроводов 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 комплексной математической модели на ЭВМ и определяет условия выбора, как метода численного интегрирования дифференциальных уравнений, так и метода вычисления корней нелинейных алгебраических уравнений.

В рамках данного подхода на протяжении более 40 лет ведутся работы по математическому моделированию электроэнергетических объектов и разработке компьютерных программных комплексов для исследования поведения устройств релейных защит методом вычислительного эксперимента [1,3].

Многолетний опыт использования подобных программ для проведения научных исследований, а также сопоставление результатов моделирования с натурными испытаниями, при которых погрешность по току не превышала 11% [4,5], позволяет утверждать, что результаты комплексного 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 электроэнергетических объектов, но выполненных в других системах моделирования, например, в Matlab-Simulink.

1.1.2 Математические модели с гибкой структурой

Для модели ОЭО с гибкой структурой набор элементов неограничен. Модель реализуется в системе динамического моделирования (СДМ) Matlab-Simulink, в состав которой входит пакет расширения SimPowerSystems (SPS), 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 из-за наличия библиотечных программных модулей (блоков), используемых для решения отдельных прикладных задач [6].

Это особенно важно для задач инженерной направленности, когда требуется самостоятельно смоделировать фрагмент энергосистемы, не углубляясь в тонкости математического описания самих элементов. При этом тщательно подобранные демонстрационные примеры пакета SPS создают ощущение простоты использования библиотечных блоков, представляющих собой реализацию математических моделей реальных объектов. Однако отклонение параметров от заданных значений «по умолчанию» часто приводит к неправильному функционированию модели. Поэтому очень важен этап подготовки исходных данных для моделей элементов ОЭО и исследуемого режима.

Кроме того, в стандартных библиотеках SPS присутствуют не все необходимые модели электрооборудования. Например, отсутствует модель ТТ, а для модели силового трансформатора и некоторых других блоков не указаны методики расчета их параметров. При этом, именно моделированию трансформаторов тока, 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 канадского производителя электроэнергии – компании Hydro-Québec, где подтверждена адекватность их реализации и математического описания [7].

Поэтому, результаты, получаемые от КПК, реализованных в СДМ Matlab-Simulink с использованием блоков SPS, необходимо сопоставить с результатами, полученными от других КПК, принятых за эталонные, а также с натурными испытаниями. При этом если достигается высокое совпадение результатов от разных источников, то это свидетельствует о том, что модели, разработанные в Simulink-SimPowerSystems адекватно функционируют, и могут быть использованы для построения других аналогичных систем, структура которых отличается от эталонной.

1.2 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 результатов.

Для получения входных токовых сигналов исследуемых защит в БНТУ на основе моделей жесткой структуры разработаны КПК воспроизведения рабочих и аварийных режимов линий электропередачи и силовых трансформаторов. В результате выполнения задания Государственной программы научных исследований (ГПНИ) «Энергобезопасность энергоэффективность и энергосбережение, атомная энергетика» подпрограммы «Энергобезопасность и надежность энергоснабжения» за 2013 год разработан программный комплекс «Расчет удаленных междуфазных замыканий и однофазных замыканий на землю в линиях 6-10(35) кВ» [8] (рис.2).

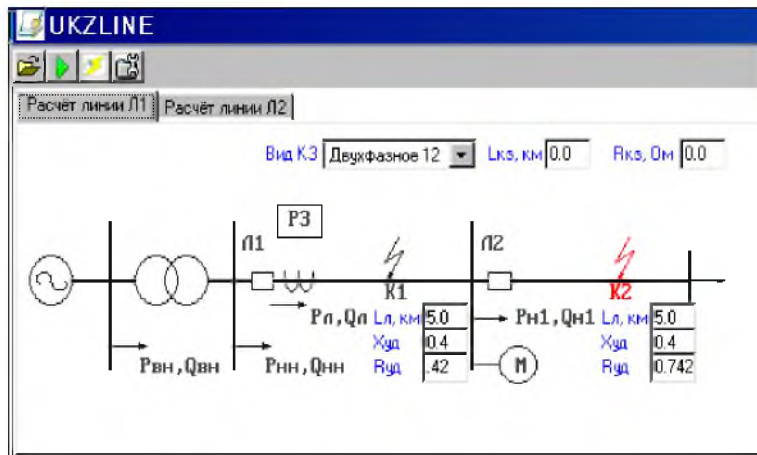


Рисунок 2 – Диалоговое окно программного комплекса для расчета режимов удаленных замыканий на линиях электропередачи 6(10)-35 кВ

В 2014 году в рамках этой же ГПНИ был разработан программный комплекс «Аварийные режимы двухобмоточного трехфазного трансформатора» (рис.3), а в 2015 году – программный комплекс «Аварийные режимы трехобмоточного трехфазного трансформатора» [9] (рис.4).

Основным достоинством разработанных КПК является то, что они позволяют выполнять расчеты входных сигналов защиты – вторичных токов ТТ – с учетом их несинусоидальных форм, обусловленных наличием в энергосистеме нелинейных элементов, и насыщения магнитопроводов силового и измерительных трансформаторов (рис.5), что в большей степени соответствует реальным условиям аварийных режимов [10].

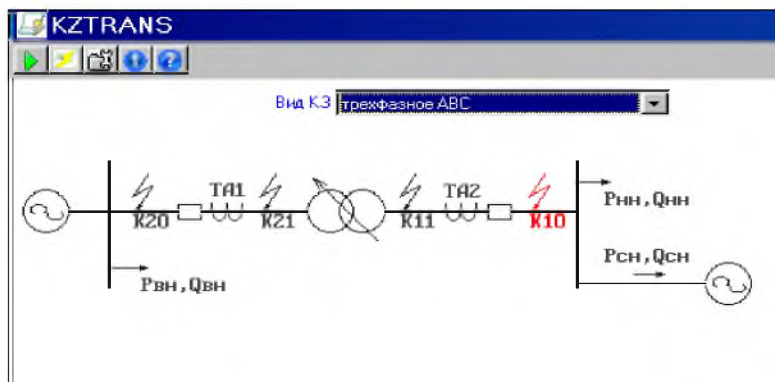


Рисунок 3 – Диалоговое окно программного комплекса для расчета аварийных режимов двухобмоточного трехфазного трансформатора

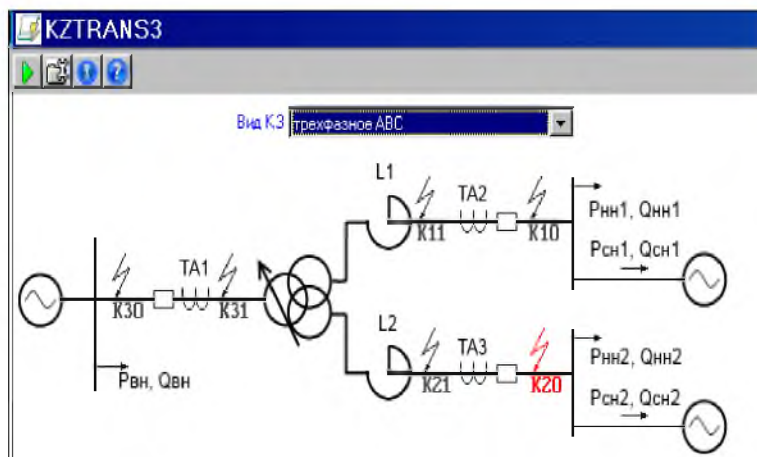


Рисунок 4 – Диалоговое окно программного комплекса для расчета аварийных режимов трехобмоточного трехфазного трансформатора

Результаты расчетов программных комплексов сохраняются в формате COMTRADE [11] и могут быть использованы в качестве исходных данных испытательных комплексов.

