

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(Национальный исследовательский университет)
Политехнический институт. Энергетический факультет
Кафедра «Электрические станции, сети и системы электроснабжения»

РАБОТА ПРОВЕРЕНА

Рецензент, _____
(должность)

_____/_____/_____
(подпись и печать) (И.О. Фамилия)

« ____ » _____ 2020 г.

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой

_____/ И.М. Кирпичникова /

« ____ » _____ 2020 г.

«Влияние насыщения измерительных трансформаторов тока
на работу релейной защиты»

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ НАУЧНАЯ РАБОТА
ЮУрГУ – 13.04.02.2020.240 ВКР

Руководитель, доцент

_____/ К.Е. Горшков /

« ____ » _____ 2020 г.

Автор работы

студент группы П-282

_____/ С.В. Демичев /

« ____ » _____ 2020 г.

Нормоконтролёр, доцент

_____/ К.Е. Горшков /

« ____ » _____ 2020 г.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(Национальный исследовательский университет)
Политехнический институт. Энергетический факультет
Кафедра «Электрические станции, сети и системы электроснабжения»
Направление 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

_____ / И.М. Кирпичникова /

« ___ » _____ 2020 г.

ЗАДАНИЕ

на выпускную квалификационную научную работу магистра

Демичев Станислав Владимирович

Группа П-282

1. Тема выпускной квалификационной работы «Влияние насыщения измерительных трансформаторов тока на работу релейной защиты» утверждена приказом по университету от « ___ » _____ 2020 г. № _____

2. Срок сдачи студентом законченной работы « ___ » _____ 2020 г.

3. Исходные данные к работе

Паспорт трансформатора тока TG145N–1200/5. Нормативно-техническая литература.

4. Перечень вопросов, подлежащих рассмотрению

1. Требования к измерительным трансформаторам тока

1.1 Аналоговые измерительные трансформаторы тока

1.2 Электронные измерительные трансформаторы тока

1.3 Общие требования к измерительным трансформаторам тока

2. Влияние насыщения трансформаторов тока на работу релейной защиты.

3. Исследование насыщения трансформатора тока в среде MATLAB/Simulink

3.1 Модель насыщающегося трансформатора тока в ПК MATLAB

3.2 Модель для исследования насыщения трансформаторов тока при КЗ

3.3 Исследование насыщения трансформатора тока TG145N–1200/5

5. Перечень графического материала
Презентация, выполненная в программе Microsoft PowerPoint.

6. Дата выдачи задания « ____ » _____ 2020 г.

Руководитель работы _____
(подпись)

Задание принял к исполнению _____
(подпись студента)

КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН

Наименование этапов выпускной квалификационной работы	Дата завершения этапа	Отметка руководителя о выполнении
Анализ требований, предъявляемых к измерительным трансформаторам тока	20.12.18	
Анализ влияния насыщения трансформатора тока на работу релейной защиты	17.02.19	
Исследование насыщения трансформатора тока в среде MATLAB/Simulink	22.03.20	
Оформление дипломной работы	25.04.20	
Оформление презентации к докладу	29.05.20	

Заведующий кафедрой _____ / И.М. Кирпичникова /

Руководитель работы _____ / К.Е. Горшков /

Студент _____ / С.В. Демичев /

АННОТАЦИЯ

Демичев С. В. «Влияние насыщения измерительных трансформаторов тока на работу релейной защиты» – Челябинск: ЮУрГУ, П-282, 52 страниц, 47 иллюстраций, 11 таблиц. Библиография литературы – 7 наименования.

Выпускная квалификационная работа является завершающим этапом обучения. Ее основная цель – проверка качества знаний приобретенных во время обучения.

В основной части работы рассмотрена проблема влияния насыщения измерительных трансформаторов тока на работу релейной защиты. Рассмотрены требования, предъявляемые к измерительным трансформаторам тока. Выполнены исследования их работы на виртуальной модели. В результате исследовательской обозначены основные причины влияния насыщения трансформатора тока на работу релейной защиты, оценена погрешность.

В библиографическом списке указан перечень используемой нормативно-технической, справочной и учебной литературы.

При выполнении выпускной квалификационной работы были применены такие программы для ЭВМ как Microsoft Word, Mathcad, Microsoft Visio, MATLAB/Simulink.

					13.04.02.2020.240 ПЗ ВКР			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>				
<i>Разраб.</i>		Демичев С.В.			<i>Влияние насыщения трансформаторов тока на работу релейной защиты</i>	<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Провер.</i>		Горшков К.Е.					4	52
<i>Н. Контр.</i>		Горшков К.Е.				ЮУрГУ Кафедра ЭССиСЭ		
<i>Утв.</i>		Кирпичникова И.М.						

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. ТРЕБОВАНИЯ К ИЗМЕРИТЕЛЬНЫМ ТРАНСФОРМАТОРАМ ТОКА.....	7
1.1 Аналоговые измерительные трансформаторы тока	8
1.2 Электронные измерительные трансформаторы тока	10
1.3 Общие требования к измерительным трансформаторам тока.	12
1.3.1 Общие требования к аналоговым измерительным трансформаторам тока.....	12
1.3.2 Общие требования к электронным измерительным трансформаторам тока.....	20
2. ВЛИЯНИЕ НАСЫЩЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА НА РАБОТУ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ.....	25
3. ИССЛЕДОВАНИЕ НАСЫЩЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРА ТОКА В СРЕДЕ MATLAB/SIMULINK	32
3.1 Модель насыщающегося трансформатора тока в ПК <i>MATLAB</i>	32
3.2 Модель для исследования насыщения трансформаторов тока при КЗ	34
3.3 Исследование насыщения трансформатора тока TG145N–1200/5 ...	43
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	51
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	52

ВВЕДЕНИЕ

В устройствах релейной защиты и автоматики трансформаторы тока составляют важную роль. Трансформаторам тока в большинстве случаев приходится выполнять свои функции в режиме короткого замыкания при токах, многократно превышающих номинальные, в условиях переходного режима.

Назначение измерительных трансформаторов состоит в том, чтобы изолировать измерительные приборы и реле от цепей высокого напряжения и уменьшить токи (сотни и тысячи ампер) до величин, удобных для измерения.

Таким образом, изучение и исследование условий их функционирования, а также качества измерения, для работы релейной защиты и автоматики является актуальной задачей.

					13.04.02.2020.240 ПЗ ВКР	Лист
						6
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

1. ТРЕБОВАНИЯ К ИЗМЕРИТЕЛЬНЫМ ТРАНСФОРМАТОРАМ ТОКА

Измерительные трансформаторы – это группа электротехнических устройств, которые широко применяются для измерения значений основных параметров (ток, напряжение) в бытовых и промышленных сетях с частотой 50-60 Гц.

Главное назначение этих устройств заключается в уменьшении исходных параметров тока или напряжения в сети для обеспечения подключения измерительных приборов, различной автоматики и защитных систем (реле-прерыватели). Подключение к сети измерительного трансформатора позволяет разделить цепи высшего и низшего напряжения, что гарантирует дополнительную безопасность для работников профильных профессий (электромонтер, оператор силовых установок), особенно когда речь идет о сетях с высокими значениями тока и напряжения.

В зависимости от конкретного критерия можно выделить следующие виды измерительных трансформаторов:

- основной критерий – тип измеряемого значения. Существуют измерительные трансформаторы тока и напряжения, которые работают на линиях с постоянным или переменным током;
- по коэффициенту трансформации изделия могут быть многодиапазонными или однодиапазонными;
- если в качестве критерия брать способ установки, то можно выделить внешние, накладные, переносные, встраиваемые и внутренние трансформаторы;
- в зависимости от конструкции устанавливают различные типы диэлектриков – масляные, газовые или сухие;
- измерительным трансформатором тока называют трансформатор, предназначенный для преобразования тока до значения, удобного для измерения, и выполненный так, что вторичный ток, увеличенный в $K_{ном}$, соответствует с требуемой точностью первичному току как по модулю, так и по фазе. Множитель $K_{ном}$ представляет собой номинальный коэффициент трансформации трансформатора тока.

					13.04.02.2020.240 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		7

1.1 Аналоговые измерительные трансформаторы тока

Рассмотрим требования электромагнитной совместимости применяемые к аналоговым измерительным трансформаторам тока:

Электромагнитная совместимость (ЭМС) — это способность оборудования или системы функционировать с требуемым качеством в заданной электромагнитной обстановке, не создавая недопустимых электромагнитных помех другим техническим средствам.

Для измерительных трансформаторов установлены следующие требования по электромагнитной совместимости и соответствующие методы испытаний:

1.1.1 требование к помехоэмиссии

1.1.2 требование к помехоустойчивости

Требования к помехоустойчивости и соответствующие испытания установлены только для частей измерительных трансформаторов, содержащих активные электронные компоненты.

1.1.3 требование к передаваемым перенапряжениям

Перенапряжения, передаваемые с выводов первичной обмотки на выводы вторичной обмотки, не должны превышать значений, указанных в таблице 1.1 , при условиях испытаний и измерений. Импульс типа А применяют для испытаний измерительных трансформаторов, устанавливаемых в распределительных устройствах с воздушной изоляцией, тогда как импульс типа В — для испытаний измерительных трансформаторов, устанавливаемых в комплектном распределительном устройстве с элегазовой изоляцией. Форма импульсов типов А и В показана на рисунке 1.2.

Измерение предельно допустимых пиковых значений передаваемого перенапряжения, указанных в таблице 1.1 , обеспечивает достаточную защиту электронного оборудования, подключаемого к выводам вторичной обмотки измерительного трансформатора.

					13.04.02.2020.240 ПЗ ВКР	Лист
						8
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Таблица 1.1 – Предельно допустимые значения передаваемого перенапряжения

Тип импульса	А	В
Пиковое значение значение прикладываемого напряжения U_p	$1,6 \cdot \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \cdot U_m$	$1,6 \cdot \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \cdot U_m$
Типичная длительность фронта T_1	0,50 мкс ± 20%	-
Время полураспада T_2	≥ 50 мкс	-
Длительность фронта T_1	-	-
Длительность среза T_2	-	> 100 нс
Предельно допустимое пиковое значение передаваемого перенапряжения U_s	1,6кВ	1,6кВ

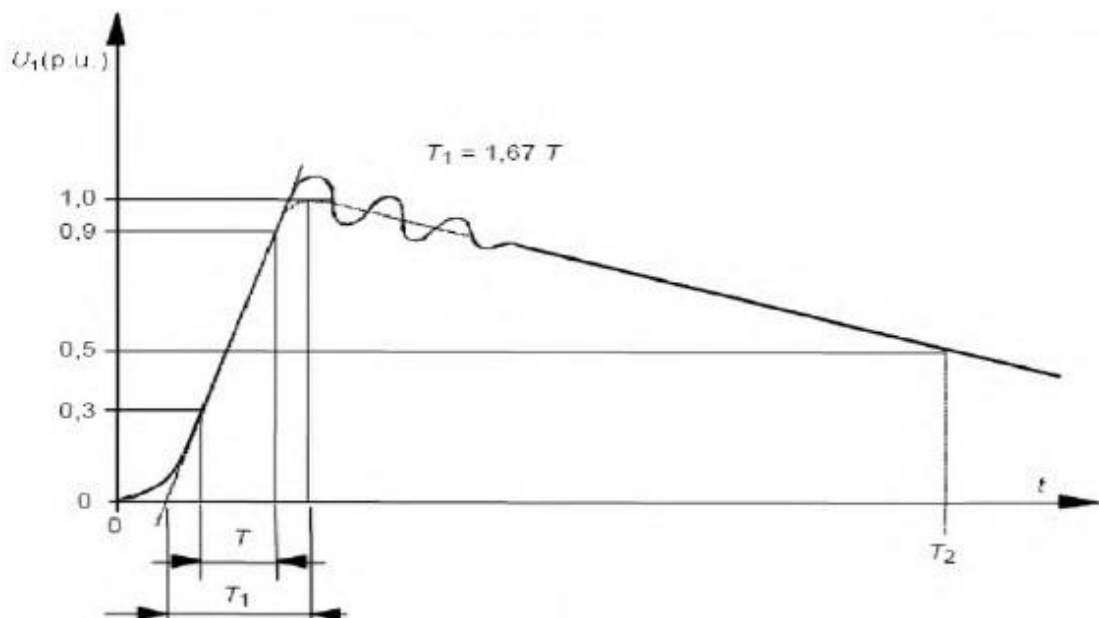


Рисунок 1.1 – Измерение передаваемых перенапряжений

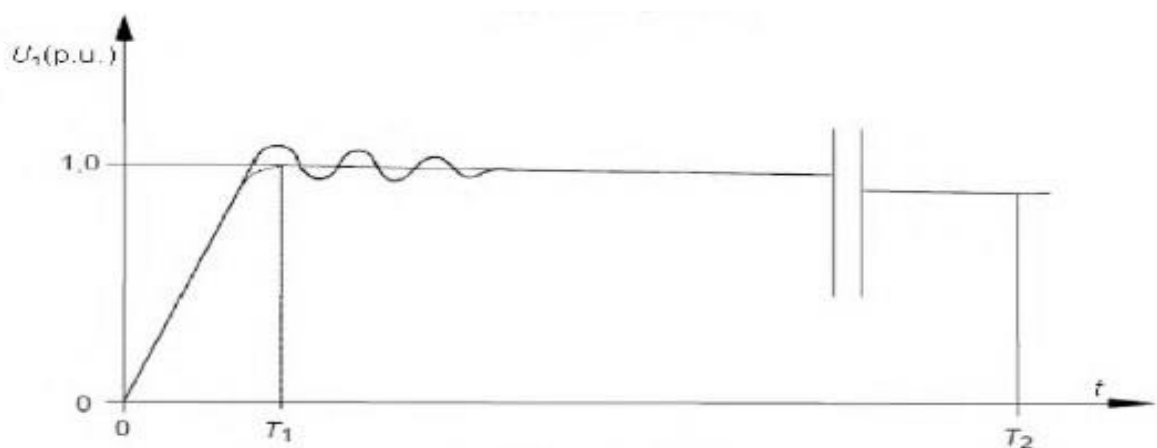


Рисунок 1.2 – Форма импульса

1.2 Электронные измерительные трансформаторы тока

Рассмотрим требования электромагнитной совместимости применяемые к электронным измерительным трансформаторам тока:

Чтобы оценить поведение электронного трансформатора тока в электромагнитной обстановке, необходимо установить соответствующие пределы эмиссии и устойчивости. Цель каждого из этих испытаний описана ниже.

1.2.1 Требования к эмиссии

1.2.2 Требования к устойчивости:

1.2.2.1 Гармонические и интергармонические помехи

Цель испытания – проверить устойчивость электронных трансформаторов тока к гармоникам и интергармоникам низковольтного электропитания. Это испытание применимо только к электронным трансформаторам тока, запитываемому от источника напряжения переменного тока.

