

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра электрических станций
(полное название кафедры)

Утверждаю

Зав. кафедрой ЭлСт

А.Г. Русина

(подпись, инициалы, фамилия)

« » 2021 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ
по направлению высшего образования

13.04.02 – Электроэнергетика и электротехника
(код и наименование направления подготовки магистра)

Факультет энергетики
(факультет)

Титов Василий Андреевич

(фамилия, имя, отчество студента – автора работы)

Исследование возможности применения искусственного интеллекта
(полное название темы магистерской диссертации)
для повышения устойчивости функционирования релейной защиты

Руководитель
от НГТУ

Литвинов И.И.

(фамилия, имя, отчество)

к.т.н.

(ученая степень, ученое звание)

(подпись, дата)

Автор выпускной
квалификационной работы

Титов В.А.

(фамилия, имя, отчество)

ФЭН, ЭНМ1-92

(факультет, группа)

(подпись, дата)

Консультанты по разделам:

Экономическая часть

(краткое наименование раздела)

Нормоконтроль

(краткое наименование раздела)

А.В. Кравченко

(подпись, дата, инициалы, фамилия)

А.А. Осинцев

(подпись, дата, инициалы, фамилия)

Новосибирск 2021

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра электрических станций
(полное название кафедры)

УТВЕРЖДАЮ

Зав. кафедрой Русина А.Г.
(фамилия, имя, отчество)

01.10.19
(подпись, дата)

**ЗАДАНИЕ
НА МАГИСТЕРСКУЮ ДИССЕРТАЦИЮ**

студенту Титову Василию Андреевичу
(фамилия, имя, отчество)

факультета Энергетики
(полное название факультета)

Направление подготовки 13.04.02 – Электроэнергетика и электротехника
(код и наименование направления подготовки магистра)

Магистерская программа Автоматика энергосистем
(наименование магистерской программы)

Тема Исследование возможности применения искусственного интеллекта
для повышения устойчивости функционирования релейной защиты
(полное название темы)

Цели работы Определение возможности повышения устойчивости
функционирования дифференциальной защиты с помощью применения нейронных
сетей, используемых для восстановления искажённого вторичного тока.

Задание согласовано и принято к исполнению.

**Руководитель
от НГТУ**

Литвинов И.И.

(фамилия, имя, отчество)

к.т.н., доцент

(ученая степень, ученое звание)

30.09.19

(подпись, дата)

Студент

Титов В.А.

(фамилия, имя, отчество)

ФЭН, ЭНМ1-92

(факультет, группа)

30.09.19

(подпись, дата)

Тема утверждена приказом по НГТУ № 4479/2 от « 01 » октября 2019 г.
изменена приказом по НГТУ № _____ от « » _____ 201 г.

Диссертация сдана в ГЭК № 108.1, тема сверена с данными приказа

(подпись секретаря государственной экзаменационной комиссии по защите ВКР, дата)

Осинцев Анатолий Анатольевич

(фамилия, имя, отчество секретаря государственной
экзаменационной комиссии по защите ВКР)

Консультанты по разделам:

Экономическая часть

(краткое наименование раздела)

30.09.19, А.В. Кравченко

(подпись, дата, инициалы, фамилия)

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1 ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ТОКА	8
1.1 Время до насыщения	8
1.2 Оптические трансформаторы тока	10
1.3 Катушки Роговского	11
1.4 Трансформаторы тока с воздушным зазором	12
2 АЛГОРИТМЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЗАЩИТ ПРИ НАСЫЩЕНИИ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА	17
2.1 Внешнее КЗ	18
2.2 Внутреннее КЗ и бросок тока намагничивания	21
2.3 Восстановление вторичного тока	24
2.4 Нейронные сети в релейной защите	26
3 РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОБУЧЕНИЯ НЕЙРОННОЙ СЕТИ	27
3.1 Модель первичной сети	27
3.2 Модель трансформатора тока	32
4 МОДЕЛЬ НЕЙРОННОЙ СЕТИ	39
4.1 Общие сведения	39
4.2 Моделирование внешних КЗ	39
4.3 Подготовка данных для обучения ИНС	40
4.4 Разработка ИНС	42
4.5 Тестирование ИНС	60
5 ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ	65
5.1 Определение ущерба от ненадёжности	65
5.2 Определение рыночной стоимости разработанных моделей	66
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	71
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	74

ВВЕДЕНИЕ

Описание проблемы. В Российской Федерации устройства релейной защиты (РЗ) чаще всего подключаются ко вторичным обмоткам измерительных трансформаторов тока (ТТ) с классом точности 10Р. Особенностью таких ТТ является возможность входить в режим насыщения (рисунок В.1) во время переходных процессов. Характер насыщения зависит от:

- параметров ТТ (характеристика намагничивания, сопротивление вторичной обмотки, число витков первичной и вторичной обмоток, габариты сердечника);
- параметров нагрузки;
- параметров режима (кратность тока, постоянная времени затухания апериодической составляющей);
- начальных условий переходного процесса (значение тока и магнитной индукции в сердечнике в предшествующем режиме).