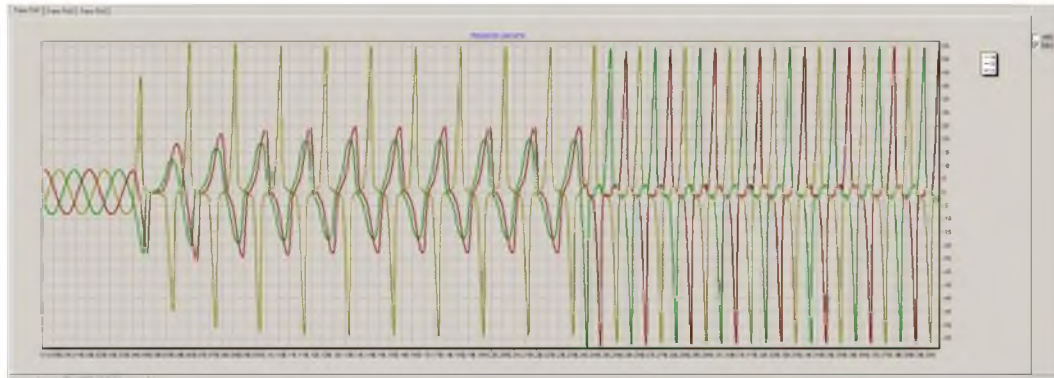


Рисунок 5 – Результаты расчета токовых сигналов трехфазной группы ТТ

1.3 Компьютерные программные комплексы с гибкой структурой модели обобщенного электроэнергетического объекта в системе динамического моделирования Matlab-Simulink

Применение СДМ Matlab-Simulink позволяет создавать программные комплексы, совместно моделирующие защищаемый объект и исследуемую защиту. Так в результате выполнения задания упомянутой выше ГПНИ в 2016 году разработан программный комплекс для исследования микропроцессорной дифференциальной защиты трехфазного силового трансформатора (рис.6) [12].

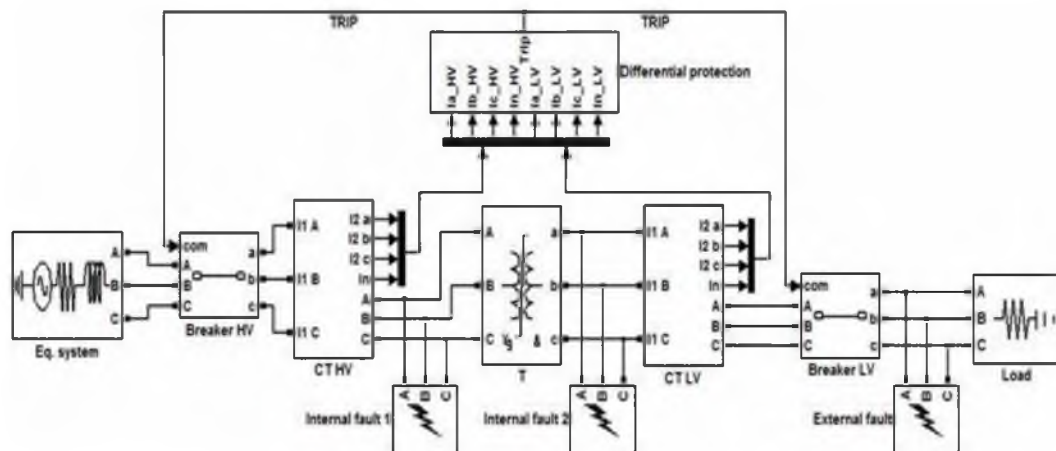


Рисунок 6 – Структурная модель узла нагрузки с силовым трехфазным трансформатором и его дифференциальной защитой

Программный комплекс разработан в среде Matlab-Simulink с использованием пакета расширения SimPowerSystems и включает в себя модели питающей системы, трехфазного силового трансформатора, трехфазной группы трансформаторов тока и модели цифровой дифференциальной защиты трансформатора. Использование библиотечных моделей пакета SimPowerSystems [7,13], разработанных моделей трехфазной группы трансформаторов тока [14] и цифровой дифференциальной защиты трансформатора [12] позволяет создавать комплексные модели достаточно сложных систем со значительно меньшими трудозатратами по сравнению с традиционными методами математического моделирования с использованием моделей с жесткой структурой.

В модели узла нагрузки рис. 6 используется библиотечная модель SimPowerSystems трехфазного силового трансформатора. От точности задания

параметров модели силового трансформатора в большой степени зависит точность моделирования режимов работы всего узла нагрузки. Поэтому расчет параметров модели силового трансформатора по его каталожным значениям представляет важную задачу на этапе подготовке исходных данных для моделирования.

1.3.1 Расчет параметров модели трехфазного трансформатора библиотеки SimPowerSystems

Модель трехфазного двухобмоточного трансформатора «Three-phase Transformer (Two Windings)» построена на основе трех однофазных трансформаторов [7]. В модели может учитываться нелинейность характеристики намагничивания материала сердечника и гистерезис.

Схема замещения двухобмоточного трансформатора из библиотеки Simulink-SimPowerSystems приведена на рисунке 7 [7]. Индуктивность L_m учитывает действие основного магнитного потока, а активное сопротивление R_m эквивалентно потерям в стали магнитопровода.