1.2.2.2 Медленное измерение напряжения электропитания

Цель испытания – проверить устойчивость электронных трансформаторов тока к медленным изменениям напряжения низковольтного источника питания. Требование распространяется на электропитания от источников переменного и постоянного тока.

1.2.2.3 Устойчивость к провалам и прерываниям напряжения

Цель испытания – проверить устойчивость электронных трансформаторов тока к провалам и прерываниям напряжения низковольтного источника электропитания. Требование распространяется на электропитание от источников переменного и постоянного тока.

1.2.2.4 Устойчивость к выбросам напряжения

Цель испытания состоит в том, чтобы проверить устойчивость электронных трансформаторов тока к однонаправленным переходным процессам, вызванным перенапряжениями вследствие коммутации в силовой сети и разрядов молний(прямых или косвенных). Это испытание очень важно для высоких напряжений и высоковольтных установок из-за большой вероятности попаданий молнии.

					13.04.02.2020.240 ПЗ ВКР	Лист
						10
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

1.2.2.5 Устойчивость к быстрым переходным процессам и всплескам

Цель испытания – проверить устойчивость электронных трансформаторов тока к быстрым электрическим всплескам очень коротких нестационарных режимов, генерируемых переключением малых индуктивных нагрузок, дребезгом контактов реле (кондуктивные помехи) или переключением высоковольтной, или вакуумной коммутационной аппаратуры (радиопомехи).

1.2.2.6 Устойчивость к колебательным процессам

Цель испытания – проверить устойчивость электронных трансформаторов тока к повторяющимся колебательным волнам, возникающим в низковольтных цепях из-за коммутационных эффектов, появляющихся на подстанциях высокого и среднего напряжений (изоляторы высокого напряжения, разъединители на подстанциях открытого типа) или при авариях в сетях высокого и среднего напряжений.

1.2.2.7 Устойчивость к электростатическим разрядам

Цель испытания – проверить устойчивость электронных трансформаторов тока к электростатическим разрядам, сгенерированным касанием одежды оператора (непосредственно или при помощи инструмента) к оборудованию или его ближайшему окружению.

1.2.2.9 Устойчивость к магнитным полям промышленной частоты

Цель испытания – проверить устойчивость электронных трансформаторов тока к воздействию магнитных полей промышленной частоты, возникающих вследствие близости силовых кабелей (проводников сети), трансформаторов и т.д. в нормальном или неисправном состоянии.

Это испытание имеет большое значение из-за возможной эксплуатации электронных частей электронного трансформатора тока в непосредственной близости к силовым цепям.

1.2.2.10 Устойчивость к импульсным магнитным полям

Цель испытания – проверить устойчивость электронных трансформаторов тока к воздействию импульсных магнитных полей, вызванных ударами молнии в здания, металлические сооружения и наземные сети. Это испытание в основном

					13.04.02.2020.240 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		11

относится к электрооборудованию, установленному на высоковольтных подстанциях вследствие повышенной подверженности ударам молнии.

1.2.2.11 Устойчивость к воздействию магнитного поля с затухающими колебаниями

Цель испытания – проверить устойчивость электронных трансформаторов тока к затухающим колебательным магнитным полям, сгенерированным коммутацией высокого напряжения. Это испытание имеет большое значение для проверки возможности использования электронного оборудования, устанавливаемого на высоковольтных подстанциях.

1.2.2.12 Устойчивость к воздействию электромагнитного поля радиочастотного излучения

Цель испытания – проверить устойчивость электронных трансформаторов тока к электромагнитным полям, излучаемым радиопередатчиками или другими устройствами, передающими радиоволновую электромагнитную энергию. Важным фактором является возможность использования на подстанциях высокого и среднего напряжений портативных радиостанций и мобильных телефонов.

1.3 Общие требования к измерительным трансформаторам тока.

1.3.1 Общие требования к аналоговым измерительным трансформаторам тока.

1.3.1.1 Требования к жидким диэлектрикам, применяемым в электрооборудовании

Изготовитель должен указать тип и требуемое количество и качество жидкого диэлектрика, применяемого в электрооборудовании.

- Качество жидкого диэлектрика

Не бывшее в употреблении электроизоляционное масло, применяемое в электрооборудовании с масляной изоляцией, должно соответствовать требованиям, установленным в ИЕС 60296.

- Устройство контроля жидкого диэлектрика

					13.04.02.2020.240 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		12

Устройство контроля уровня жидкого диэлектрика (если оно входит в комплект поставки) в процессе эксплуатации электрооборудования должно определять, находится ли уровень жидкого диэлектрика в пределах рабочего диапазона.

- Герметизация жидкого диэлектрика

Утечка жидкого диэлектрика недопустима. Любая утечка жидкого диэлектрика приводит к опасности повреждения изоляции.

1.3.1.2 Требования к газообразным диэлектрикам, применяемым в электрооборудовании

- Качество газообразного диэлектрика

Максимально допустимое содержание влаги в измерительных трансформаторах, заполненных газообразным диэлектриком при номинальной плотности заполнения для изоляции, должно быть таким, чтобы температура точки росы не превышала минус 5 °С при температуре окружающего воздуха 20 °С. Соответствующая поправка должна быть введена в результат измерений, проводимых при другом значении температуры окружающего воздуха.

- Устройство контроля параметров газообразного диэлектрика

Измерительные трансформаторы с газовой изоляцией и минимальным рабочим давлением 0,2 МПА должны быть снабжены устройством контроля давления или плотности. Устройство контроля параметров газа может поставляться отдельно или совместно с соответствующим оборудованием.

1.3.1.3 Герметизация газообразных диэлектриков

Следующие установленные требования применяют ко всем измерительным трансформаторам, в которых в качестве изолирующей среды используют газообразный диэлектрик, но не воздух при атмосферном давлении.

- Замкнутые системы с повышенным давлением газа

Характеристика герметичности замкнутой системы с повышенным давлением газа, указанная изготовителем, должна соответствовать концепции минимального технического обслуживания и контроля.

					13.04.02.2020.240 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		13

Герметичность замкнутой системы с повышенным давлением газа определяется относительной скоростью утечки в каждом отсеке.

Ее нормированное значение для элегаза SF₆ и его смесей составляет 0,5% в год. Соответствующие средства должны быть предусмотрены для безопасного пополнения газом замкнутых систем во время работы оборудования.

Увеличение скорости утечки при предельных значениях температуры окружающего воздуха (если такие испытания предусмотрены в соответствующих стандартах) приемлемо при условии, что значение скорости утечки при возврате к нормальному значению температуры окружающего воздуха не будет превышать максимально допустимого значения скорости утечки, установленного для нормально значения температуры. Кратковременное увеличение скорости утечки не должно превышать значений, указанных в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Кратковременно допустимые значения скорости утечки для газовых систем

Температура окружающего воздуха, °С	Кратковременно допустимое значение скорости утечки
40 и 50	3F _p
Нормальное значение	F _p
-5/-10/-15/-25/-40	3F _p
-50	6F _p

где, F_p – кратковременно допустимое значение скорости утечки.

1.3.1.4 Требования к превышению температуры частей и элементов

Превышение температуры обмоток, магнитных цепей и любых других частей измерительного трансформатора должно быть не более соответствующих значений, приведенных в таблице 1.3, в нормальных условиях эксплуатации.

Превышение температуры обмоток ограничивается наименьшим значением температуры, установленной для термических классов, либо самой обмотки, либо окружающей ее среды. Если измерительный трансформатор помещен в оболочку,

то следует учитывать температуру, достигаемую окружающей охлаждающей средой внутри оболочки.

Таблица 1.3 – Предельные значения превышения температуры для различных частей, материалов диэлектриков измерительных трансформаторов

Часть измерительного трансформатора	Предельное значение превышения температуры, К
Измерительный трансформатор погруженный в масло	
масло в верхней части бака трансформатора	50
загерметизированное масло в верхней части бака трансформатора	55
промежуточная обмотка	60
промежуточная герметизированная обмотка	65
другие металлические части, контактирующие с маслом	Как для обмотки
Измерительный трансформатор с твердой или газовой изоляцией	
Промежуточная обмотка, контактирующая с изоляционными материалами следующих термических классов :	
Y	45
A	60
E	75
B	85
F	110
H	135
Болтовое или аналогичное соединение	
в воздухе	50
в SF ₆	75

Продолжение таблицы 1.3

в масле	60
Серебрянное или никелевое покрытие	
в воздухе	75
в SF ₆	75
в масле	60
Оловянное покрытие	
в воздухе	65
в SF ₆	65
в масле	60

1.3.1.5 Требования к заземлению электрооборудования

На оболочке каждого из устройств, если они предназначены для заземления, должна быть предусмотрена надежная клемма заземления для подключения к заземляющему проводнику, подходящему для конкретных условий неисправности.

- Заземление оболочки

Оболочка измерительного трансформатора, предназначенного для комплектного распределительного устройства, должна быть заземлена. Все металлические части, не относящиеся к силовым или вспомогательной цепям, должны быть заземлены.

- Непрерывность цепи заземления

Непрерывность цепи заземления должна быть обеспечена с учетом тепловых и электрических воздействий, обусловленных протекающим по ней током. Соединение между собой оболочек, каркасов и т.д. (например болтами или сваркой) достаточно для обеспечения непрерывности цепи заземления.

1.3.1.6 Требования к внешней изоляции

- Загрязнение

Для измерительных трансформаторов наружной установки с керамическими изоляторами, восприимчивыми к загрязнению, значения

					13.04.02.2020.240 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		16

длины пути утечки для установленных степеней загрязнения приведены в таблице 1.4 .

Таблица 1.4 – Предельные значения превышения температуры для различных частей, материалов диэлектриков измерительных трансформаторов

Степень загрязнения	Минимальное значение удельной длины пути утечки, мм/кВ	Значение отношения длины пути утечки к разрядному расстоянию
I - легкая	16	≤ 3.5
II - средняя	20	≤ 3.5
III - сильная	25	≤ 4.0
IV - очень сильная	31	≤ 4.0

1.3.1.7 Высота над уровнем моря

Для оборудования, эксплуатируемого на высоте более 1000м над уровнем моря, разрядное расстояние при стандартных атмосферных условиях определяют путем умножения значения требуемого выдерживаемого напряжения на коэффициент К согласно рисунку 1.3

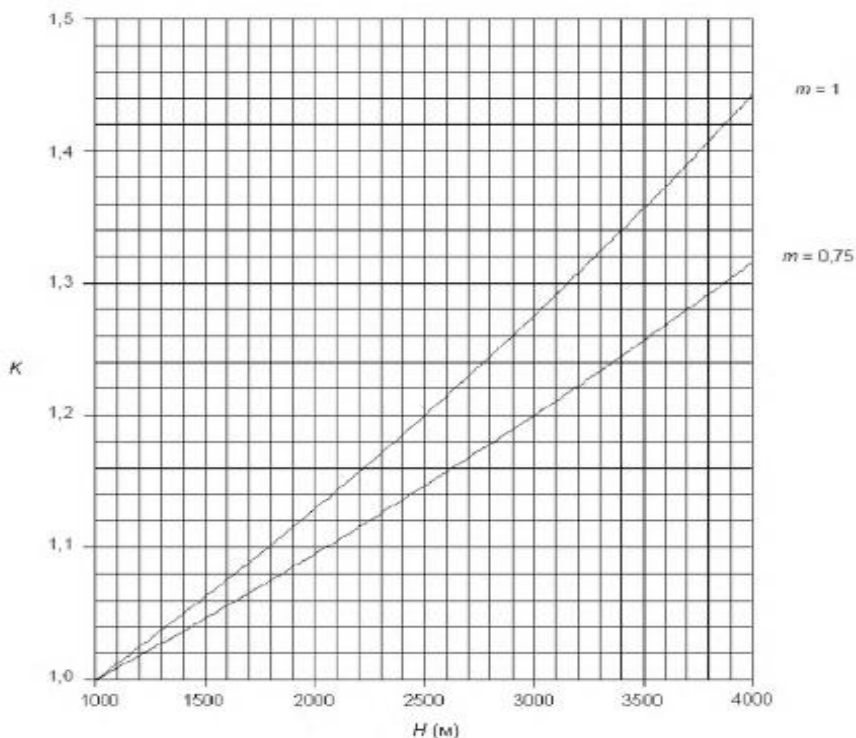


Рисунок 1.3 – Коэффициент корректировки высоты над уровнем моря

Коэффициент K определяют по следующей формуле

$$S_{\Gamma} = \frac{e^m \cdot (H - 1000)}{8150} \quad (1)$$

где H – высота над уровнем моря, выраженная в метрах;

$m = 1$ – для напряжения промышленной частоты и напряжения грозового импульса;

$m = 0,75$ – для напряжения коммутационного импульса.

1.3.1.8 Требования к механической прочности

Данные требования применяют только к измерительным трансформаторам при значении наибольшего рабочего напряжения $\geq 72,5$ кВ. Значения статических нагрузок, которые измерительные трансформаторы должны выдерживать, приведены в таблице 1.5. Приведенные значения учитывают нагрузку от ветра и обледенения.

Таблица 1.5 – Испытательные статические нагрузки

Наибольшее рабочее напряжение оборудования, кВ	Испытательная статическая нагрузка F_R , Н		
	Измерительные трансформаторы		
	Трансформатор напряжения	Трансформатор тока	
Класс нагрузки I		Класс нагрузки II	
72,5–100	500	1250	2500
123–170	1000	2000	3000
245–362	1250	2500	4000
≥ 420	1500	4000	5000

1.3.1.9 Требования к защите от электрической дуги при внутреннем коротком замыкании

Эти требования распространяются на маслонаполненные и автономные измерительные трансформаторы с газовой изоляцией при значении наибольшего рабочего напряжения $\geq 72,5$ кВ, для которых дополнительно установлен класс защиты от электрической дуги при внутреннем коротком замыкании. Длительность электрической дуги при внутреннем коротком замыкании должна соответствовать значениям, приведенным в таблице 1.6.

Таблица 1.6 – Длительность электрической дуги при внутреннем коротком замыкании и критерии классов защиты

Ток электрической дуги при внутреннем коротком замыкании(среднеквадратичное значение) , кА	Степень защиты	Длительность электрической дуги при внутреннем коротком замыкании, с	Защита от электрической дуги при внутреннем коротком замыкании. Класс I	Защита от электрической дуги при внутреннем коротком замыкании. Класс II
<40	1	0,2	Допускается образование трещин в кожухе, но не в других частях, находящихся внутри защитной оболочки	Внешний эффект отсутствует, кроме срабатывания соответствующего устройства сброса давления
	2	0,5		Повреждение кожуха не наблюдается
≥40	1	0,1		Внешний эффект отсутствует, кроме срабатывания соответствующего устройства сброса давления
	2	0,3	Повреждения нет	

1.3.2 Общие требования к электронным измерительным трансформаторам тока

1.3.2.1 Требования к изоляции

Низковольтные компоненты, такие как сумматор и вторичные конвертеры, обычно содержат несколько цепей с гальванической изоляцией между ними. Эта изоляция должна соответствовать требованиям, приведенным в таблице 1.7.