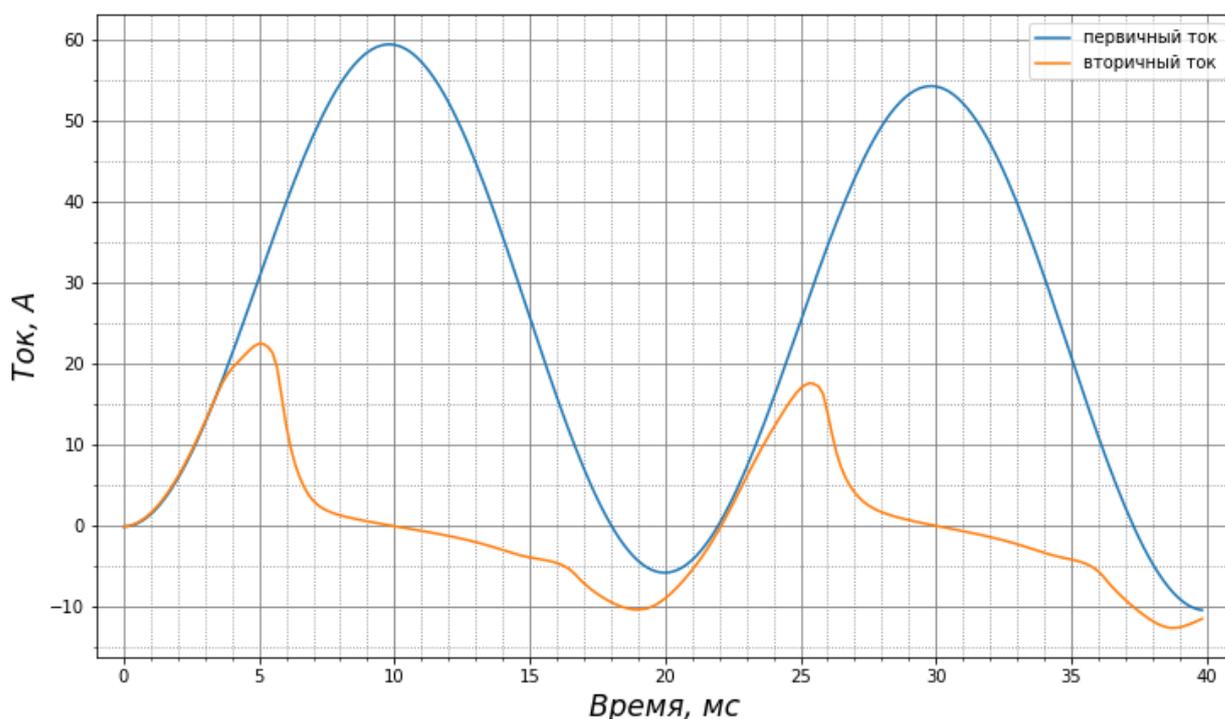


Рисунок В.1 – Насыщение трансформатора тока

При насыщении ТТ, вследствие искажения формы вторичного тока, возможны отказы в функционировании РЗ. Под «отказом в функционировании» понимаются излишние и ложные срабатывания, а также отказы в срабатывании.

Актуальность проблемы. Излишние срабатывания РЗ приводят к неселективным отключениям, которые могут нарушить электроснабжение потребителей. Более того, при

излишнем отключении присоединения комплексом противоаварийной автоматики (ПА) могут формироваться управляющие воздействия, также действующие на отключение других элементов, тем самым увеличивая ущерб от неселективной работы защиты. Указанное справедливо и для ложных срабатываний.

Отказы в срабатывании РЗ связаны с недопустимой задержкой в работе защиты. Короткие замыкания (КЗ) должны устраняться максимально быстро, поскольку они наносят большой урон электрооборудованию, нарушают электроснабжение потребителей, в месте повреждения создают опасность для жизни человека. Но самое главное, при длительном КЗ может произойти нарушение динамической устойчивости энергосистемы (ЭЭС).

Начиная с 2014 года [1], проблема насыщения ТТ для РЗ в России стоит особенно остро. Связано это с чередой крупных аварий, среди которых отметим следующие:

- авария на Ростовской АЭС с отключением потребителей суммарной мощностью 1761 МВт, 04.11.2014 г.;
- авария на ПС 500 кВ Тамань с отключением потребителей суммарной мощностью 876 МВт, 13.06.2018 г.

В указанных примерах из-за насыщения ТТ излишне сработали быстродействующие защиты, а именно дифференциальные защиты и быстродействующие ступени комплектов ступенчатых защит (КСЗ) линий.

В соответствии с [2], по заказу АО «СО ЕЭС» ОАО «ВНИИР» выполнен НИОКР, который показал, что типовые алгоритмы РЗ, реализованные в серийно выпускаемых терминалах, не всегда обеспечивают корректное функционирование устройств РЗ при насыщении ТТ.

Актуальность проблематике придаёт большое количество выпускаемых стандартов и документов, регламентирующих поведение ТТ [3, 4, 5] и РЗ [6] в переходных режимах. В соответствии с [7], НТС ЕЭС рекомендует АО «СО ЕЭС» разработать «Методику испытаний устройств РЗ в условиях насыщения ТТ» и выпустить соответствующий стандарт.

Проблеме насыщения ТТ посвящено множество публикаций, работ, статей, диссертаций и т.д. В последующих двух главах производится анализ существующих решений проблемы, описанной выше.

Цель и задачи работы. В соответствии с темой диссертации, основной целью работы является исследование возможности применения искусственного интеллекта для повышения устойчивости функционирования РЗ в переходных режимах.

В работе рассматриваются дифференциальные защиты, которые являются основными защитами станционного и подстанционного оборудования. Именно на

электростанциях и близлежащих подстанциях проблема насыщения ТТ стоит особенно остро из-за больших кратностей токов КЗ и постоянных времени.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

- разработка модели первичной сети;
- разработка модели трансформаторов тока;
- разработка модели искусственной нейронной сети.