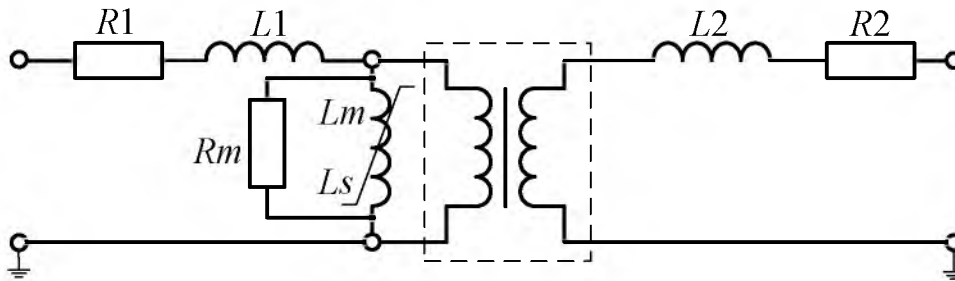


Рисунок 7 – Схема замещения силового двухобмоточного трансформатора

Методика расчета параметров модели силового трансформатора подробно рассмотрена в [15]. Для расчета параметров использованы каталожные данные трехфазного двухобмоточного силового трансформатора типа ТДН-16000/110 со схемой соединения обмоток $Y/\Delta-11$ (табл.1) [16].

Таблица 1 – Каталожные данные трансформатора типа ТДН-16000/110

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

В каталожных данных номинальные напряжения ($U_{1\text{н}}$, $U_{2\text{н}}$) обмоток являются линейными величинами, значения мощностей ($S_{\text{н}}$, $P_{\text{с}}$ и P_0) приводятся, как суммарные для трех фаз. Для расчета схемы замещения трехфазного трансформатора должны использоваться фазные величины.

Соотношения по определению активного и индуктивного сопротивления ветви намагничивания вытекают из принятой схемы замещения трансформатора (рис.7).

Расчетные выражения для вычисления параметров схемы замещения моделируемого трансформатора приведены в таблице 2.

Преобразовав приведенные в таблице 2 расчетные выражения, получим упрощенные выражения для расчета параметров схемы замещения, в которых используются только каталожные параметры (табл.3).

Таблица 2 – Расчетные выражения

Наименование величин	Расчетное выражение
Номинальная мощность каждой фазы трансформатора:	$S_{\text{оiii}} = \frac{S_{\text{iii}}}{3} = \frac{16 \cdot 10^6}{3} = 5,33 \text{ МВА}$
Фазное напряжение первичной обмотки при соединении «звезда»:	$U_{1\phi} = \frac{U_{\text{ном}}}{\sqrt{3}} = \frac{115 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} = 66,4 \text{ кВ}$
Номинальный фазный ток первичной обмотки трансформатора соединенной по схеме «звезда»:	$I_{1\text{оiii}} = \frac{S_{\text{оiii}}}{U_{1\phi}} = \frac{5,33 \cdot 10^6}{66,4 \cdot 10^3} = 80,27 \text{ А}$
Из опыта холостого хода:	
Фазный ток холостого хода трансформатора:	$I_{0\phi} = \frac{I_0 \cdot I_{1\text{оiii}}}{100} = \frac{0,7 \cdot 80,27}{100} = 0,56 \text{ А}$
Полное сопротивление ветви намагничивания схемы замещения при холостом ходе:	$Z_0 = \frac{U_{1\phi}}{I_{0\phi}} = \frac{66,4 \cdot 10^3}{0,56} = 118,57 \text{ кОм}$
Мощность потерь холостого хода на фазу:	$P_{\text{оф}} = \frac{P_0}{3} = \frac{19 \cdot 10^3}{3} = 6,33 \text{ кВт}$
Коэффициент мощности холостого хода:	$\cos(\varphi_0) = \frac{P_{0\phi}}{U_{1\phi} \cdot I_{0\phi}} = \frac{6,33 \cdot 10^3}{66,4 \cdot 10^3 \cdot 0,56} = 0,17$
Активное сопротивление ветви намагничивания:	$R_m = \frac{Z_0}{\cos(\varphi_0)} = \frac{118,57 \cdot 10^3}{0,17} = 697,47 \text{ кОм}$
Индуктивное сопротивление ветви намагничивания:	$X_m = \frac{Z_0}{\sin(\varphi_0)} = \frac{118,57 \cdot 10^3}{\sqrt{1 - 0,17^2}} = 120,3 \text{ кОм}$
Из опыта короткого замыкания:	
Фазное напряжение короткого замыкания:	$U_{\text{кф}} = \frac{U_{1\phi} \cdot U_{\text{к}}}{100} = \frac{66,4 \cdot 10,5}{100} = 6,97 \text{ кВ}$
Полное сопротивление короткого замыкания:	$Z_{\text{э}} = \frac{U_{\text{эо}}}{I_{1\text{оiii}}} = \frac{6,97 \cdot 10^3}{80,27} = 86,83 \text{ Ом}$
Мощность потерь короткого замыкания на фазу:	$P_{\text{эо}} = \frac{P_{\text{э}}}{3} = \frac{85 \cdot 10^3}{3} = 28,33 \text{ кВт}$
Коэффициент мощности короткого замыкания:	$\cos(\varphi_{\text{э}}) = \frac{P_{\text{эо}}}{U_{\text{эо}} \cdot I_{1\text{оiii}}} = \frac{28,33 \cdot 10^3}{6,97 \cdot 10^3 \cdot 80,27} = 0,051$
Активное сопротивление короткого замыкания:	$R_{\text{э}} = Z_{\text{к}} \cdot \cos(\varphi_{\text{э}}) = 86,83 \cdot 0,051 = 4,43 \text{ Ом}$
Индуктивное сопротивление короткого замыкания:	$X_{\text{э}} = Z_{\text{к}} \cdot \sin(\varphi_{\text{э}}) = 86,83 \cdot \sqrt{1 - 0,051^2} = 86,72 \text{ Ом}$
Базисные условия:	
Базисное значение тока:	$I_{\text{ааф}} = I_{1\text{оiii}} = 80,27 \text{ А}$
Базисное значение сопротивления:	$R_{\text{ааф}} = \frac{U_{1\phi}}{I_{\text{ааф}}} = \frac{66,4 \cdot 10^3}{80,27} = 827,2 \text{ Ом}$

Продолжение таблицы 2

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

Таблица 3 – Упрощенные формулы расчета параметров схемы замещения

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

Как видно из таблицы 2 и таблицы 3, значения параметров схемы замещения двухобмоточного трансформатора отличаются незначительно.

Потоксцепление и поток в магнитопроводе трансформатора имеют одинаковые значения в о. е. Для перевода характеристики намагничивания $B(H)$ в $\Psi(I_\mu)$ необходимо располагать геометрическими параметрами трансформатора (число витков обмоток, сечение магнитопровода, длина магнитной силовой линии), которые зачастую отсутствуют в документации от заводов-изготовителей.

Характеристика намагничивания в моделях трансформаторов Simulink-SimPowerSystems задается зависимостью $\Psi(I_\mu)$. Вид характеристики задается двумя прямыми, каждая из которых характеризуется своим значением индуктивности в о. е. Первая прямая соответствует характеристике намагничивания в линейной области, т. е. работе трансформатора в номинальном режиме (наклон данной прямой определяется значением L_m), вторая – работе трансформатора с магнитопроводом, вошедшим в режим глубокого насыщения (наклон данной прямой определяется значением L_s). Точка излома характеристики намагничивания «*knee-point*» – начало насыщения (на рис.8 данная точка обозначена как «*Point 2*»).