Таблица 1.7 – Электрическая прочность низковольтных цепей

Порты, подлежащие испытанию	Конструкция	Устойчивость к напряжению промышленной частоты	Устойчивость к импульсному напряжению
Клеммы источника питания	В соответствии с 6.2.10 МЭК 60694	2кВ переменного тока, 1 мин (для клемм энергоснабжения переменного тока) или 2,8 кВ постоянного тока, 1 мин (для клемм энергоснабжения постоянного тока)	5 кВ, 1,2/50 мкс
Вводы и выходы с гальванической развязкой между коммутационной аппаратурой и аппаратной оператора	Дизайн 1: Кабель парной скрутки с двойным экраном	1,5кВ переменного тока, 1 мин или 2,1кВ постоянного тока, 1 мин	5 кВ, 1,2/50 мкс
	Другие виды дизайна	2 кВ переменного тока, 1 мин или 2,8кВ постоянного тока, 1 мин	5 кВ, 1,2/50 мкс
Другие вводы и выходы	В соответствии с 6 МЭК 60255-5 МЭК	500В переменного тока, 1 мин или 700 кВ постоянного тока, 1 мин	

1.3.2.2 Требования к внешней изоляции

Если электронный трансформатор тока оборудован фарфоровым изолятором, он должен быть выполнен согласно МЭК 60815, если – композитным полым изолятором, то – соответствовать требованиям МЭК 61462.

1.3.2.3 Загрязнение

Для электронных трансформаторов наружной установки с фарфоровым изолятором высокого напряжения, восприимчивым к загрязнениям, длина пути тока утечки для различных уровней загрязнения дана в таблице 1.8.

Таблица 1.8 – Длина пути тока утечки для различных уровней загрязнения

Уровень загрязнения	Минимальная удельная длина пути тока утечки мм/кВ	Длина пути тока утечки/разрядное расстояние
I - легкая	16	≤3,5
II - средняя	20	
III - сильная	25	≤4,0
IV - очень сильная	31	

1.3.2.4 Требования к температуре нагрева

Электронные трансформаторы тока разрабатывают и конструируют таким образом, чтобы выдерживать без повреждения указанные для компонентов температуры нагрева и тепловые воздействия, вызванные следующими условиями:

- превышением максимальной температуры окружающего воздуха;
- изменением номинальной частоты;
- изменением номинального тока длительного нагрева ;
- превышением максимальной мощности рассеивания вторичного конвертера, вызванного увеличением напряжения электропитания или мощности вторичной нагрузки.

1.3.2.5 Требования к уровню напряжения радиопомех

Цель требований к уровню напряжения радиопомех – проверить эмиссию создаваемых электронными трансформаторами тока коронных разрядов, основными источниками которых являются высоковольтные участки и частичные разряды на поверхности корпуса изолятора.

1.3.2.6 Требования к устойчивости от перенапряжений

Цель требований к устойчивости от перенапряжений – проверить прохождение перенапряжений, распространяющихся от первичных вводов электронных трансформаторов тока к его вторичному выводу, сумматору или источнику питания.

Основной причиной перенапряжения является коммутация высоковольтного оборудования. Это требование не применяют, если используется система передачи, обеспечивающая гальваническую развязку.

1.3.2.7 Требование к механической прочности

Эти требования применяются только к электронным трансформаторам тока с предельным напряжением для оборудования с $U_{пр}=72,5\text{кВ}$ и выше.

В таблице 1.9 даны рекомендации по устойчивости электронных трансформаторов тока к статическим нагрузкам от ветра и наледи. Указанные испытательные нагрузки прикладываются в любом направлении к первичным вводам.

Таблица 1.9 – Длина пути тока утечки для различных уровней загрязнения

Значение предельного напряжения $U_{пр}$ кВ	Испытательная статическая нагрузка F_R , N	
	Класс нагрузки I	Класс нагрузки II
От 72,5 до 100	1250	2500
От 123 до 170	2000	3000
От 245 до 362	2500	4000
≥ 420	4000	6000

Примечание: сумма нагрузок, действующих в обычных рабочих условиях эксплуатации, не должна превышать 50% от испытательных.

В некоторых случаях электронные трансформаторы тока с проходными токовыми вводами должны выдерживать редко встречающиеся экстремальные динамические нагрузки (например, короткие замыкания), которые могут превышать в 1,4 раза статическую нагрузку при испытаниях.

В некоторых случаях необходимо установить сопротивление электронного трансформатора тока вращению первичных вводов. Момент кручения должен быть согласован между производителем и заказчиком

1.3.2.8 Требования к жидкости в оборудовании

Производитель определяет тип, требуемое количество и качество жидкости, которая должна использоваться в оборудовании, и обеспечивает пользователя необходимыми инструкциями для пополнения ее запаса и поддержания нужного количества и качества.

При необходимости в комплект поставки включают устройство для проверки уровня жидкости в период технического обслуживания электронного трансформатора тока с определением минимальных и максимальных пределов, допустимых для его правильной работы.

Жидкости для использования в маслонаполненном оборудовании должны соответствовать инструкциям изготовителя.

1.3.2.9 Требования к составу газа в оборудовании

Производитель определяет тип, требуемое количество, качество и плотность газа, который применяется в оборудовании, и обеспечивает пользователя необходимыми инструкциями для пополнения запаса и поддержания требуемого количества и качества, кроме герметизированных систем под давлением.

Для оборудования, заполненного серо-гексафторидом, новый газ должен соответствовать МЭК 60376.

Чтобы предотвратить конденсацию, максимально допустимое содержание влаги внутри оборудования, наполненного газом, при номинальной плотности заполнения для изоляции должно быть таким, чтобы точка росы (температура конденсации) не превышала -5°C при 20°C . Необходимо сделать соответствующие поправки для измерений, выполненных при других температурах. Для определения температуры конденсации.

Части корпуса высоковольтного оборудования , заполненного сжатым газом, должны соответствовать требованиям, установленным в соответствующих стандартах МЭК.

Указанные изготовителем характеристики герметичности закрытого под давлением электронного трансформатора тока должны быть совместимы с его минимальным обслуживанием и инспекционными принципами.

					<i>13.04.02.2020.240 ПЗ ВКР</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		23

Плотность внутреннего давления газа в электронном трансформаторе тока, обусловленная относительной нормой (скоростью) утечки не может превышать 0,5% в год.

1.3.2.10 Заземление оборудования

Для электронных трансформаторов тока с наивысшим рабочим напряжением $U_p \geq 1,2$ кВ корпус каждого устройства оборудования должен быть обеспечен клеммой с зажимным винтом или болтом для ее подключения к контуру заземления.

Диаметр зажимного винта или болта должен быть по крайней мере 8 мм и не менее 12мм для устройств, установленных в зоне размещения коммутационно аппаратуры $U_p \geq 36$ кВ.

Металлические части оборудования, связанные с контуром заземления, можно считать заземляющими проводниками.

					13.04.02.2020.240 ПЗ ВКР	Лист
						24
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

2. ВЛИЯНИЕ НАСЫЩЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА НА РАБОТУ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ

В переходных и установившихся режимах короткого замыкания трансформаторы тока токовых защит могут насыщаться и работать с повышенными погрешностями, величина которых зависит от многих, в ряде случаев трудноучитываемых факторов. Наиболее сильное влияние на величину погрешности оказывают : кратность токов повреждения, наличие апериодических составляющих в первичных токах и постоянные времени их затухания, схемы соединений вторичных обмоток трансформаторов тока и реле, величина и характер нагрузки трансформаторов тока. Согласно нормативным документам нагрузка на трансформатор тока выбирается таким образом, чтобы полная погрешность не превышала 10% при токах установившегося режима короткого замыкания, соответствующих характеру срабатывания.

В неустановившихся режимах работы , когда токи повреждения могут значительно превышать параметр срабатывания и в них содержатся апериодические составляющие, погрешности могут значительно возрастать и в наиболее неблагоприятных режимах в течение определенного времени достигать значений, близких к 80 – 100%.

При анализе влияния насыщения на поведение защит целесообразно рассматривать два случая:

- насыщение обусловлено наличием апериодических составляющих в токе короткого замыкания;
- насыщение при отсутствии апериодических составляющих, например из-за превышения допустимой нагрузки.

Следует отметить, что в трехфазных группах соединений трансформаторов тока могут наблюдаться одновременно оба случая насыщения. Трансформаторы тока разных фаз в общем случае работают с разными погрешностями и оказывают взаимное влияние друг на друга.

Условия работы трансформаторов тока на кабельных и воздушных линиях различны. Например, кабельные линии характеризуются относительно малыми индуктивными и большими активными сопротивлениями. Поэтому постоянные

					13.04.02.2020.240 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		25

времени затухания аperiodических составляющих токов таких линий относительно малы. Переходные процессы в этих линиях быстро затухают и становятся стационарными.

При наличии в первичных токах аperiodических составляющих в работе трансформаторов тока можно выделить ряд стадий. В начальной стадии трансформатор тока ненасыщен, и в трансформированных токах присутствуют аperiodические составляющие, а высшие гармоники отсутствуют. Длительность этой стадии может существенно изменяться и зависит от конкретных условий работы трансформатора тока. Насыщение может произойти на втором, третьем периоде, а в неблагоприятных условиях трансформатор тока насыщается уже в первый период.

При насыщении трансформатора тока аperiodическая составляющая во вторичном токе невелика и может изменять свой знак, появляются четные и нечетные гармоники. Содержание первой гармоники резко уменьшается. Из высших гармоник на интегральные характеристики несинусоидального вторичного тока может быть значительным. По мере затухания аperiodических составляющих трансформатор тока выходит из насыщения, и погрешности в трансформации первичного тока уменьшаются.

В качестве примера на рисунке 2.1 представлен характер изменения действующих значений приведенного первичного тока короткого замыкания с аperiodической составляющей I_1 , вторичного несинусоидального тока I_2 , первой I_{21} и второй I_{22} гармоник, содержащихся во вторичном несинусоидальном токе I_2 .

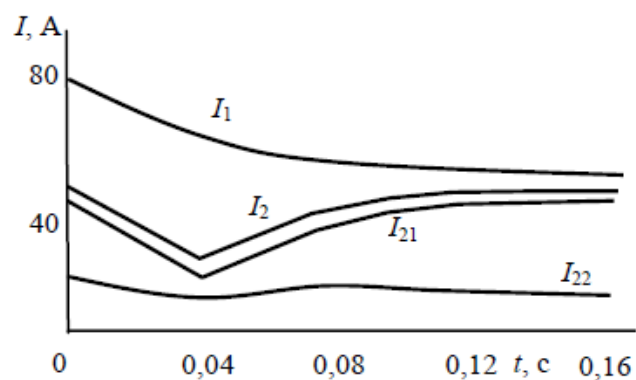


Рисунок 2.1 – Действующие значения токов переходного процесса в одном из трансформаторов тока трехфазной группы при трехфазном коротком замыкании

На рисунке 2.1 видно, что действующие значения токов в реле и величина погрешностей изменяется в течение всего времени существования переходного процесса. Здесь I_1 —приведенный первичный ток; I_2 — вторичный ток; I_{21} — первая гармоника вторичного тока; I_{22} — вторая гармоника вторичного тока.

Уменьшение вторичной нагрузки на трансформаторе тока при таком характере насыщения не является достаточно эффективным мероприятием по снижению погрешностей, так как трансформатор тока в неблагоприятных условиях могут насыщаться даже при закороченной вторичной обмотке.

Для уменьшения влияния насыщения трансформатора тока на работу защит предлагается использовать специальные алгоритмы восстановления сигнала, искаженного явлением насыщения. Однако решение этой задачи требует весьма сложных вычислений в течение процесса и значительного увеличения числа отсчетов на период основной частоты. У цифровых реле ряда зарубежных фирм наряду с трансформаторами тока традиционного исполнения предусматривается возможность использования первичных измерительных преобразователей тока в виде катушки Роговского. Аперiodические составляющие такими преобразователями фактически не трансформируются. Отсутствие ферромагнитного сердечника обеспечивает малую погрешность преобразования и малую отдаваемую мощность. Высокая точность измерения (до 0,1 %) позволяет выбрать степень селективности между двумя смежными защитами минимальной, что делает их перспективными для цепей релейной защиты.

Если в первичных токах короткого замыкания аперiodические составляющие отсутствуют, то во вторичных токах при насыщении трансформатора тока появляются только нечетные гармоники, а величина погрешности остается практически неизменной в течение всего времени короткого замыкания. При таком характере насыщения уменьшение вторичной нагрузки на трансформаторе тока является достаточно эффективным мероприятием по снижению погрешностей.

В настоящее время электромеханические устройства релейной защиты энергообъектов поэтапно заменяются микропроцессорными, что позволяет обеспечить более быстрое отключение повреждений за счет снижения степени селективности

					13.04.02.2020.240 ПЗ ВКР	Лист
						27
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

до значения 0,10-0,15 с, более высокую точность обработки входной информации. Основная погрешность по току срабатывания обычно составляет 2-5%, коэффициент возврата находится в диапазоне 0,95-0,96. Собственное время срабатывания измерительных органов ориентировочно составляет 30-50 мс. Однако эти преимущества микропроцессорных устройств защиты при существующих алгоритмах функционирования в значительной мере утрачиваются из-за необходимости согласования их характеристик с характеристиками электромеханических устройств и предохранителей, а также из-за насыщения трансформаторов тока.

Электромеханические и микропроцессорные устройства защиты имеют различные методы обработки входной информации. Электромеханические реле реагируют на квадрат действующего значения тока в реле, содержащего в общем случае апериодическую составляющую, периодическую составляющую основной частоты и высшие гармоники. В микропроцессорных измерительных органах условием срабатывания является превышение интегральным значением тока реле I_p уставки срабатывания: $I_p > I_{cp}$, а условием возврата $I_p < I_{cp}$. В микропроцессорных реле разных фирм в качестве интегрального значения могут использоваться среднее, действующее или амплитудное значения, которые могут вычисляться на различных интервалах времени и с различным шагом дискретизации. Кроме того, интегральные значения могут определяться различными способами. При неискаженных синусоидальных входных сигналах в установившихся режимах работы все способы дают примерно одинаковые результаты независимо от того, какое значение вычисляется, так как все они связаны известными коэффициентами. Однако при несинусоидальных входных токах результаты измерения могут быть различными. У многих микропроцессорных реле, использующих в качестве цифровых фильтров ортогональное разложение Фурье, из несинусоидального входного сигнала выделяется первая гармоника, так как амплитудно-частотная характеристика таких реле подобна характеристике полосового фильтра.