1 ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ТОКА

1.1 Время до насыщения

Для обеспечения правильной работы РЗ в переходных режимах сначала был введён предварительный национальный стандарт ПНСТ-283 2018, а после ГОСТ Р 58669-2019. Данные документы регламентируют методы расчёта времени до насыщения – интервала времени от начала КЗ до момента насыщения ТТ.

Модернизация устройств РЗ без замены ТТ

Если производится модернизация устройств РЗ без замены ТТ, то на основании проведённых расчётов времени до насыщения необходимо предъявлять требования к защитам в части времени достоверного измерения тока [2]. Время достоверного измерения – время точной трансформации ТТ, необходимое для правильной работы устройства РЗ. Это время зависит от производителя микропроцессорного (МП) терминала и типа защиты:

- для дифференциальных защит шин/ошиновок – $3 \div 5$ м/с;
- для дифференциальных защит трансформаторов – $10 \div 25$ м/с.

Однако, как показывает практика, в подавляющем большинстве случаев при расчёте по [5] для ТТ с классом точности 10Р время до насыщения находится в пределах $2 \div 2,5$ м/с. Производитель МП РЗ технически не может уменьшить время достоверного измерения тока. Увеличение сечения контрольных кабелей для уменьшения нагрузки, как правило, не даёт положительного результата [8]. Увеличение коэффициента трансформации может улучшить ситуацию. Однако, в этом случае часто возникают проблемы в части выставления уставок РЗ (попадания уставок срабатывания защит в рабочий диапазон терминала), а также может появиться необходимость корректировки решений смежных систем (АСУ ТП, ПА, АИИС КУЭ), что крайне нежелательно в реальном проекте.

В итоге, чтобы обеспечить правильную работу РЗ в переходном режиме можно:

- а) провести более точный анализ работы защиты в переходном режиме;
- б) осуществить замену ТТ;
- в) использовать специальные алгоритмы защит.

Малые времена до насыщения не гарантируют отказ в функционировании защиты.

На рисунке 1.1 приведено два режима:

- 1) режим с наибольшей апериодической составляющей;
- 2) режим с наименьшим временем до насыщения.

Во втором случае время до насыщения меньше, чем в первом, но и погрешность ТТ тоже намного меньше. А что важнее: время до насыщения или погрешность? Это как раз зависит от типа подключаемой защиты. Методики [4, 5] не учитывают ряд важных

факторов: тип подключаемой защиты; уставки защиты; реализованные в терминале алгоритмы; схему соединения вторичных обмоток ТТ (рассматривается одиночный ТТ); устойчивость ЭЭС.