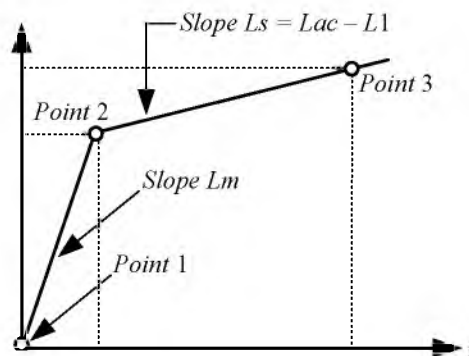


Рисунок 8 – Характеристика намагничивания магнитопровода трансформатора

Формулы для расчета координат характерных точек кривой намагничивания моделируемого трансформатора приведены в таблице 4 [15].

Таблица 4 – Формулы расчета координат характерных точек кривой намагничивания

Характерная точка	Ψ , о. е.	I_{μ} , о. е.
Point 1	$\Psi_{\text{point 1}} = 0$	$i_{\text{point 1}} = 0$
Point 2	$\Psi_{\text{point 2}} = 1,15$	$i_{\text{point 2}} = \frac{\Psi_{\text{point 2}} \cdot I_0}{100} = \frac{1,15 \cdot 0,7}{100} = 0,0081$
Point 3	$\Psi_{\text{point 3}} = \Psi_{\text{point 2}} + \frac{1,5 \cdot U_{\xi}}{100} = 1,15 + \frac{1,5 \cdot 10,5}{100} = 1,308$	$i_{\text{point 3}} = 1$

1.3.2 Модель трехфазной группы трансформаторов тока

Правильное функционирование устройств релейной защиты во время переходных процессов в первичной сети существенно зависит от формы кривой переменного тока, протекающего в защищаемом объекте в аварийном режиме. Источниками информации о токах защищаемого объекта являются измерительные ТТ, вторичные токи которых поступают на аналоговые входы микропроцессорных устройств РЗ. Вследствие насыщения магнитопровода ТТ в аварийном режиме форма вторичного тока может существенно отличаться от формы его первичного тока. Для оценки поведения микропроцессорных устройств РЗ в настоящее время широко используются диагностические комплексы, которые позволяют подавать на аналоговые входы устройств информационные токовые сигналы, эквивалентные по форме и мощности вторичным токам ТТ. Одним из способов получения таких информационных сигналов является метод математического моделирования. Он позволяет в ходе вычислительного эксперимента с использованием математических моделей защищаемого объекта и измерительных ТТ получать графики мгновенных значений первичных и вторичных токов ТТ для различных аварийных режимов.

В основу математической модели трехфазной группы ТТ положена математическая модель одиночного ТТ [3,14]:

$$\begin{cases} w_2 s_n \frac{dB}{dt} = (R_{\text{ia}} + R_i) i_2 + (L_{\text{ia}} + L_i) \frac{di_2}{dt}; \\ w_1 i_1 - w_2 i_2 = l_n H; \\ B_m = f(H). \end{cases} \quad (1-1)$$

где $R_{\text{об}}$, $L_{\text{об}}$ – активное сопротивление и индуктивность вторичной обмотки; R_n , L_n – активное сопротивление и индуктивность нагрузки; s_c – сечение стали магнитопровода; l_c – средняя длина силовой линии магнитного поля; w_1 , w_2 – число витков первичной и вторичной обмотки соответственно; $B_m=f(H)$ – средняя характеристика намагничивания электротехнической стали (зависимость амплитуды магнитной индукции B_m от действующего значения напряженности магнитного поля H при номинальной частоте $f=50$ Гц).

Математическая модель трехфазной группы ТТ с соединением вторичных обмоток и нагрузок в «звезду с нулевым проводом» [3] содержит уравнения трех однофазных ТТ и строится в соответствии с рисунке 9.

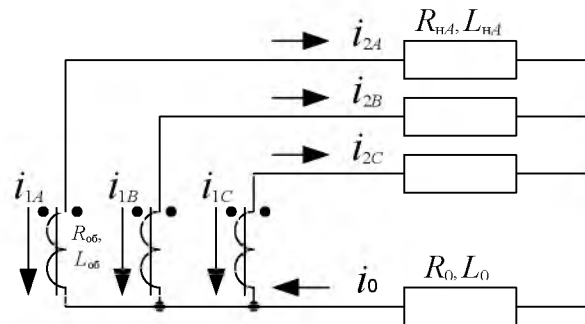


Рисунок 9 – Соединение вторичных обмоток и нагрузок трансформаторов тока по схеме «звезда с нулевым проводом»

Если в качестве нагрузок, подключенных ко вторичным обмоткам и нулевому выводу трехфазной группы ТТ, рассматривать микропроцессорное устройство защиты и контрольные кабели, то суммарные индуктивности данных нагрузок ($L_{н(A,B,C)}$, L_0) ввиду их малого значения можно исключить из системы уравнений (1-1). Приняв, что вторичная обмотка равномерно распределена по периметру магнитопровода, в данной системе уравнений так же можно не учитывать индуктивность L_{06} .

После приведения дифференциальных уравнений к виду, удобному для численного интегрирования, математическое описание трехфазной группы ТТ (рис.9) принимает вид:

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

Одной из проблем при моделировании ТТ является отсутствие в общедоступных источниках геометрических параметров его магнитной системы: сечения магнитопровода и средней длины магнитной силовой линии. Поэтому в [17] была разработана упрощенная модель трехфазной группы ТТ, в которой параметры магнитной системы выражены через паспортные данные ТТ и принята стандартная характеристика намагничивания.