Для токовых измерительных органов ряда фирм неизвестно, на какое значение они фактически реагируют, что затрудняет сравнительный анализ токовых

					13.04.02.2020.240 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		28

измерительных органов разных производителей и оценку их поведения в переходных режимах работы. Следует также отметить, что независимо от элементной базы все расчеты по выбору токов срабатывания (уставок) ведутся по действующим значениям установившегося режима, когда входные сигналы синусоидальны, в то время как рабочим режимом, особенно для быстродействующих защит, является неустановившийся режим короткого замыкания, который сопровождается появлением апериодических составляющих и, как правило, насыщением трансформатора тока. Степень влияния насыщения трансформатора тока на работу ступенчатых токовых защит, имеющих в своем составе токовые отсекки и максимальные токовые защиты и выполненных на разных принципах, различна. Это следует учитывать при согласовании характеристик смежных защит распределительной сети.

Особенно подвержены влиянию насыщения быстродействующие ступени защиты и максимальные токовые защиты с обратозависимыми от тока характеристиками выдержки времени. В микропроцессорных защитах часто используются характеристики по стандарту МЭК

$$t_{cp} = \frac{k\beta}{(I_p/I_{cp})^\alpha - 1} \quad (2)$$

где I_p/I_{cp} – кратность тока короткого замыкания по отношению к току срабатывания защиты;

α, β – коэффициенты, определяющие крутизну характеристики.

На рисунке 2.2 показан фрагмент схемы распределительной сети, защиты смежных участков которой требуют согласования характеристик.

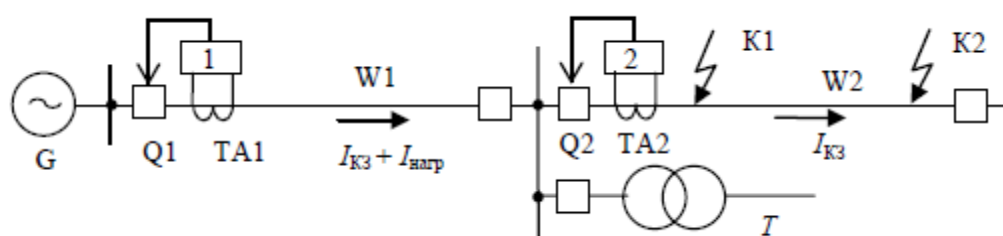


Рисунок 2.2 – Фрагмент сети, защиты которой требуют согласования характеристик

В соответствии с существующей методикой расчета, чем ближе расположена защита к источнику питания, тем большее ее ток срабатывания, коэффициенты трансформации трансформаторов тока и время срабатывания максимальной токовой защиты с независимой характеристикой выдержки времени. При использовании максимальной токовой защиты с обратнозависимыми времятоковыми характеристиками выдержка времени защиты 1 должна превышать выдержку времени защиты 2 на ступень селективности Δt при максимальном значении тока трехфазного короткого замыкания в точке К1 в месте установки защиты 2. Это условие должно выполняться не только при токах $I_{к1\max}^{(3)}$, но при всех меньших токах короткого замыкания. При одном и том же значении тока короткого замыкания, протекающего по первичным обмоткам трансформаторов тока ТА1 и ТА2, условия их насыщения различны, в первую очередь по причине различной кратности тока короткого замыкания (по отношению к первичному номинальному току трансформатора тока), так как с увеличением указанной кратности повышается вероятность насыщения трансформатора тока. При насыщении ТА2 ток в реле I_p уменьшается по сравнению с расчетным значением, что приводит к увеличению времени срабатывания защиты 2. Для предотвращения неселективных действий необходимо увеличивать ступень селективности Δt , что приводит к более медленной ликвидации повреждений в распределительной сети. При глубоком насыщении ТА2 ток в реле может оказаться меньше тока возврата, что также может явиться причиной неселективного действия максимальной токовой защиты как с независимой, так и с обратнозависимой времятоковой характеристикой.

На поведение токовой отсечки мгновенного действия, выполненных на электромеханической элементной базе, большое влияние могут оказывать апериодические составляющие в токах короткого замыкания. Степень этого влияния увеличивается с уменьшением времени срабатывания токовой отсечки. Под действием апериодических составляющих зона действия токовой отсечки увеличивается по сравнению с расчетными значениями, что может явиться причиной неселективных действий защиты. При насыщении трансформаторов тока в зависимости от характера их насыщения защищаемые токовой отсечкой

					13.04.02.2020.240 ПЗ ВКР	Лист
						30
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

зоны могут сокращаться или может увеличиваться время их действия. Электромеханические токовые отсечки оказываются также более чувствительными к броскам тока намагничивания при включениях силовых трансформаторов или при восстановлении напряжения после отключения внешних коротких замыканий. У микропроцессорных устройств защиты зона действия токовой отсечки более стабильна, так как устраняется влияние апериодических составляющих и высших гармоник. Они оказываются также менее чувствительными к броскам тока намагничивания.

Микропроцессорные устройства являются высокоточными и имеют более стабильные характеристики по сравнению с их электромеханическими аналогами. Погрешности измерительных трансформаторов тока традиционного исполнения могут значительно превышать погрешности микропроцессорных устройств защиты, что является причиной снижения эффективности их использования.

Насыщение трансформатора тока как в установившихся, так и в переходных режимах работы может приводить к более медленной ликвидации повреждений и неселективным действиям защиты. Учет насыщения трансформаторов тока, соединенных в определенную трехфазную группу, представляет значительные трудности. Наиболее полный учет насыщения может быть выполнен на основе комплексных математических моделей распределительной сети и устройств защиты методом вычислительного эксперимента. Такую оценку поведения устройств защиты целесообразно выполнять как на этапе разработки новых устройств с более совершенными алгоритмами функционирования, так и в условиях эксплуатации.

					13.04.02.2020.240 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		31

3. ИССЛЕДОВАНИЕ НАСЫЩЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРА ТОКА В СРЕДЕ MATLAB/SIMULINK

3.1 Модель насыщающегося трансформатора тока в ПК *MATLAB*

В комплексе *MATLAB* имеется ряд готовых элементов и математических моделей. Рассмотрим их. Элемент насыщающегося трансформатора тока, реализованный в программном комплексе *MATLAB*, представлен на рисунке 3.1

Saturable Transformer (mask) (link)
Implements a three windings saturable transformer.
Click the Apply or the OK button after a change to the Units popup to confirm the conversion of parameters.

Configuration Parameters Advanced

Units pu

Nominal power and frequency [Pn(VA) fn(Hz)]:
[25 50]

Winding 1 parameters [V1(Vrms) R1(pu) L1(pu)]
[5*5/2000 0.001 0.04]

Winding 2 parameters [V2(Vrms) R2(pu) L2(pu)]
[5 0.001 0.04]

Winding 3 parameters [V3(Vrms) R3(pu) L3(pu)]
[5 0.001 0.04]

Saturation characteristic [i1 phi1; i2 phi2; ...] (pu)
[0 0 ; 0.01 10 ; 1 10.5]

Core loss resistance and initial flux [Rm phi0] or [Rm] (pu)
[100]

OK Cancel Help Apply

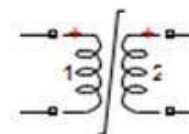


Рисунок 3.1 – Насыщающийся трансформатор тока

На рисунке 3.1 показаны параметры которые можно указать в модели исследуемого трансформатора тока. В первой строке можно выбрать в каких единицах будут задаваться параметры трансформатора тока в относительных единицах или в СИ единицах.

Во второй строке указывается номинальная мощность вторичной обмотки трансформатора тока и частота. В третьей, четвертой и пятой строке можно задать параметры первичной и вторичной обмотки, такие как : напряжение, активное и индуктивное сопротивление обмоток. В шестой строке указываются параметры для построения характеристики насыщения. В последней строке указывается активное сопротивление ветви намагничивания.

Схема замещения трансформатора тока представлена на рисунке 3.2

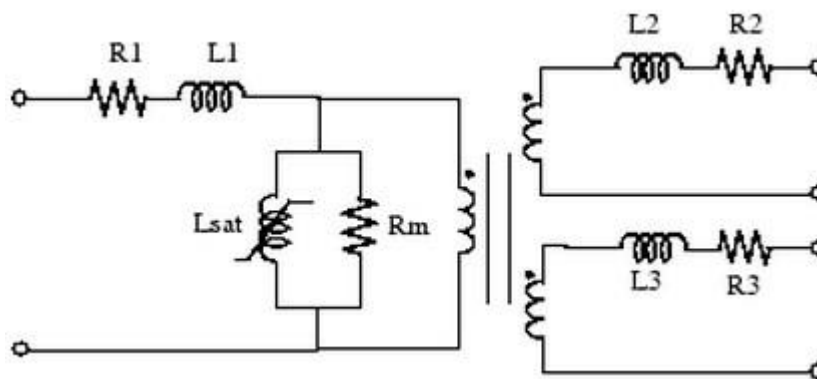


Рисунок 3.2 – Схема замещения трансформатора тока

На схеме замещения видно, что в данной модели учитываются активные сопротивления обмоток R_1 , R_2 , R_3 и индуктивные сопротивления L_1 , L_2 , L_3 обмоток трансформатора, а также характеристики намагничивания сердечника, которые моделируются сопротивлением R_m , моделирующим активные потери в сердечнике, и насыщающей индуктивностью L_{sat} .

Так как данная модель позволяет указывать активное и индуктивное сопротивление обмоток в относительных единицах, рассмотрим пример расчета этих значений для каждой обмотки. Базисное сопротивление обмотки рассчитывается по формуле:

$$R_{\sigma} = \frac{V_n^2}{P_n}, \quad (3)$$

где, V_n – номинальное напряжение обмотки трансформатора, В;

P_n – номинальная мощность трансформатора, ВА

Пример расчета по формуле (3) базисного сопротивления трансформатора тока:

$$R_{\sigma} = \frac{(735 \cdot 10^3 / \sqrt{3})^2}{250 \cdot 10^6} = 720,3 \text{ Ом}$$

Базисное индуктивное сопротивление обмотки рассчитывается по формуле:

$$L_{\sigma} = \frac{R_{\sigma}}{2 \cdot \pi \cdot f_n}, \quad (4)$$

где, R_{σ} – базисное сопротивление обмотки трансформатора;

π – число ПИ;

f_n –номинальная частота, Гц;

Пример расчета по формуле (4) базисного индуктивного сопротивления трансформатора тока:

$$L_{\sigma} = \frac{720,3}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 2,29 \text{ Гн}$$

Если параметры первичной обмотки трансформатора равны $R_1=1,44 \text{ Ом}$ и $L_1=0,1528 \text{ Гн}$, то для того чтобы получить сопротивления обмоток трансформатора в относительных единицах, нужно воспользоваться формулами:

$$R^* = \frac{R_1}{R_{\sigma}}, \quad (5)$$

Пример расчета по формуле (5) сопротивления трансформатора тока в относительных единицах:

$$R^* = \frac{1,44}{720,3} = 0,002 \text{ о. е.}$$

Индуктивное сопротивление рассчитывается по формуле:

$$L^* = \frac{L_1}{L_{\sigma}}, \quad (6)$$

Пример расчета по формуле (6) индуктивного сопротивления трансформатора тока в относительных единицах:

$$L^* = \frac{0,1528}{2,29} = 0,06 \text{ о. е.}$$

3.2 Модель для исследования насыщения трансформаторов тока при КЗ

Модель для исследования трансформатора тока при возникновении КЗ, реализована в программном комплексе *MATLAB*, представлена на рисунке 3.3

					13.04.02.2020.240 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		34

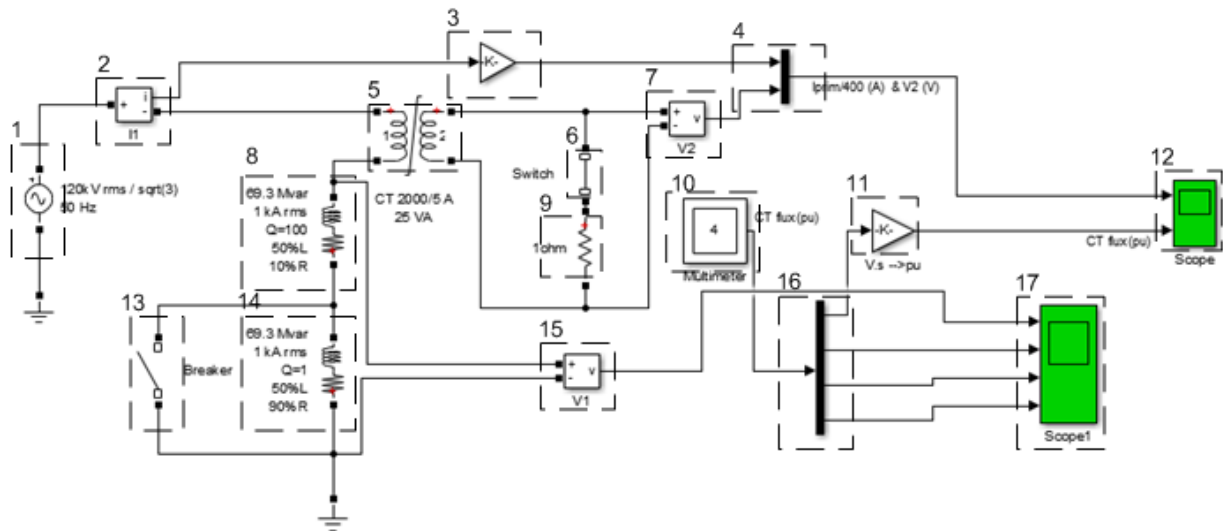


Рисунок 3.3 – Модель для исследования насыщения трансформатора тока при КЗ
 Структура элементов 1-17 (рис. 3.3) представлена на рисунках 3.4-3.19
 соответственно.

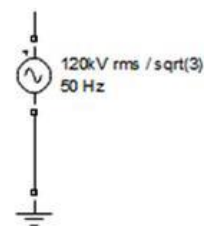
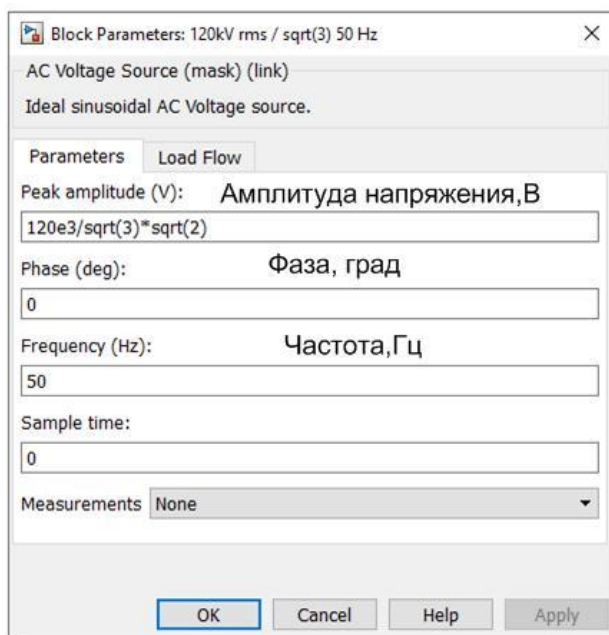


Рисунок 3.4 – Источник синусоидального напряжения(1)

В источнике синусоидального напряжения можно указать : амплитуду напряжения в вольтах, фазу в градусах и частоту в Гц.