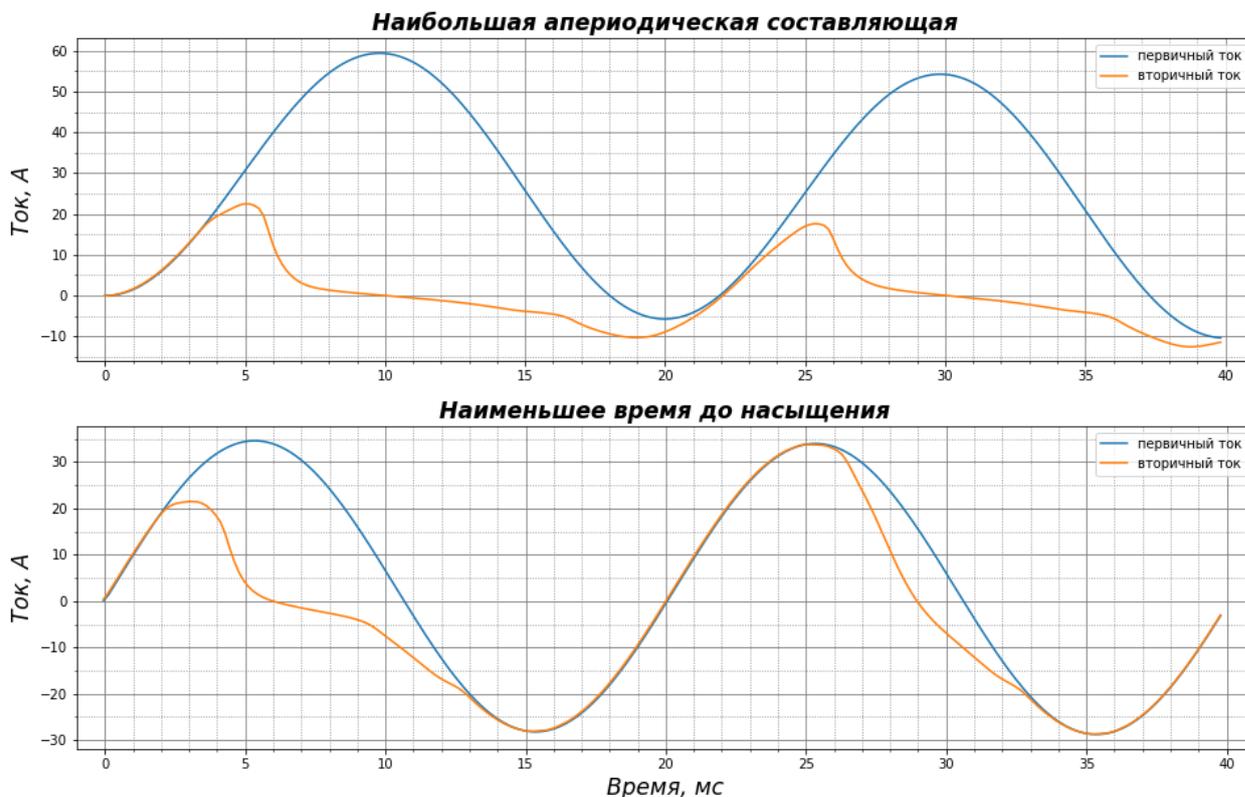


Рисунок 1.1 – Осциллограммы первичных и вторичных токов

В методике [6] учитывается запас устойчивости ЭЭС, тип защиты, уставки, реализованные алгоритмы. Благодаря этому, оценка работы защиты становится более точной. При этом существенно увеличивается объём расчётов. А если учесть, что на этапе проектной документации производитель РЗ формально неизвестен, то такие расчёты надо проводить для разных изготовителей терминалов.

Тем не менее, лучше провести больший объём расчётов, чем осуществлять замену ТТ. Замена ТТ – это отдельный проект, в котором необходимо разработать проектную и рабочую документации, причём не только в части релейной защиты, но и смежных систем. Замена ТТ требует больших финансовых вложений. Также это может занять много времени (ТТ на крупной ПС очень много), особенно, если ТТ встроены в ввод силового оборудования. При этом само силовое оборудование выводится в ремонт, что негативно влияет на режим работы ЭЭС. Также нельзя забывать об эксплуатации, которой придётся осуществлять все работы по замене ТТ.

Если более точная оценка работы РЗ в переходном режиме даёт отрицательный результат, а ТТ необходимо оставить существующий, то ситуацию могут исправить алгоритмы, реализованные в МП терминалах РЗ. Об этих алгоритмах будет сказано в следующей главе.

Строительство новых объектов электроэнергетики

При строительстве новых объектов электроэнергетики выбранные характеристики ТТ должны обеспечивать правильную работу РЗ в переходных режимах [2]. Здесь не нужно оценивать поведение конкретной защиты в конкретных режимах или учитывать специальные алгоритмы защит. Гораздо легче сразу выбрать «правильный» ТТ. Стоит отметить, что в большинстве случаев осуществлять установку ТТ с классом точности 10Р нецелесообразно, т.к. потребуются большие номинальные кратности и мощности. Завод-изготовитель скорее всего либо не изготовит такое оборудование, либо изготовит, но его габариты будут неприемлемы, а стоимость высока.

О типах измерительных трансформаторов тока, обеспечивающих правильную работу РЗ в переходных режимах, рассказывается далее.

1.2 Оптические трансформаторы тока

Альтернативой обычным электромагнитным трансформаторам могут стать оптические трансформаторы тока (рисунок 1.2), работа которых основана на эффекте Фарадея. Данный эффект заключается в том, что если поместить линейно поляризованный луч света в магнитное поле, то будет наблюдаться вращение плоскости поляризации света (рисунок 1.3). С помощью детектора поляризации возможно измерить угол вращения плоскости поляризации и на основании этого определить силу тока [9]. Иными словами, трансформация тока осуществляется оптическим, а не электромагнитным способом. Поэтому явление насыщения при такой трансформации отсутствует.

Главным недостатком оптических ТТ является их стоимость. Из-за этого иногда даже на вновь возводимых цифровых подстанциях (например, ПС 220 кВ Зубовка, проектируемая Филиалом «АО НТЦ ФСК ЕЭС» – СибНИИЭ) применяют обычные электромагнитные ТТ. В Российской Федерации данный вид преобразователей тока получит широкое распространение ещё очень нескоро.