После выражения неизвестных геометрических параметров магнитной системы ТТ через его паспортные данные и учитывая принятую характеристику намагничивания, для ТТ со вторичной обмоткой класса точности 10Р и вторичным номинальным током $I_{2ном}=5$ А, система уравнений, описывающая упрощенную модель трехфазной группы ТТ, в общем случае примет следующий вид [17]:

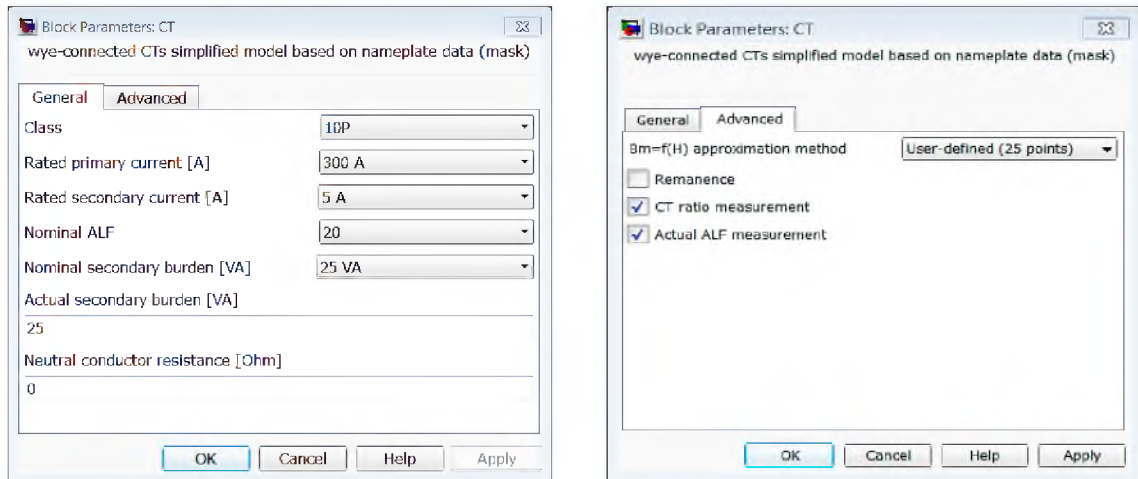
$$\begin{cases} \frac{dB_{mj}}{dt} = \frac{83,34 (0,0004 I_{1ном} + R_{нj}) i_{2j} + R_0 i_0}{K_{ном} (0,0004 I_{1ном} + R_{номj})}, & j = A, B, C \\ i_{2j} = \frac{5 i_{1j}}{I_{1ном}} - 2,25 \cdot 10^{-4} \cdot K_{ном} H_j; \\ B_{mj} = f(H_j); \\ i_0 = i_{2A} + i_{2B} + i_{2C}, \end{cases} \quad (1-3)$$

где $I_{1ном}$ – номинальный первичный ток ТТ; $K_{ном}$ – номинальная предельная кратность ТТ; $R_{ном}$ – номинальное активное сопротивление нагрузки ТТ; $R_{н}$ – реальное

активное сопротивление нагрузки ТТ; R_0 – активное сопротивление нулевого провода; i_0 – мгновенное значение тока, протекающего в нулевом проводе ТТ; $B_m=f(H)$ – средняя характеристика намагничивания электротехнической стали; i_1, i_2 – мгновенные значения первичного и вторичного токов ТТ соответственно.

На основе системы уравнений (1-3) в СДМ Matlab-Simulink была реализована упрощенная модель трехфазной группы ТТ с соединением вторичных обмоток и нагрузок по схеме «звезда с нулевым проводом» (блоки CT_{HV} и CT_{LV} на рис.6).

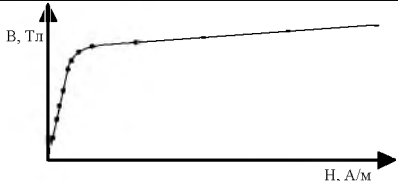
На рисунке 10 приведено меню задания параметров данной модели.



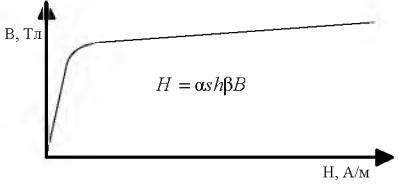
а) б)
Рисунок 10 – Меню задания параметров модели ТТ: вкладка General (а), вкладка Advanced (б)

В таблице 5 приведена расшифровка пунктов меню задания параметров реализованной в СДМ Matlab-Simulink упрощенной модели трехфазной группы ТТ.

Таблица 5 – Расшифровка пунктов меню упрощенной модели ТТ

№	Пункт меню модели	Назначение	Примечание
1	Class	Класс точности ТТ	Выбор между классами точности 5P и 10P
2	Rated primary current [A]	Номинальный первичный ток, А	Возможен выбор из диапазона 50 – 4000 А
3	Rated secondary current [A]	Номинальный вторичный ток, А	Выбор между 1 А и 5 А
4	Nominal ALF	Номинальная предельная кратность ТТ	Возможен выбор из диапазона 5–50 с шагом 5
5	Nominal secondary burden [VA]	Номинальная вторичная нагрузка, ВА	Возможен выбор из диапазона 5–50 ВА с шагом 5 ВА
6	$B_m=f(H)$ approximation method	Метод аппроксимации кривой намагничивания $B_m=f(H)$	Выпадающее меню с пунктами 6.1–6.2
6.1	User-defined (25 points)	Аппроксимация 25 парами значений B_m-H	

Продолжение таблицы 5

6.2	Ollendorf	Аппроксимация с помощью формулы Оллendorфа	
7	Actual secondary burden [VA]	Действительная вторичная нагрузка, ВА	Возможен ввод любого не отрицательного значения
8	Neutral conductor resistance [Ohm]	Сопrotивление нулевого провода, Ом	Возможен ввод любого не отрицательного значения
9	Remanence	Задание остаточной магнитной индукции	При установке флажка возле данного пункта появляются дополнительные пункты 9.1–9.3.
9.1	Phase A [T]	ТТ в фазе А	Задание остаточной магнитной индукции ТТ в фазе А
9.2	Phase B [T]	ТТ в фазе В	Задание остаточной магнитной индукции ТТ в фазе В
9.3	Phase C [T]	ТТ в фазе С	Задание остаточной магнитной индукции ТТ в фазе С
10	CT ratio measurement	Измерение коэффициента трансформации ТТ	При установке (снятии) флажка возле данного пункта меню в модели появляется (исчезает) дополнительный порт измерения коэффициента
11	Actual ALF measurement	Измерение действительной кратности протекающего тока	При установке (снятии) флажка возле данного пункта меню в модели появляется (исчезает) дополнительный порт измерения кратности

1.3.3 Модель питающей энергосистемы

Энергосистема «Eq. system» в модели на рис. 6 моделируется блоком *3-Phase Source* (Трехфазный источник напряжения) из библиотеки SPS. К основным параметрам, требующим дополнительного расчета, относятся: собственное сопротивление источника R_s (*source resistance*), Ом и собственная индуктивность источника L_s (*source inductance*), Гн.

Индуктивность питающей системы может быть определена по заданному току короткого замыкания I_k на шинах узла нагрузки напряжением $U_{ном}$, на котором производятся испытания:

$$L_s = \frac{U_{ит}}{\sqrt{3} I_e \omega_0}, \text{ где } \omega_0 - \text{номинальная угловая частота.}$$

Если задана мощность системы S_s , ее относительное сопротивление X_* и напряжение U_s , то индуктивность системы:

$$L_s = X_* \cdot \frac{U_s^2}{S_s \cdot \omega_0}.$$

Активное сопротивление можно определить исходя из среднего значения постоянной времени затухания апериодической составляющей ($T_s=0,05$) токов короткого замыкания (КЗ): $R_s \cong 20L_s$.