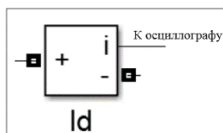


Рисунок 3.5 – Измеритель тока (2)

Измеритель тока используется для измерения мгновенного тока, протекающего в любом электрическом блоке или соединительной линии.



Рисунок 3.6 – Множитель (3)

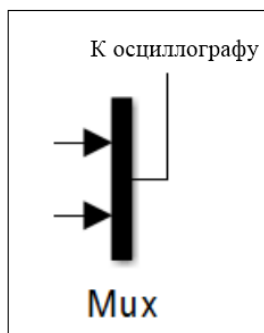


Рисунок 3.7 – Мультиплексор (4)

Этот элемент служит для объединения сигналов.

Saturable Transformer (mask) (link)
Implements a three windings saturable transformer.
Click the Apply or the OK button after a change to the Units popup to confirm the conversion of parameters.

Configuration Parameters Advanced

Units pu

Nominal power and frequency [Pn(VA) fn(Hz)]:
[25 50]

Winding 1 parameters [V1(Vrms) R1(pu) L1(pu)]
[5*5/2000 0.001 0.04]

Winding 2 parameters [V2(Vrms) R2(pu) L2(pu)]
[5 0.001 0.04]

Winding 3 parameters [V3(Vrms) R3(pu) L3(pu)]
[5 0.001 0.04]

Saturation characteristic [i1 phi1; i2 phi2; ...] (pu)
[0 0 ; 0.01 10 ; 1 10.5]

Core loss resistance and initial flux [Rm phi0] or [Rm] (pu)
[100]

OK Cancel Help Apply

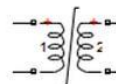


Рисунок 3.8 – Насыщающийся трансформатор тока (5)

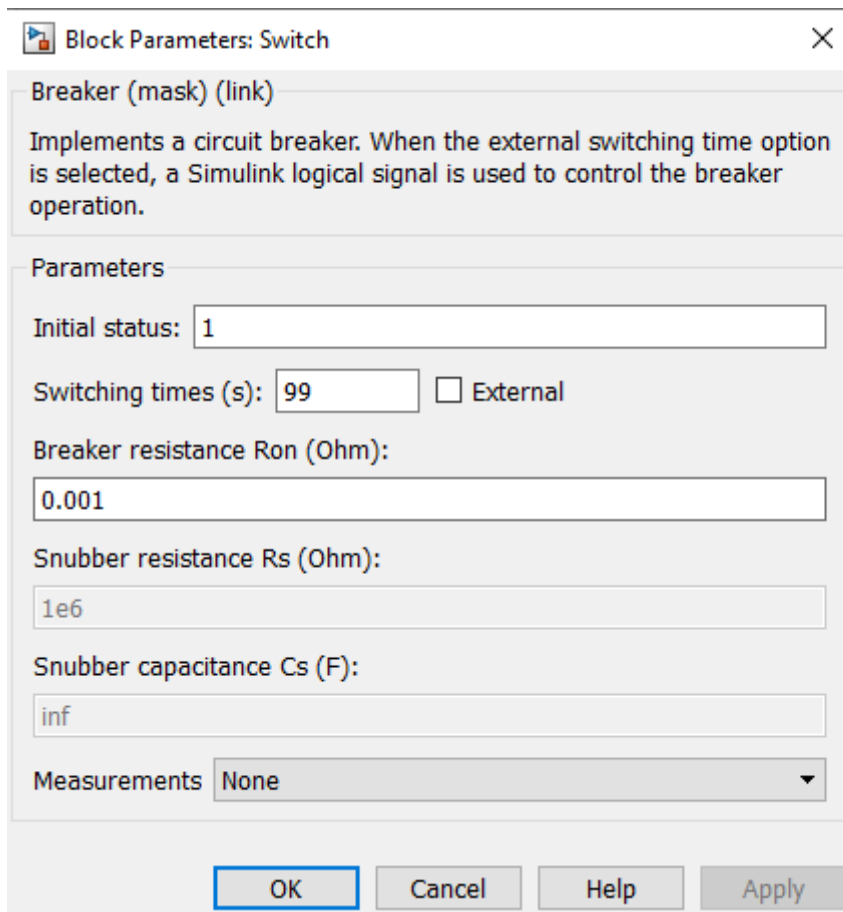


Рисунок 3.9 – Выключатель (6)

В первой строке указывается статус выключателя включен или выключен, далее указывается время включения или отключения и внутренне сопротивление переключателя.

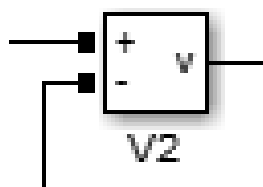


Рисунок 3.10 – Измеритель напряжения (7)

Данный элемент измеряет напряжение вторичной обмотки.

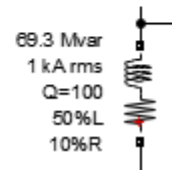
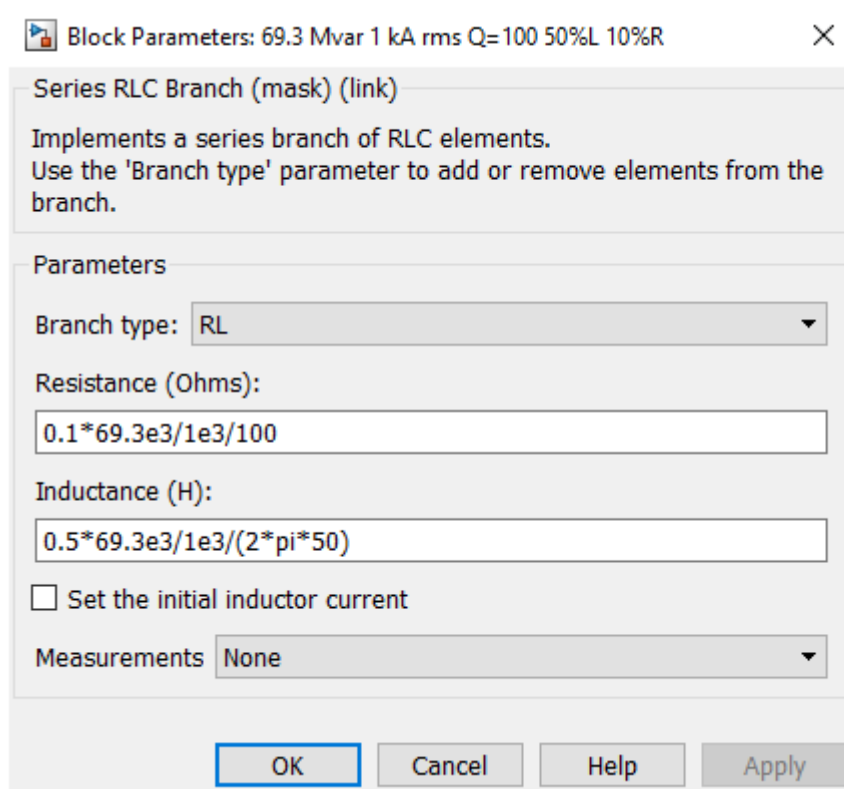


Рисунок 3.11 – Эквивалентное сопротивление (8)

Эквивалентное сопротивление для первичной обмотки в данной модели имитирует нагрузку на трансформатор тока. В этом элементе можно указать значения активного и индуктивного сопротивления.

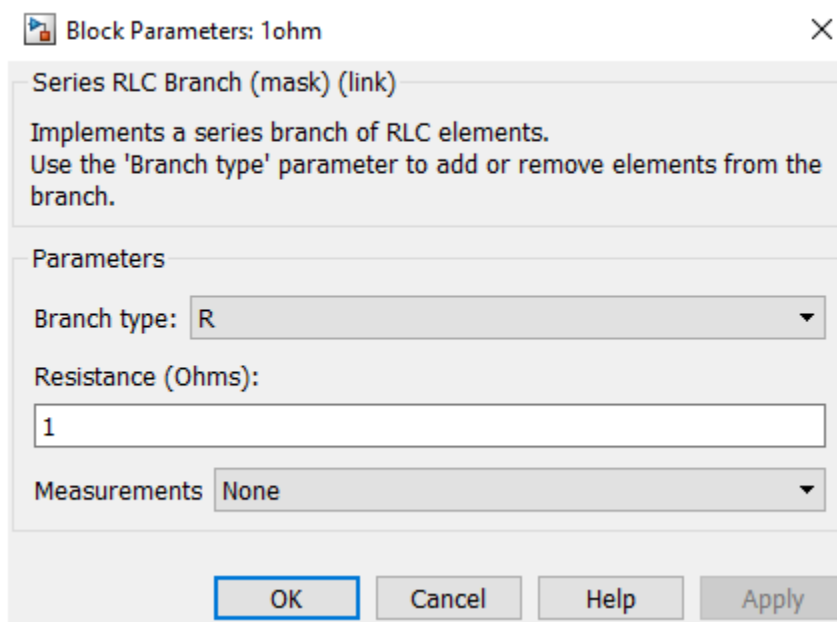


Рисунок 3.12 – Сопротивление (9)

Данный элемент выполняет функцию нагрузки для вторичной обмотки трансформатора тока.

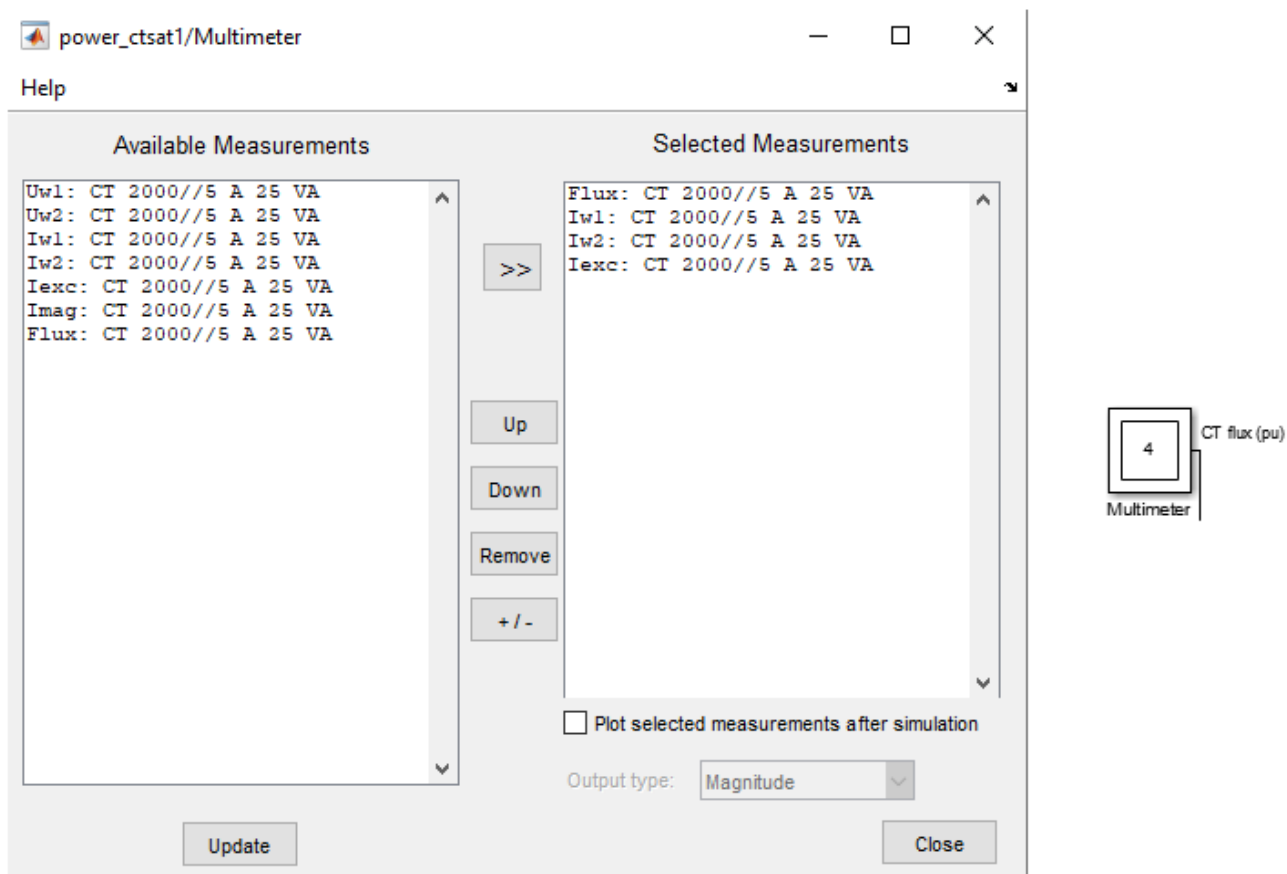


Рисунок 3.13 –Мультиметр (10)

Элемент мультиметр непосредственно подключен к трансформатору тока. В левом окне показаны параметры , которые можно извлечь из трансформатора тока, такие как : напряжение первичной и вторичной обмотки, ток первичной и вторичной обмотки, ток возбуждения, ток намагничивания, магнитный поток. В правом окне можно указать какие параметры будут отображаться на осциллограммах.