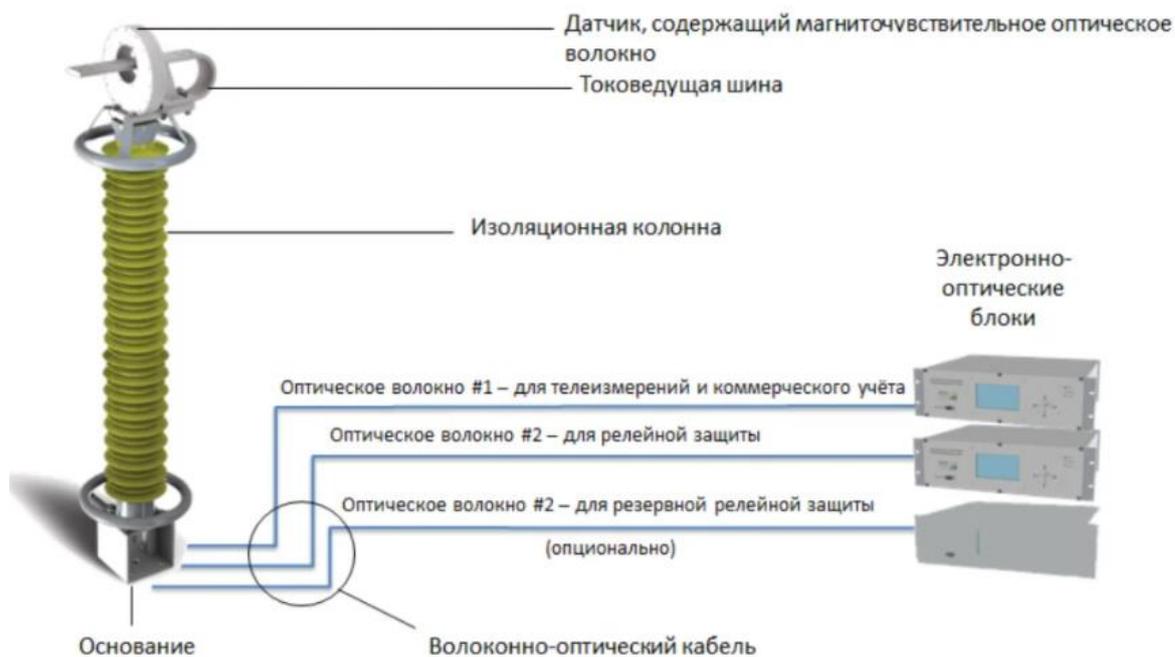


Рисунок 1.2 – Структурная схема оптического трансформатора

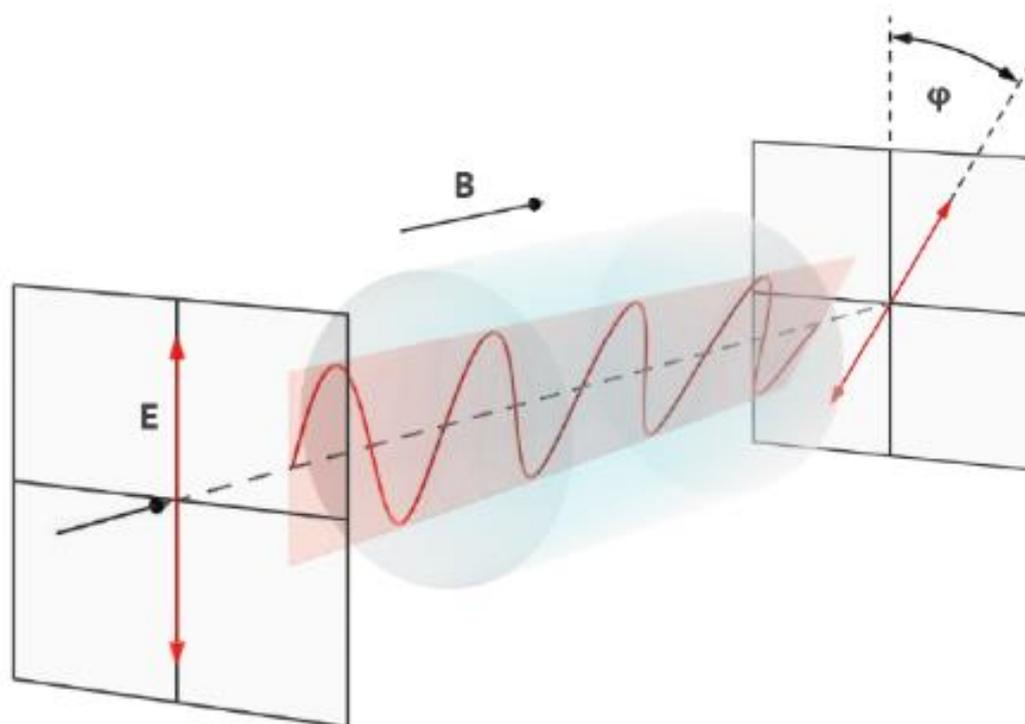


Рисунок 1.3 – Иллюстрация эффекта Фарадея

1.3 Катушки Роговского

Принцип действия катушек Роговского аналогичен принципу действия электромагнитного ТТ. Разница в том, что обмотки первых наматываются на сердечник, сделанный из немагнитного материала. Поэтому здесь также отсутствует эффект

насыщения. Вдобавок, выходным сигналом является напряжение, которое пропорционально производной первичного тока [10].

Причина, по которой данные преобразователи тока повсеместно не используются – их отсутствие в нормативно технической документации (НТД). Ни в ГОСТ 7746-2015 [11], ни в ГОСТ Р МЭК 61869-2-2015 [12] про катушки Роговского ничего не сказано. Поэтому при проектировании становится проблематичным предъявить технические требования к этим устройствам и обосновать надёжность их применения заказчику.

1.4 Трансформаторы тока с воздушным зазором

Большое влияние на характер переходных процессов в ТТ оказывает остаточная намагниченность. В практических расчётах именно режим с остаточной намагниченностью 86 % [4, 5] является определяющим при предъявлении технических требований к трансформаторам для РЗА.

На рисунке 1.4 представлена классическая ситуация, с которой встречается проектировщик при расчёте времени до насыщения, определяемого следующим образом:

- 1) Для отрезков «без остаточной индукции» и «с остаточной индукцией» находятся точки пересечения с кривой $K_{np}(t)$;
- 2) После этого из точек пересечения опускаются перпендикуляры к оси абсцисс и определяются времена до насыщения при наличии и отсутствии остаточной намагниченности.