1.3.4 Модель дифференциальной защиты

Модель дифференциальной защиты силового трансформатора (ДЗТ) на рисунке 6 (блок «*Differential protection*») подробно рассмотрена в [12].

Работу ДЗТ с торможением удобно анализировать с помощью характеристики (рис.11), ось абсцисс которой соответствует току торможения I_{res} , а ось ординат – дифференциальному току I_{diff} .

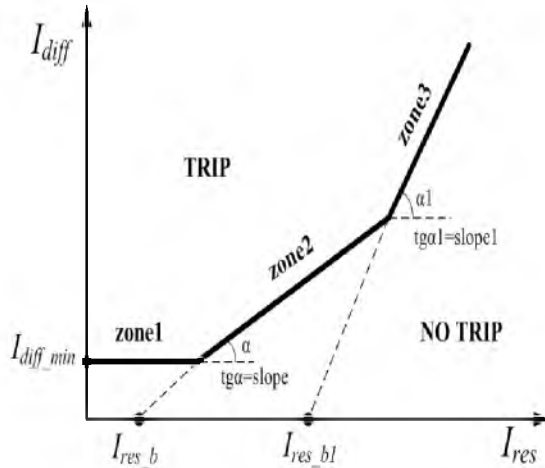


Рисунок 11 – Характеристика ДЗТ

Характеристика ДЗТ с торможением обычно 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 (*NO TRIP*). Следовательно, как только траектория рабочей точки, определяемая мгновенными координатами (I_{res} , I_{diff}), 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_{res_b} , I_{res_b1} – координаты точки пересечения оси абсцисс со вторым и третьим наклонным участком.

1.3.5 Исследование работы дифференциальной защиты трансформатора

Программный комплекс, структура которого представлена на рисунке 6, позволяет проводить исследования работы ДЗТ при различных аварийных режимах силового трансформатора методом вычислительного эксперимента. Команда на отключение выключателей формируется логикой защиты в момент перемещения рабочей точки из области *NO TRIP* в область *TRIP* (рис. 11) с учетом наличия или отсутствия сигнала блокировки.

Внутреннее повреждение силового трансформатора при отсутствии насыщения ТТ

Режим работы модели (рис.6) для рассматриваемого случая: выключатели сторон высшего напряжения (ВН) (*Breaker HV*) и низшего напряжения (НН) (*Breaker LV*) включены, повреждение задается блоком создания трехфазного короткого замыкания (КЗ) в зоне действия ДЗТ (*Internal fault 1*).

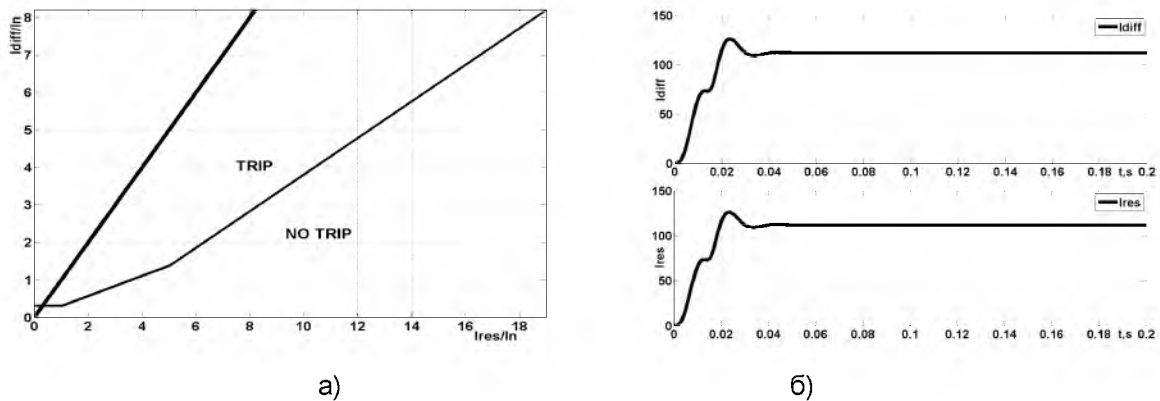


Рисунок 12 – Траектория перемещения рабочей точки при внутреннем повреждении (а); осциллограмма токов I_{diff} и I_{res} при внутреннем повреждении (б)

При внутреннем повреждении вследствие отсутствия подпитки места КЗ со стороны НН ($i_{LV}=0$) токи протекают только со стороны ВН, поэтому величины I_{diff} и I_{res} имеют одинаковые значения, что и отображается на рисунке 12,б. Мгновенные координаты рабочей точки равны между собой: $I_{diff} = I_{res}$, а траекторией ее перемещения является переходящая из области *NO TRIP* в область *TRIP* прямая наклонная линия, изображенная на рисунке 12,а. Это свидетельствует о том, что ДЗТ правильно отработала в рассматриваемом режиме, т.е. сформировала команду на отключение силовых выключателей.

Внешнее повреждение со стороны НН силового трансформатора, сопровождающееся насыщением ТТ

Режим работы модели (рис.б) 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*).

В рассматриваемом случае произошло излишнее срабатывание ДЗТ при внешнем КЗ. Причиной срабатывания является дифференциальный ток (рис.13,б), появившийся вследствие насыщения ТТ со стороны низшего напряжения силового трансформатора. Насыщение ТТ приводит к неполной трансформации первичного тока во вторичные цепи ТТ, что и приводит к нарушению равенства токов со сторон ВН и НН, т.е. дифференциальный ток $I_{diff} \neq 0$.

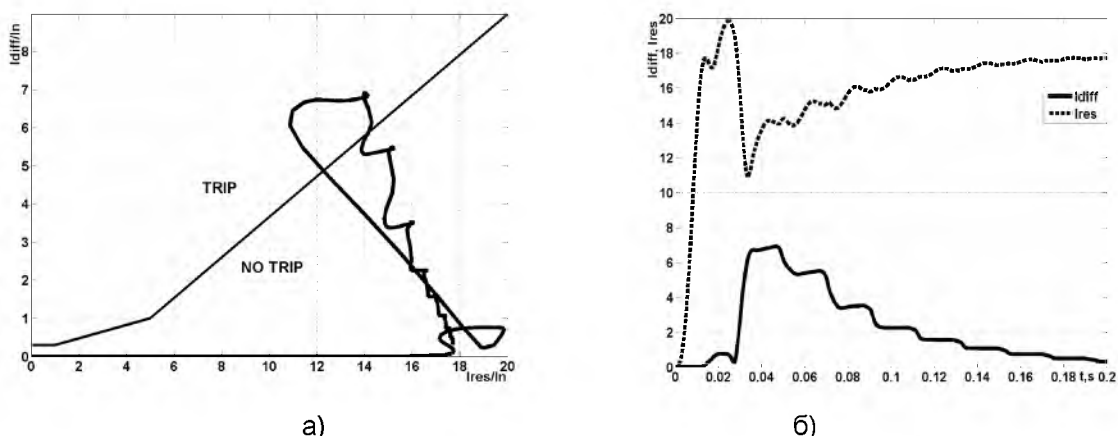


Рисунок 13 – Траектория перемещения рабочей точки при внешнем повреждении с насыщением ТТ (а); осциллограмма токов I_{diff} и I_{res} при внешнем повреждении с насыщением ТТ (б)

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 рисунке 13,а.