Рисунок 3.14 – Множитель (11)

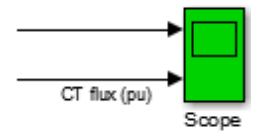
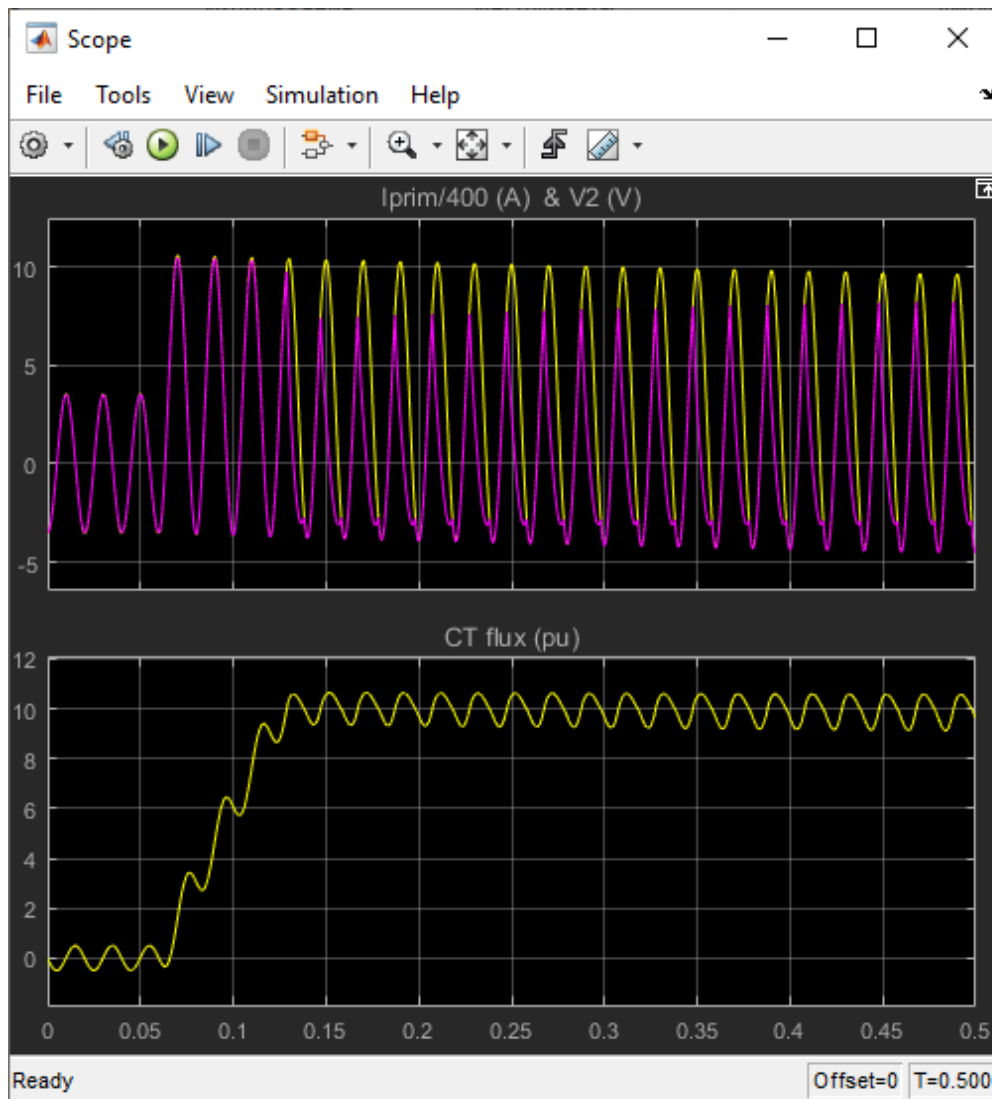


Рисунок 3.15 – Осциллограф (12)

Осциллограф показывает время расчета, которое можно задать. На верхней осциллограмме показан ток первичной обмотки желтым цветом в относительных единицах и напряжение вторичной обмотки полученное с измерителя напряжения (7). На нижней осциллограмме показана кривая изменения магнитного потока внутри трансформатора тока.

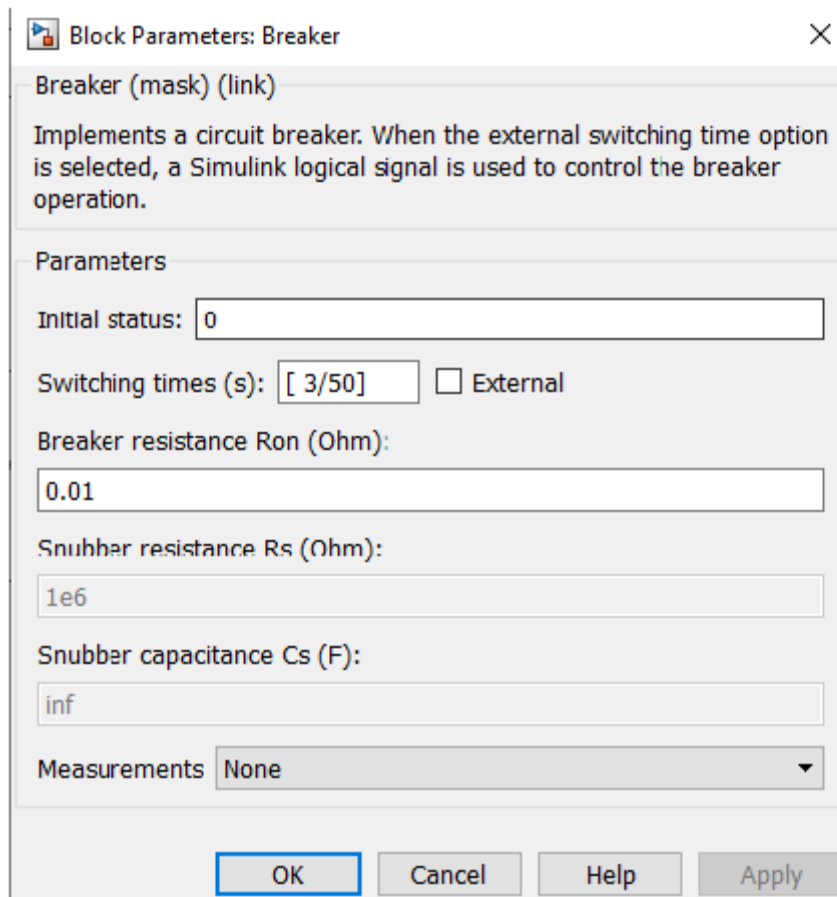


Рисунок 3.16 – Выключатель (13)

Во второй строке можно задать момент включения и отключения выключателя, по умолчанию выключатель отключен.

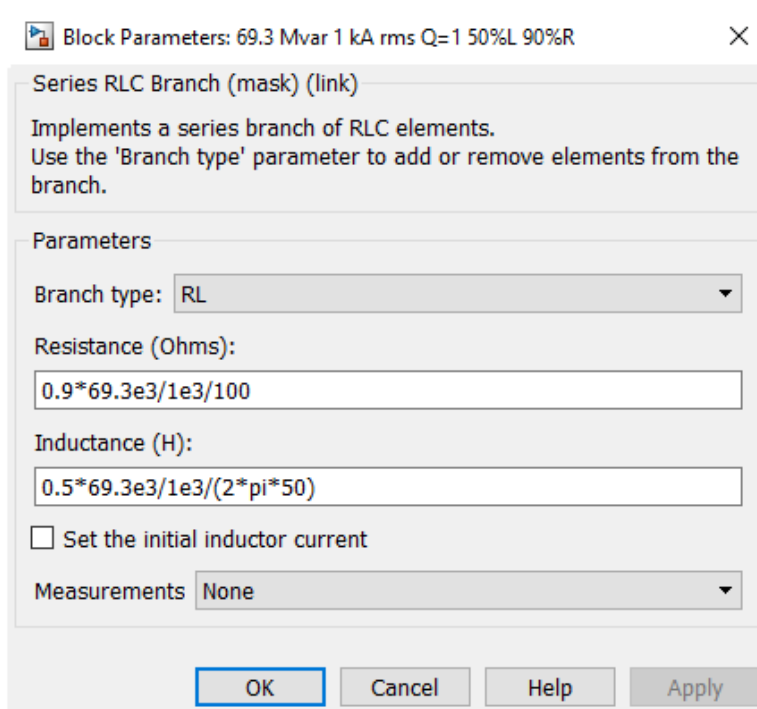


Рисунок 3.17 – Эквивалентное сопротивление (14)

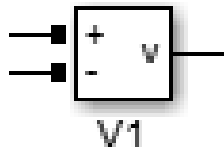


Рисунок 3.18 – Измеритель напряжения (15)

Данный элемент измеряет напряжение первичной обмотки трансформатора тока.

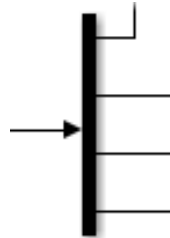


Рисунок 3.17 – Демультимплекатор (16)

Демультимплекатор служит для того чтобы преобразовать входной сигнал в отдельные виды сигналов.

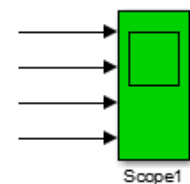
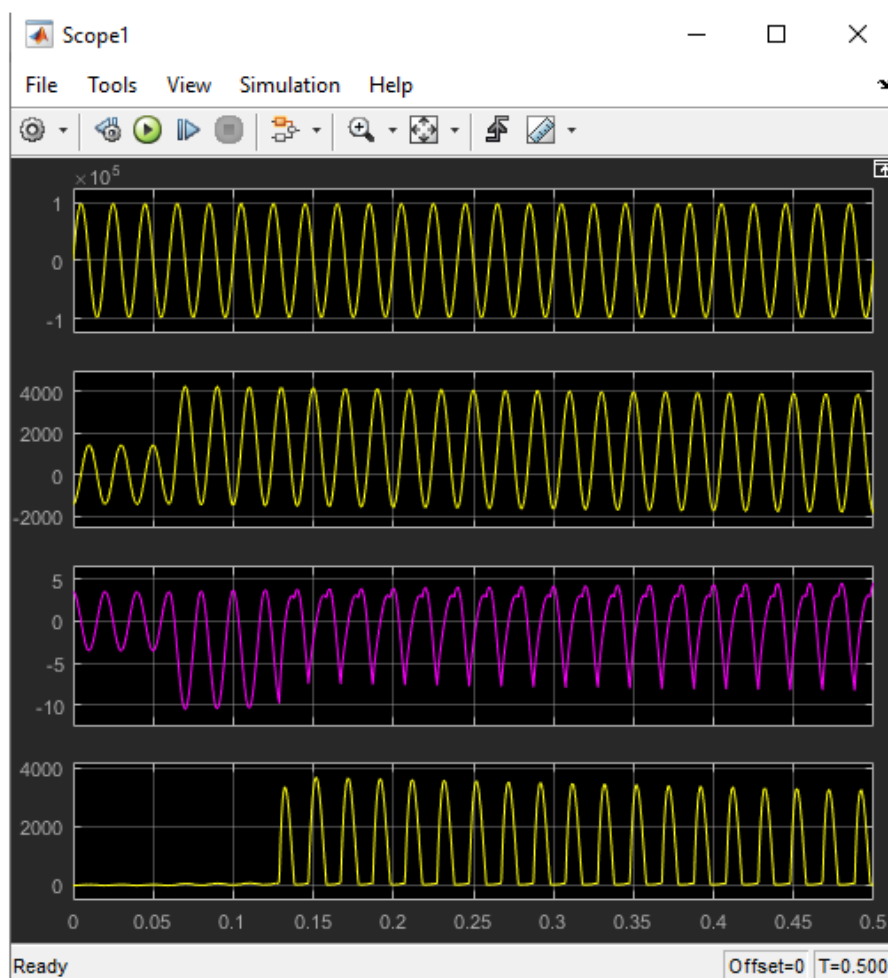


Рисунок 3.19 – Осциллограф (17)

Этот элемент позволяет нам получить осциллограммы трансформатора тока, такие как :

- 1) напряжение первичной обмотки (мгновенное значение)
- 2) ток первичной обмотки (мгновенное значение)
- 3) ток вторичной обмотки (мгновенное значение)
- 4) ток возбуждения (мгновенное значение)

Режим работы модели заключается в следующем. В обычном режиме работы элемент №3 не замкнут. Нагрузкой для трансформатора тока является сумма сопротивлений элемента №8 и элемента №14, меняя сопротивления этих элементов, можно получить различные значения тока короткого замыкания.

Когда элемент №3 замыкается, он зашунтирует собой элемент №14, что приведет к увеличению тока в цепи и в работе останется элемент №8. Этот эффект и смоделирует эффект короткого замыкания.

3.3 Исследование насыщения трансформатора тока TG145N–1200/5

Технические данные трансформатора тока TG145N–1200/5 представлены в таблице 3.1

Таблица 3.1 – Технические данные TG145N–1200/5

Наименование параметра	Норма
Номинальное напряжение, кВ	110
Наибольшее рабочее напряжение, кВ	126
Номинальная частота, Гц	50
Номинальный первичный ток, А($I_{ном}$)	1200
Наибольший рабочий первичный ток, А	$1,2 \times I_{ном}$
Номинальный вторичный ток, А	5
Номинальный класс точности/ Номинальная вторичная нагрузка с коэффициентом мощности $\cos\phi=0,8$, ВА	
Обмотки для измерения и учета: 1И1-1И2(1S1-1S2)	0,2S/20
Обмотки для измерения: 2И1-2И2(2S1-2S2)	0,2/20
Обмотки для защиты: 3И1-3И2(3S1-3S2)	10P/30

Продолжение таблицы 3.1

4И1-4И2(4S1-4S2)	10P/30
5И1-5И2(5S1-5S2)	10P/30
1-секундный ток термической стойкости, кА	31,5
3-секундный ток термической стойкости, кА	20
Ток электродинамической стойкости, кА ампл.	80
Номинальная предельная кратность обмоток для защиты	20
Номинальный коэффициент безопасности приборов обмоток для измерений и учета, не более	10
Давление газа перед отправкой, Бар(отн.)	0,5
Ток намагничивания вторичных обмоток для защиты, мА, при напряжении:	
3И1-3И2(3S1-3S2)	67
4И1-4И2(4S1-4S2)	67
5И1-5И2(5S1-5S2)	58
Сопротивление вторичных обмоток постоянному току(t=20°C), Ом:	
1И1-1И2(1S1-1S2)	0,244
2И1-2И2(2S1-2S2)	0,244
3И1-3И2(3S1-3S2)	0,372
4И1-4И2(4S1-4S2)	0,370
5И1-5И2(5S1-5S2)	0,370
Удельная длина пути утечки внешней изоляции, см/кВ	2,25

А) Исследование насыщения трансформатора тока TG145N–1200/5 при возникновении различных токов короткого замыкания.