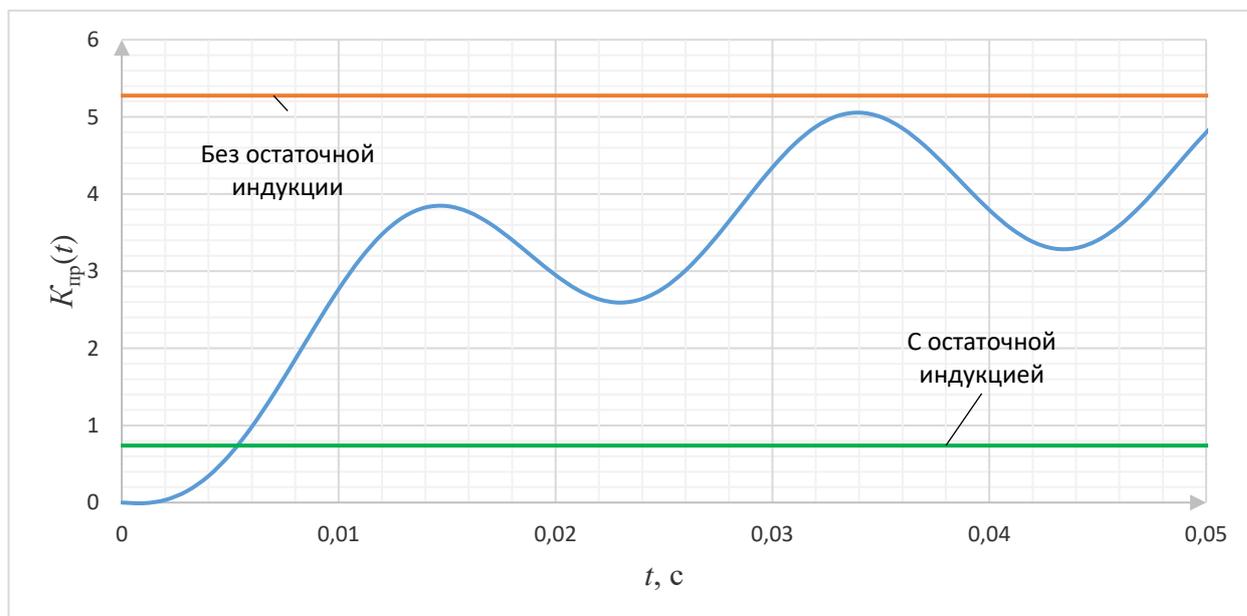


Рисунок 1.4 – Расчёт ТТ по ПНСТ 283-2018

Из примера, приведённого на рисунке 1.4, видно, что при отсутствии остаточной намагниченности ТТ не насыщается (оранжевая прямая не пересекается с синей кривой) в течение 50 мс. Этого более чем достаточно для любого типа защит. Однако, при наличии остаточной намагниченности время до насыщения составляет около 5 мс, что намного меньше допустимого значения для дифференциальных защит трансформаторов (25 мс).

Остаточная намагниченность в сердечнике может возникать при измерении сопротивления вторичной обмотки постоянному току во время проверки ТТ или при протекании тока внешнего КЗ [13]. Важно отметить, что остаточная намагниченность существует бесконечно долго, и она может быть снята лишь специальным размагничиванием [14]. На практике осуществить такое размагничивание – достаточно трудоёмкая задача. Не стоит также недооценивать тот факт, что на характер переходного процесса оказывает влияние не только величина индукции в сердечнике, но и её знак. При этом индукция в сердечниках разных фаз одного ТТ может быть неодинаковой (особенно это важно при несимметричных КЗ). Разная индукция может быть и в сердечниках, к которым подключаются плечи дифференциальных защит трансформаторов и шин одной фазы [15].

Для традиционных ТТ класса точности 10P коэффициент остаточной намагниченности (отношение остаточной индукции к индукции насыщения) не нормируется и в самых неблагоприятных случаях может достигать 86%. Поэтому, учитывая вышесказанное, велика вероятность, что сердечник ТТ достаточно сильно намагничен.

В этой связи, ограничение уровня остаточной индукции ТТ может решить проблему обеспечения правильной работы РЗА. Это возможно с использованием трансформаторов тока классов точности PR, TPY, TPZ. Конструктивно это всё те же электромагнитные ТТ, однако в их сердечнике имеется воздушный (или немагнитный) зазор.

Первые сведения о применении ТТ с немагнитным зазором в США для дифференциальной защиты шин относятся к 1941 году. А ещё в 50-х годах прошлого столетия И. Д. Кулявиным было доказано, что схемы дифференциальных защит, выполненные на базе таких ТТ, имеют намного меньший переходной ток небаланса, чем дифференциальные защиты на ТТ с замкнутым магнитопроводом.

Класс точности PR нормирует коэффициент остаточной намагниченности не более 10 %. Достигается это благодаря небольшому воздушному зазору в сердечнике. Поэтому габариты ТТ, а, следовательно, и его стоимость не сильно отличаются от аналогов с замкнутым магнитопроводом [13, 16]. Более того, такой ТТ не требует специального размагничивания, после прекращения протекания тока КЗ индукция в сердечнике возвращается в доаварийное состояние. Именно поэтому ТТ класса точности 10PR

являются основными кандидатами на замену обычных ТТ при строительстве новых объектов энергетики [13].

Отметим, что использовать методики [4, 5] для трансформаторов с воздушным зазором не совсем корректно, так как в них все выкладки и формулы сделаны в предположении, что характеристика намагничивания ТТ может быть аппроксимирована до так называемой прямоугольной характеристики намагничивания (ПХН).

Помимо PR, существуют классы точности TPY и TPZ. Трансформаторы класса точности TPY нормируют не только остаточную намагниченность, но и полную погрешность ТТ в переходном режиме. Эта погрешность не должна превышать 10 %. Однако, для соблюдения этого требования сильно увеличиваются габариты сердечника и, как следствие, стоимость ТТ [13].