1.4 Аппаратно-программные испытательные комплексы для тестирования цифровых устройств релейной защиты

Для проверки работоспособности устройств релейной защиты испытания могут проводиться с использованием аппаратно-программных испытательных комплексов (АПИК).

Испытание ЦУРЗ с помощью АПИК может проводиться одним из двух способов: в режиме замкнутого контура (*closed-loop*) или в режиме разомкнутого контура (*open-loop*) (рис.14).

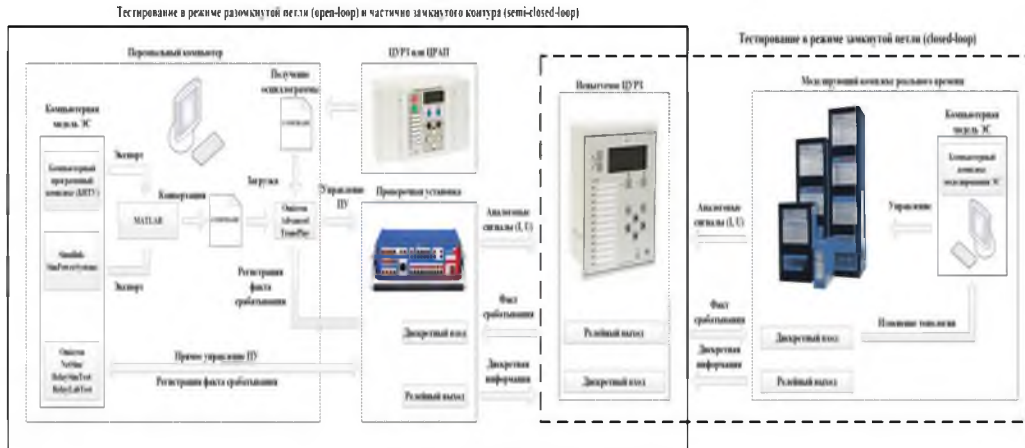


Рисунок 14 – Способы организации проведения тестирования защит

Тестирование в режиме замкнутого контура подразумевает наличие обратной связи между функционирующей в режиме реального времени моделью ОЭО и испытуемым ЦУРЗ. Модель ОЭО воспроизводится в режиме реального времени на аппаратно-программном моделирующем комплексе. Наиболее известным моделирующим комплексом в режиме реального времени является RTDS (Real Time Digital Simulator) [10, 18].

Симулятор RTDS (рис.15) 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 устройств 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. Однако чрезмерно высокая стоимость комплекса является основной проблемой его применения в проектных, научно-исследовательских и учебных организациях.



Рисунок 15 – Аппаратно-программный моделирующий комплекс RTDS

Тестирование в режиме разомкнутого контура является эффективным методом проверки устройств защиты в случае, если не требуется проверка взаимодействия устройств РЗ между собой и с энергосистемой.

Тестирование в режиме разомкнутого контура – это физическое воспроизведение заранее полученных входных сигналов защиты (осциллограмм аварийного процесса) с помощью проверочной установки (ПУ), к аналоговым выходам которой подключены аналоговые входы тока и (или) напряжения испытуемого ЦУРЗ. Управление ПУ обычно осуществляется при помощи персонального компьютера (ПК) 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 ОЭО 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 АПИК входит ПК, в котором реализуется модель энергосистемы или ОЭО 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» [19], компании OMICRON [20] или аналогичные комплексы других производителей.

Структурная схема АПИК с использованием ПУ СМС 356 фирмы OMICRON представлена на рисунке 16. Моделирование ОЭО проводится с помощью компьютерных программных комплексов, которые могут быть в виде самостоятельных программных продуктов или реализованы в компьютерных системах динамического моделирования типа Matlab-Simulink.

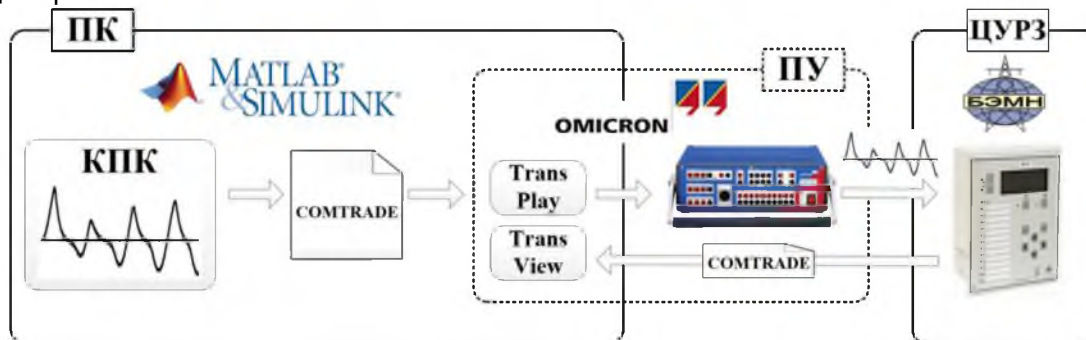


Рисунок 16 – Аппаратно-программный испытательный комплекс

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 ОЭО. Основными недостатками этих программ является ограниченный и мало документированный набор математических моделей силового оборудования, что не позволяет в полной мере моделировать сложные режимы и схемы ОЭО. Также не предусмотрена возможность создания пользовательских моделей силового оборудования.

Для проведения испытаний устройств РЗ с помощью АПИК могут быть использованы разработанные на кафедре «Электрические станции» БНТУ компьютерные программные комплексы, позволяющие получать методом вычислительного эксперимента входные информационные сигналы релейных защит линий электропередачи и силовых трансформаторов.

В ОАО «Белэлектромонтажналадка» проектируют и производят современные цифровые устройства релейной защиты, предназначенные для защиты линий электропередачи, двух- и трехобмоточных силовых трансформаторов. В микропроцессорном устройстве МР 801, производства ОАО «Белэлектромонтажналадка», реализованы основные токовые защиты

трансформаторов: дифференциальная токовая отсечка без торможения, дифференциальная токовая защита с торможением, а также направленная/ненаправленная максимальная токовая защита (МТЗ) и др.