Вариант №1: распределение нагрузки в соотношении 20% к 80%

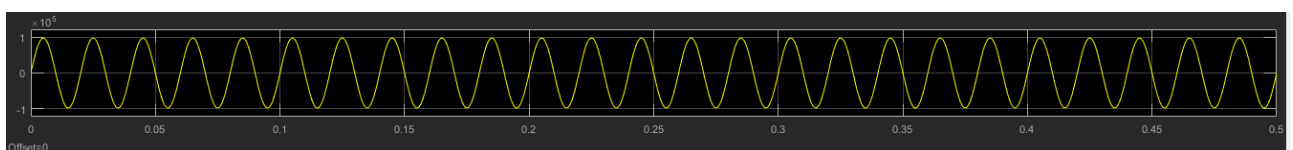


Рисунок 3.19 – Напряжение первичной обмотки

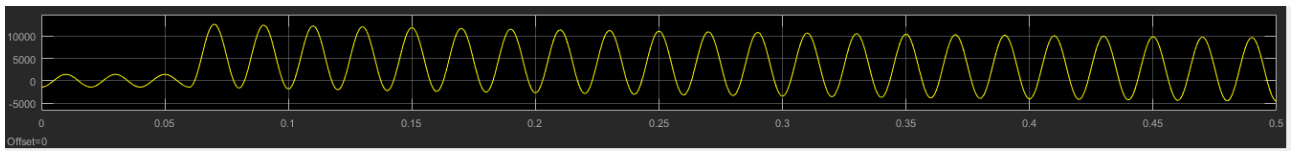


Рисунок 3.20 – Ток первичной обмотки

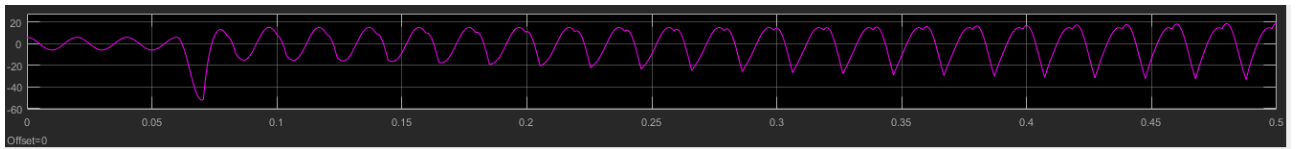


Рисунок 3.21 – Ток вторичной обмотки

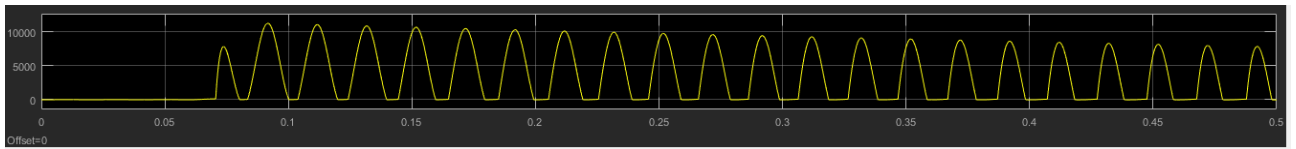


Рисунок 3.22 – Ток возбуждения

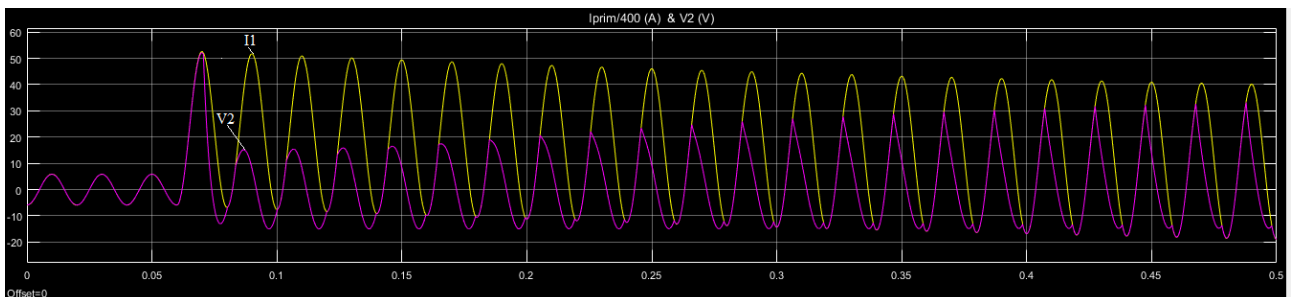


Рисунок 3.23 – Ток первичной обмотки и напряжение вторичной обмотки

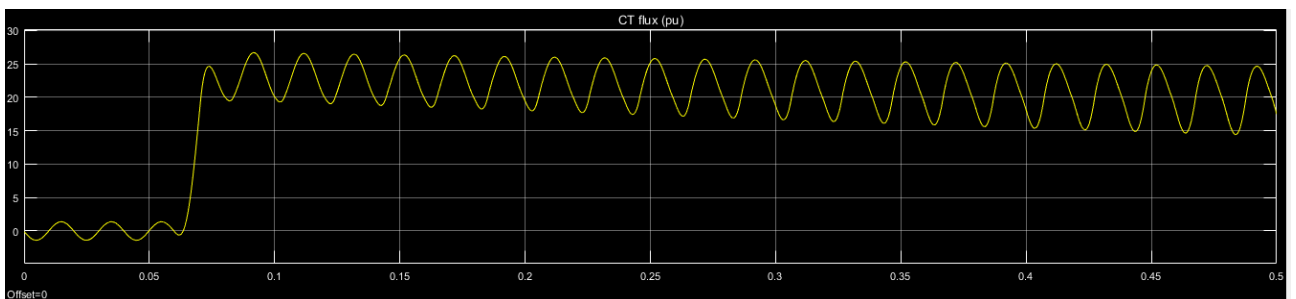


Рисунок 3.24 – Насыщение трансформатора тока

На рисунке 3.20 видно, что амплитуда тока короткого замыкания составляет 12,6кА.

Вариант №2: распределение нагрузки в соотношении 40% к 60%

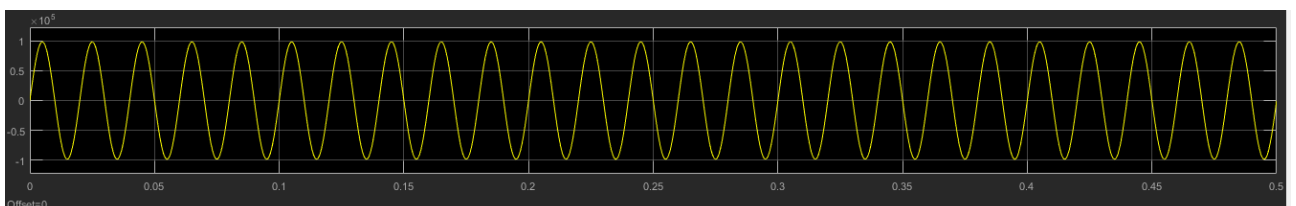


Рисунок 3.25 – Напряжение первичной обмотки

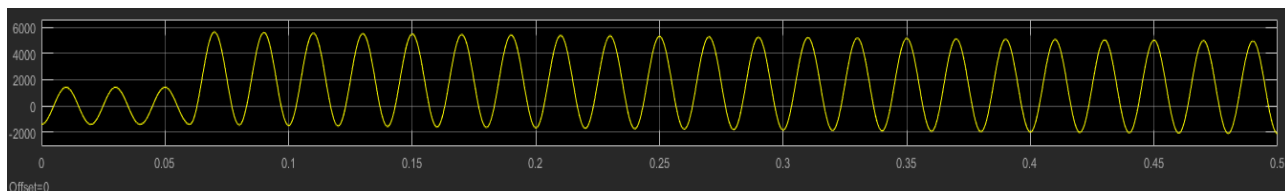


Рисунок 3.26 – Ток первичной обмотки

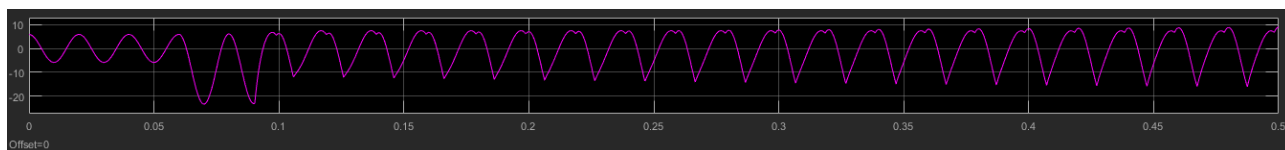


Рисунок 3.27 – Ток вторичной обмотки

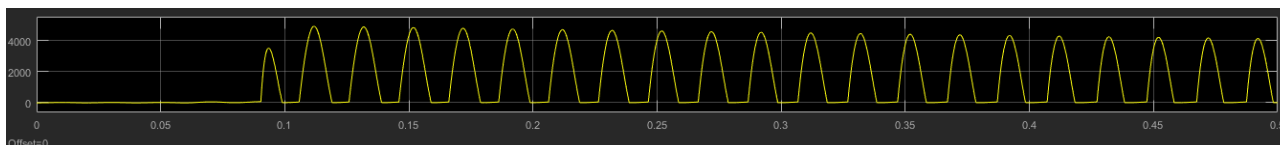


Рисунок 3.28 – Ток возбуждения

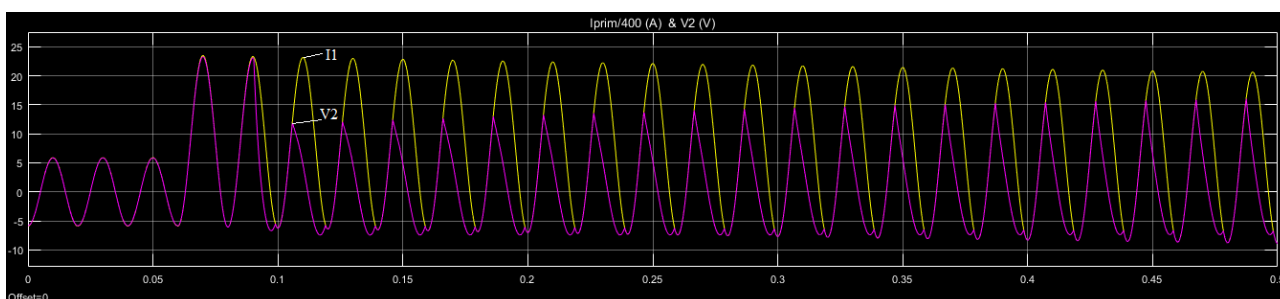


Рисунок 3.29 – Ток первичной обмотки и напряжение вторичной обмотки

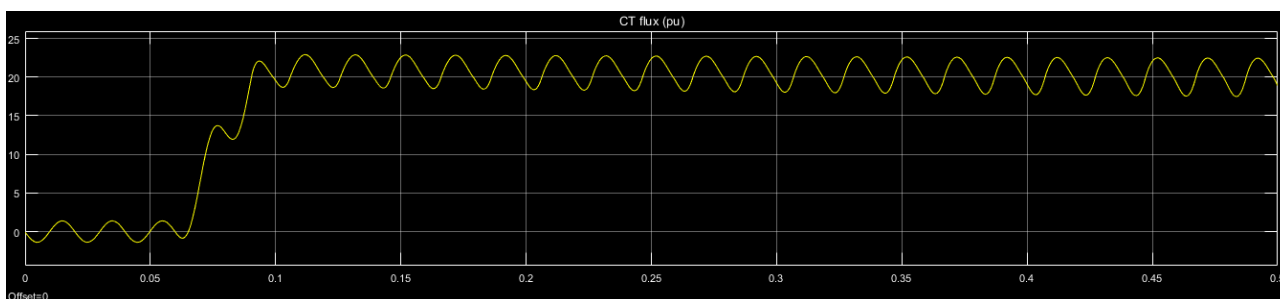


Рисунок 3.30 – Насыщение трансформатора тока

На рисунке 3.26 видно, что амплитуда тока короткого замыкания составляет 5,62кА.

Вариант №3: распределение нагрузки в соотношении 60% к 40%

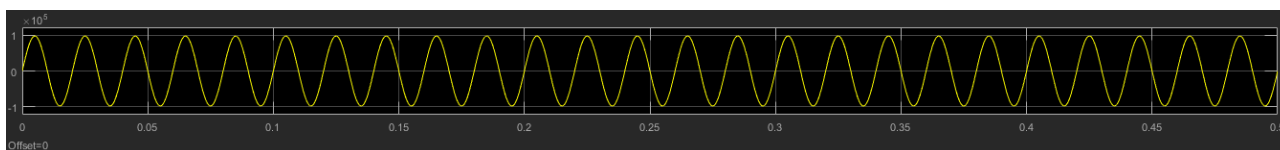


Рисунок 3.31 – Напряжение первичной обмотки

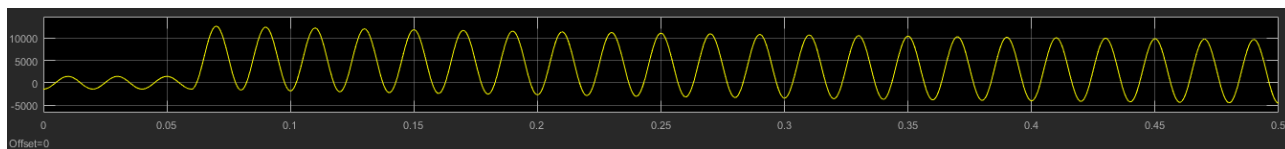


Рисунок 3.32 – Ток первичной обмотки

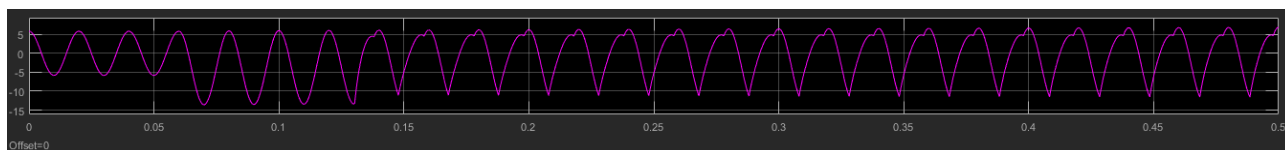


Рисунок 3.33 – Ток вторичной обмотки

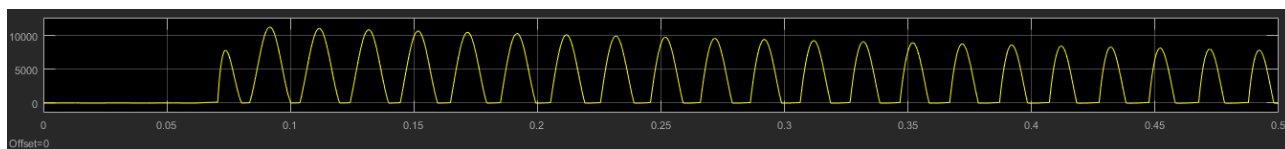


Рисунок 3.34 – Ток возбуждения

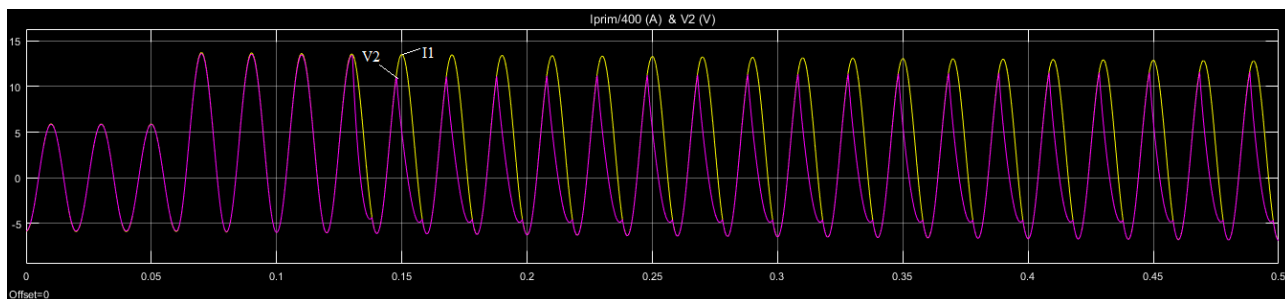


Рисунок 3.35 – Ток первичной обмотки и напряжение вторичной обмотки

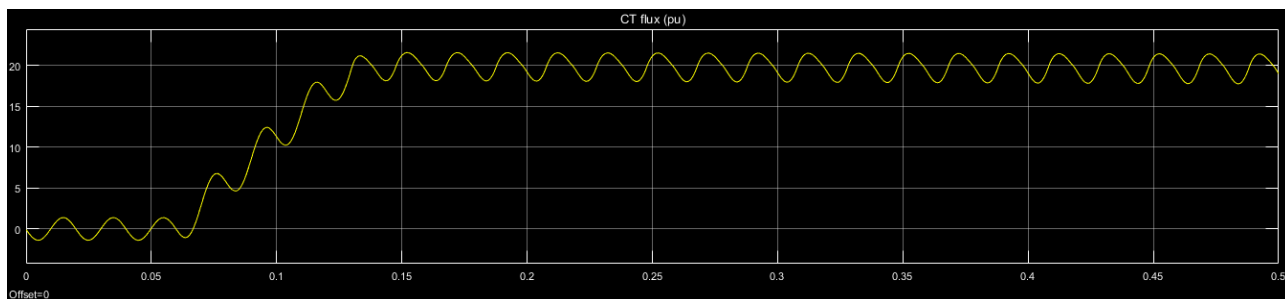


Рисунок 3.36 – Насыщение трансформатора тока

Из осциллограмм (рис.3.23 , рис.3.29, рис.3.35) видно , что с увеличением тока короткого замыкания растет погрешность трансформатора тока , рассчитаем эту погрешность по формуле (7)