Особенностью ТТ класса точности TPZ, которые активно используются в Германии на объектах 500 кВ и выше, является наличие большого магнитного зазора. Благодаря этому, характеристика намагничивания таких ТТ (рисунок 1.5) становится более линейной, нежели чем у ТТ классов точности PR или TPY, поэтому остаточной намагниченностью можно пренебречь.

Сердечник TPZ размагничивается менее, чем за 200 мс, так как постоянная времени такого ТТ составляет приблизительно 60 мс. Указанное означает, что за время бестоковых пауз индукция гарантировано снизится до нуля. Это свойство особенно полезно в циклах неуспешных АПВ.

Отметим, что трансформаторы класса точности TPZ являются фильтром-заградителем апериодической составляющей тока КЗ, трансформация которой с заданной точностью невозможна [14].

Как следует из [17, 18], существуют некоторые затруднения в использовании ТТ с немагнитным зазором совместно с обычными ТТ. Это связано с тем, что наибольший ток небаланса для дифференциальных защит в переходном режиме появляется в тех условиях, когда один ТТ насытился, а второй (или несколько других) работает точно. Также имеет место тот факт, что класс 10P трансформирует апериодическую составляющую тока КЗ, а класс TPZ – нет. Таким образом в дифференциальной цепи может появиться ток небаланса равный разности апериодических составляющих токов плеч. Однако, указанное не является проблемой для МП устройств РЗА, где применяются алгоритмы фильтрации входных токов.

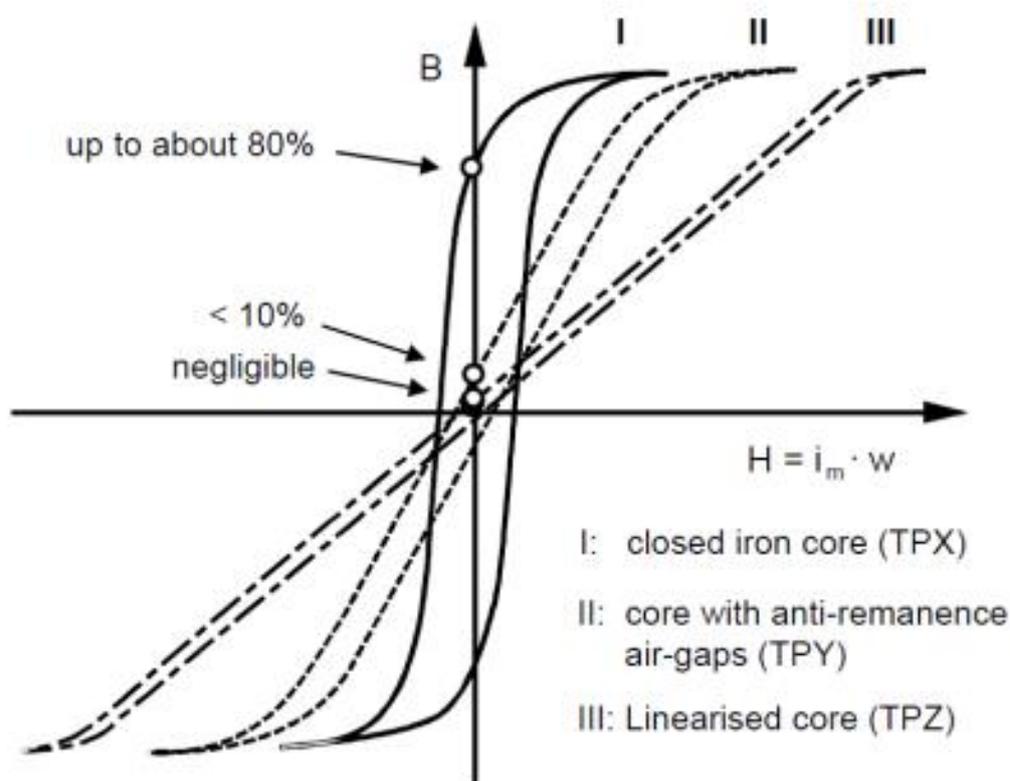


Рисунок 1.5 – Петли гистерезиса трансформаторов тока классов точности TPX, TPY, TPZ

На практике более неприятной проблемой является отсутствие ТТ классов точности PR, TPY, TPZ в ГОСТ 7746-2015 и ряде стандартов российских компаний (например, в стандарте ОАО «ФСК ЕЭС» [19]), что крайне важно при проектировании. Имеют место случаи, когда заказчик не согласовывал проект, в результате чего на первичной схеме вместо надписи «10PR» была надпись «10P с коэффициентом остаточной намагниченности не более 0,1».

Особая ситуация со стандартом ГОСТ Р МЭК 61869-2-2015. С одной стороны, данный НТД – национальный стандарт Российской Федерации и в нём присутствуют ТТ PR, TPY, TPZ. А с другой:

- перевод ГОСТ Р МЭК 61869-2-2015 выполнен с многочисленными ошибками;
- требования стандарта распространяются только для экспортных товаров;
- производитель должен выполнить требования не только самого стандарта, но и всех ссылочных стандартов, что является проблематично, поскольку система стандартизации МЭК сильно отличается от российской [13].

Тем не менее очевидно, российская электроэнергетика движется именно в сторону описанных в данном разделе преобразователей тока. Это подтверждается следующими фактами:

1) На 4 квартал 2020 года было запланировано заседание «секции управления режимами энергосистем, РЗА» НТС ЕЭС, посвящённое требованиям к трансформаторам тока классов точности PR, TPY, TPZ для обеспечения правильной работы устройств РЗА.