С помощью АПИК на базе СМС 386 OMICRON были проведены испытания ЦУРЗ МР 801 (рис.17) с использованием заранее подготовленных аварийных осциллограмм, полученных с помощью выше описанных КПК. Сигналы вторичного тока ТТ, преобразованные в формат COMTRADE воспроизводились с помощью ПУ OMICRON СМС 356 и подавались на аналоговые токовые входы испытуемого ЦУРЗ. Управление проверочной установкой осуществлялось при помощи ПК с установленным на нем специализированным ПО *TransPlay*, обеспечивающим выбор и воспроизведение заранее подготовленных осциллограмм аварийных процессов в формате COMTRADE.



Рисунок 17 – Аппаратно-программный испытательный комплекс для проверки работоспособности цифрового реле МР 801

После подачи в устройство МР 801 каждого тестового воздействия осуществлялось сохранение записей его аварийного регистратора, в которых фиксировались время срабатывания испытуемой токовой защиты и форма подводимых тестовых воздействий (рис.18).

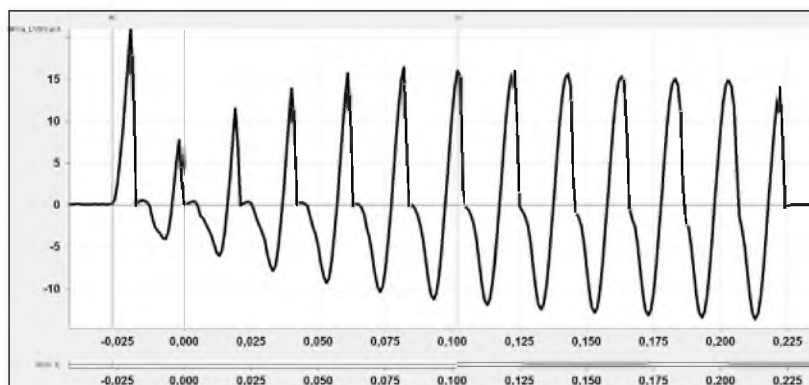


Рисунок 18 – Визуальная интерпретация файла аварийной осциллограммы ЦУРЗ МР801

Проведенные расчеты позволили выявить некоторые особенности работы МТЗ в составе реле МР801, которые не проявлялись при гармонических тестовых воздействиях. Так, при наличии в аварийном сигнале апериодической составляющей, когда ТТ входит в глубокое насыщение, его вторичный ток снижается по амплитуде в сравнении с идеально трансформируемым током. Это приводит к тому, что процесс выделения цифровым фильтром Фурье действующего значения контролируемого сигнала чрезмерно затягивается (до 3-4 периодов промышленной частоты), что приводит к затягиванию срабатывания реле.

Таким образом, использование компьютерных программных комплексов в качестве программного обеспечения АПИК для испытания цифровых токовых защит электроустановок позволяет при минимальных затратах времени формировать достоверные тестовые воздействия на проверяемые защиты, отличающиеся от реальных сигналов не более чем на 10-15%.

Заключение

Моделирование и вычислительный эксперимент являются основными инновационными инструментами в развитии новых направлений электроэнергетики. Проверку работоспособности устройств релейной защиты без учета реакции энергосистемы можно проводить в режиме разомкнутого контура с использованием аппаратно-программных испытательных комплексов на базе проверочных устройств и компьютерных программных комплексов.

На начальной стадии разработки новых устройств релейной защиты можно отказаться от использования дорогих аппаратно-программных испытательных комплексов и проводить проверку работоспособности защит с помощью более простых компьютерных испытательных комплексов методом вычислительного эксперимента. Комплексные модели защищаемого электроэнергетического объекта и его устройств защиты можно создавать на основе моделей гибкой структуры в системах динамического моделирования типа Matlab-Simulink.

Многолетний опыт использования компьютерных программных комплексов на базе математических моделей с жесткой структурой для проведения научных исследований, а также сопоставление результатов такого моделирования с натурными испытаниями, позволяет утверждать, что результаты комплексного математического моделирования с высокой степенью точности и достоверности воспроизводят процессы в реальных энергетических объектах. Поэтому, КПК с моделями жесткой структуры, необходимо рассматривать как эталон, с которым можно сравнивать результаты моделирования таких же электроэнергетических объектов, но выполненных в других системах моделирования, например, в Matlab-Simulink.

Список литературы:

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. Romanyuk, F. Validation of mathematical model of differential protection / F. Romanyuk, I. Novash, M. Loman, P. Węgiełek, M. Szrot // Przegląd elektrotechniczny. – 2014. – № 3. – P. 187–190.
5. 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
6. Дзбни, Дж. Simulink 4. Секреты мастерства / Дж. Б. Дзбни, Т.Л. Харман; Пер.с англ. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2003.-403 с.
7. SimPowerSystems. User's Guide. The MathWorks, Inc. – 2012. -411p.
8. Совершенствование математических моделей элементов распределительных сетей для исследования новых принципов выполнения микропроцессорных защит: отчет о НИР (заключительный по ГБ 11-05) / БНТУ; рук. темы И. В. Новаш. – Минск, – 2013. – 116 с. – № г. р. 20110998.
9. Совершенствование математических моделей элементов трансформаторных подстанций для исследования новых принципов выполнения микропроцессорных защит: отчет о НИР (заключительный по ГБ 14-18) / БНТУ; рук. темы И. В. Новаш. – Минск, – 2015. – 105 с. – № ГР 20141049.
10. 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.

11. IEEE Standard. Common Format for Transient Data Exchange (COMTRADE) for Power Systems // Power Systems Relay Committee of the IEEE Power Engineering Society
12. 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.
13. Дьяконов, В. П. MATLAB и Simulink для радиоинженеров / В.П. Дьяконов – М.: ДМК_Пресс, 2011. – 975 с.
14. 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.
15. Новаш, И. В. Расчет параметров модели трехфазного трансформатора из библиотеки MATLAB-Simulink с учетом насыщения магнитопровода / И. В. Новаш, Ю. В. Румянцев // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 2015. – № 1. – С. 12–24.
16. Справочник по проектированию электроэнергетических систем. Под ред. С.С. Рокотяна и И.М. Шапиро. М.: Энергоатомиздат, 1985.
17. Новаш, И. В. Упрощенная модель трехфазной группы трансформаторов тока в системе динамического моделирования / И. В. Новаш, Ю. В. Румянцев // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2015. – № 5. – С. 23–38.
18. Сайт компании «RTDS Technologies Inc. Canada» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.rtds.com Дата доступа: 26.11.2016.
19. Сайт научно-производственного предприятия «Динамика» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.dynamics.com.ru/> Дата доступа: 8.03.2016.
20. Сайт компании «OMICRON» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.omicronenergy.com/ru/> Дата доступа: 8.03.2016.