$$\delta = \left| \frac{I_1 - V_2}{V_2} \right| \cdot 100\% \quad (7)$$

где, I_1 –ток первичной обмотки в относительных единицах;

V_2 –напряжение вторичной обмотки;

По формуле (7) рассчитаем погрешность трансформатора тока:

$$\delta = \left| \frac{51 - 15}{51} \right| \cdot 100\% = 70,5\%$$

Для остальных вариантов расчет произведен аналогично. Результаты исследования для трансформатора тока TG145N–1200/5 при возникновении различных токов короткого замыкания представлены в таблице 3.2

Таблица 3.2 – Результаты исследования трансформатора тока TG145N–1200/5 при возникновении различных токов короткого замыкания.

№	Амплитуда тока КЗ мгновенное значение, кА	Погрешность трансформатора тока, %
1	12,6	70,5
2	5,62	48,9
3	3,29	18,5

Б) Исследование насыщения трансформатора тока TG145N–1200/5 при изменении нагрузки подключенной к вторичной обмотке.

Вариант №1

Сопротивление подключенное к вторичной обмотке составляет 1,25 Ом

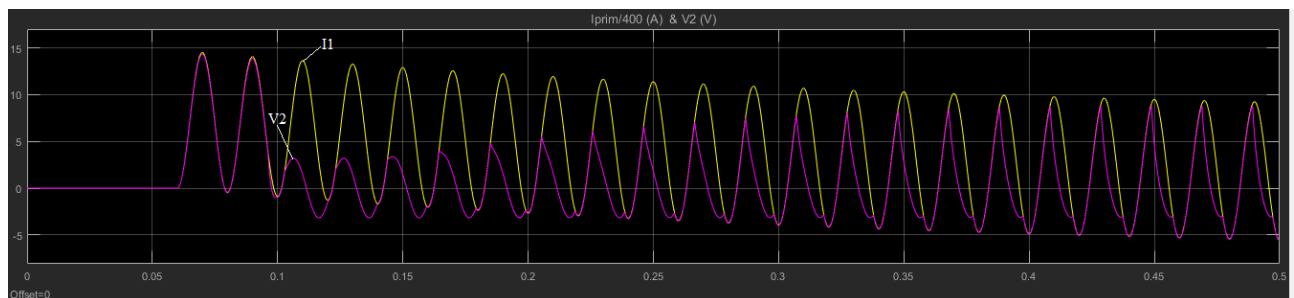


Рисунок 3.37 – Ток первичной обмотки и напряжение вторичной обмотки

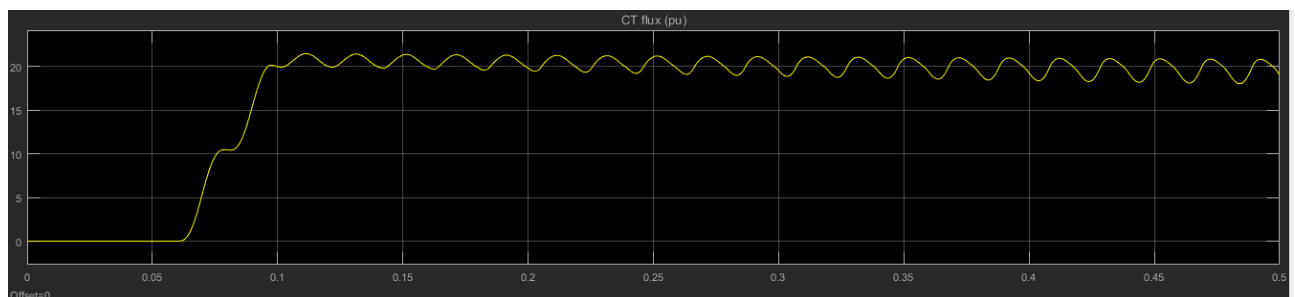


Рисунок 3.38 – Насыщение трансформатора тока

Вариант №2

Сопротивление подключенное к вторичной обмотке составляет 1,5 Ом

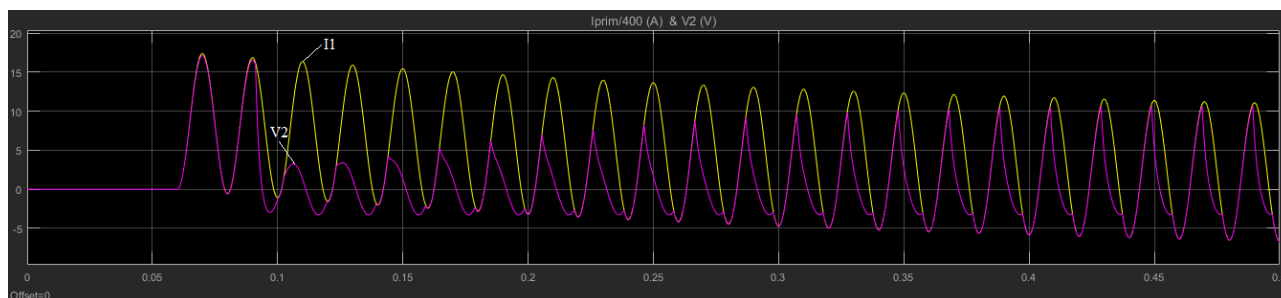


Рисунок 3.39 – Ток первичной обмотки и напряжение вторичной обмотки

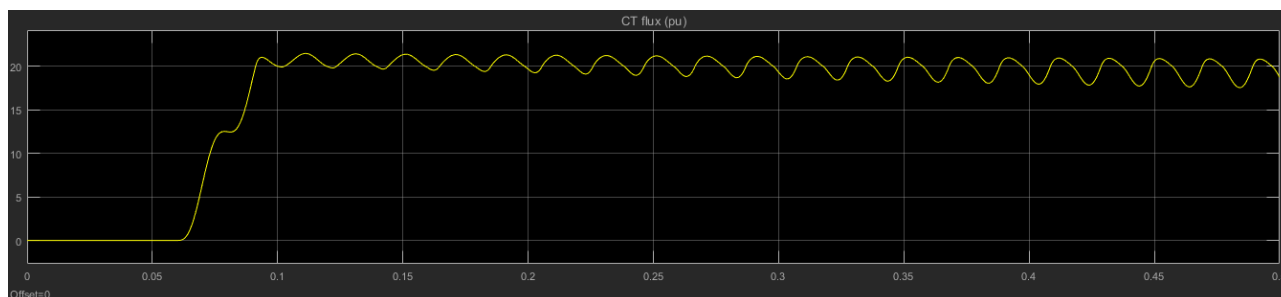


Рисунок 3.40 – Насыщение трансформатора тока

Вариант №3

Сопротивление подключенное к вторичной обмотке составляет 1,75 Ом

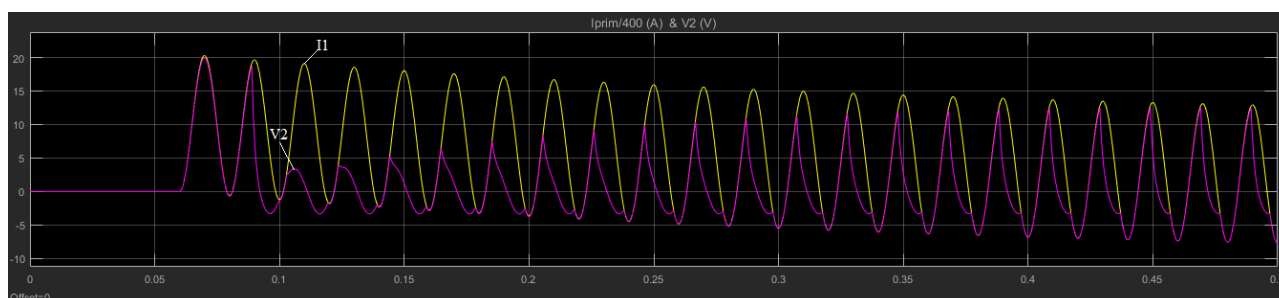


Рисунок 3.41 – Ток первичной обмотки и напряжение вторичной обмотки

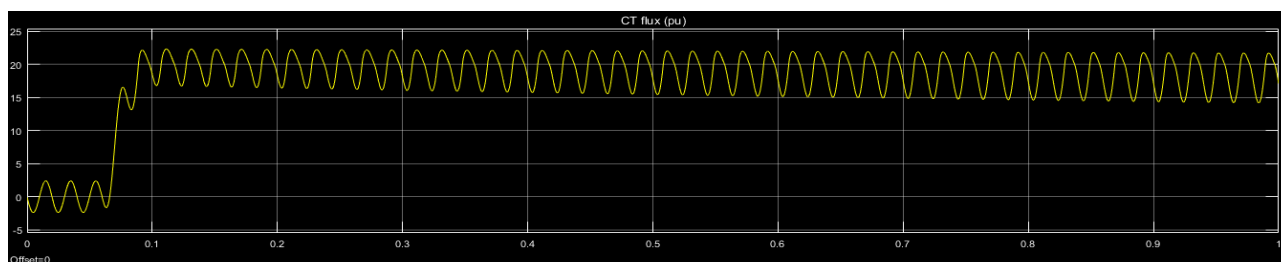


Рисунок 3.42 – Насыщение трансформатора тока

Из осциллограмм на рисунках 3.37, 3.39 и 3.41 видно, что с увеличением сопротивления погрешность измерений трансформатора тока увеличивается, рассчитаем эту погрешность по формуле (7)

$$\delta = \left| \frac{13,6 - 3,1}{13,6} \right| \cdot 100\% = 77\%$$

Для остальных вариантов расчет произведен аналогично. Результаты исследования для трансформатора тока TG145N–1200/5 при изменении сопротивления подключенного к вторичной обмотке в таблице 3.3.

Таблице 3.3 – Результаты исследования трансформатора тока TG145N–1200/5 при изменении сопротивления подключенного к вторичной обмотке.

№	Сопротивление , Ом	Погрешность трансформатора тока, %
1	1,25	77
2	1,50	80
3	1,75	82

Вывод: При увеличении тока короткого замыкания погрешность показаний трансформатора тока увеличивается из-за большого насыщения трансформатора тока, во втором опыте погрешность трансформатора тока увеличивается , так как условия работы трансформатора тока становятся хуже из-за большего сопротивления во вторичной цепи .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенной работы:

- 1) проанализированы требования, предъявляемые к аналоговым и цифровым измерительным трансформаторам тока;
- 2) изучено влияние насыщения измерительного трансформатора тока на работу релейной защиты;
- 3) рассмотрена математическая модель насыщающего трансформатора тока в программе MATLAB/Simulink;
- 4) собрана виртуальная модель для исследования величины и степени насыщения трансформаторов тока при коротких замыканиях;
- 5) на модели выполнено исследование величины насыщения при изменении величины тока КЗ и нагрузки вторичной цепи трансформатора тока TG145N–1200/5;
- 6) оценена погрешность, с которой работает трансформатор тока при различных токах короткого замыкания, а также при разной допустимой нагрузке на вторичную цепь.

Полученные результаты показывают, что при определенных условиях появления КЗ, насыщение трансформаторов тока может наступить уже спустя 2-3 периода и тем самым крайне негативно повлиять на показания измерительного трансформатора тока, давая погрешность, существенно превышающую допустимую для измерительных трансформаторов класса 5Р и 10Р. Учитывая, что время срабатывания защит в сетях 110-220 кВ превышает этот интервал времени, необходимо проверять трансформаторы тока на погрешность при насыщениях.

					13.04.02.2020.240 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		51

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. СТО ЮУрГУ 04–2008 Стандарт организации. Курсовое и дипломное проектирование. Общие требования к содержанию и оформлению / Т.И. Парубочая, Н.В. Сырейщикова, В.И. Гузеев, Л.В. Винокурова. – Челябинск: Издательство ЮУрГУ, 2008
2. УДК 621.316.925 Расчет параметров модели трехфазного трансформатора из библиотеки MATLAB-SIMULINK с учетом насыщения магнитопровода.
3. Рожкова Л.Д. Электрооборудование электрических станций и подстанций: Учебник для сред. проф. образования / Л.Д. Рожкова, Л.К. Карнеева, Т.В. Чиркова. – М:Издательский центр «Академия», 2004. – 448 с.
4. ГОСТ ИЕС 61869-1-2015 Трансформаторы измерительные.
5. ГОСТ Р МЭК 60044-8-2010 Электронные трансформаторы тока.
6. Садовников А.Н. Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем: Конспект лекций. Часть 1/ А.Н.Садовников, А.Н.Андреев.- Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2013. – 224с.
7. Sim Power Systems. User's Guide Version 3. The MathWorks, Inc, 2003.

					13.04.02.2020.240 ПЗ ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		52