2) Не смотря на проблему со стандартизацией, во многих проектах уже предусматривается установка ТТ класса точности 10PR (ПС 110 кВ РП-9, ПС 220 кВ Могоча, ПС 330 кВ Центральная, ПС 500 кВ Нижнеангарская).

3) Использование ТТ с малой остаточной намагниченностью рекомендуется ведущими производителями устройств РЗА (ООО «Сименс», ООО «Релематика») и АО «СО ЕЭС».

2 АЛГОРИТМЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЗАЩИТ ПРИ НАСЫЩЕНИИ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА

В предыдущей главе было доказано, что с технической точки зрения при строительстве новых электроэнергетических объектов проблема устойчивого функционирования устройств РЗА в условиях насыщения ТТ решается с помощью применения иных типов преобразователей тока – оптических ТТ, катушек Роговского, ТТ с воздушным зазором.

Иначе дело обстоит с существующими станциями и подстанциями. Эти объекты спроектированы без предъявления требований к ТТ в части времени до насыщения. Поэтому и установлены были обычные трансформаторы класса точности 10Р, не гарантирующих работу РЗА в переходных режимах должным образом. При этом замена существующих ТТ на всех объектах, где возможны отказы в функционировании РЗА, представляет собой чрезвычайно сложную технико-экономическую задачу.

По данным [21] ПАО «Россети» принадлежит 14262 подстанций 35-220 кВ, ПАО «ФСК ЕЭС» – 870 объектов 330 кВ и выше. Заменить все ТТ (как правило имеющих по несколько кернов) – задача на много лет. Необходимо пройти все этапы проектирования: ППО, ОТР, ПД, РД, корректировки ПД и РД. Каждый из этапов должен быть согласован с заказчиком и АО «СО ЕЭС», необходимо пройти экспертизу. Только после этого проводится сама модернизация объекта, что тоже занимает время. Всё это может растянуться на несколько лет. И, естественно, каждый этот шаг необходимо повторять для всех станций или подстанций. Добавляем сюда тот факт, что преобразователи тока, описанные во второй главе, имеют определённые проблемы с НТД, а стандартизация – процесс тоже длительный.

Как уже было сказано, более «справедливые» технические требования к ТТ возможно предъявить с использованием методик на подобии [6], где учитывается тип защиты, её уставки, режим работы, алгоритмы, устойчивость ЭЭС. Однако, тут есть нюансы:

- а) В настоящий момент описываемые методики не являются национальными стандартами, а потому их юридическая сила под вопросом;
- б) Некоторые аспекты этих методик вызывают сомнения. Например, в методике [6] в формуле (2.1) $t_{\text{откл.выкл.}}$ – полное время отключения выключателя. В таблице 2.8 $t_{\text{откл.выкл.}} = 35$ мс. К примеру, для элегазового выключателя типа ВГТ-220 производства ЗАО «ЗЭТО» составляет 60 мс [20]. Сотрудники АО «СО ЕЭС» также заявляют о наличии ошибок;

- с) Имеется конфликт интересов. Производителю выгодно, чтобы по его методике ТТ всегда был пригоден к использованию. К примеру, уменьшение времени полного отключения выключателя ведёт к увеличению допустимой задержки в срабатывании защиты (таблица 2.8 в [6]);
- d) Вопрос об допустимости преднамеренного учёта запаса динамической устойчивости ЭЭС остаётся открытым;
- e) Не исключены отрицательные проверки ТТ при больших кратностях тока КЗ и постоянных времени, что характерно для электростанций и близ лежащих подстанций;
- f) Объём расчётов по данной методике существенно увеличивается в силу необходимости рассмотрения различных режимов работы защиты;
- g) Как правило, вывод о необходимых технических характеристиках ТТ делается на этапе выполнения ПД (например, при замене электромеханических РЗА на МП), когда производитель устройства РЗА не известен. Поэтому расчёт надо проводить для всех возможных производителей, чтобы не получилось ситуации, когда проверка функционирования РЗА в переходном режиме была проведена для устройства фирмы «А», а закуплено было устройство фирмы «Б», и ТТ вдруг стал непригоден;
- h) Поскольку мощность энергосистемы увеличивается, что сопровождается и увеличением токов КЗ, то возможно уже через пару лет проверяемый ТТ станет не удовлетворять необходимым требованиям.

Существующий методики [4, 5] лишены указанных недостатков: это официальные проверенные документы, а предъявляемые ими жёсткие требования гарантируют работоспособность РЗА и обеспечивают расчётный запас. При этом объём расчётов относительно невелик. Самый частый вывод при расчёте – необходимость замены существующих ТТ.

В итоге, сию минуту осуществить замену ТТ невозможно, но устойчивое функционирование РЗА в переходном режиме для надёжной работы ЭЭС необходимо обеспечивать уже сейчас. Как быть? Для МП устройств РЗА правильная работа при насыщении трансформатора тока класса точности 10Р может быть достигнута с помощью специальных алгоритмов, о некоторых из которых речь пойдёт далее.

2.1 Внешнее КЗ

Очевидно, что внешние КЗ по отношению к защищаемому объекту случаются гораздо чаще, чем внутренние. Поэтому первоочередной задачей для дифференциальной защиты является обеспечение селективной работы.

В режиме внешнего КЗ по дифференциальной цепи протекает только ток небаланса, обусловленный токами намагничивания ТТ. Для отстройки от этого тока во всех

современных МП защитах применяется тормозная характеристика срабатывания (рисунок 2.1).

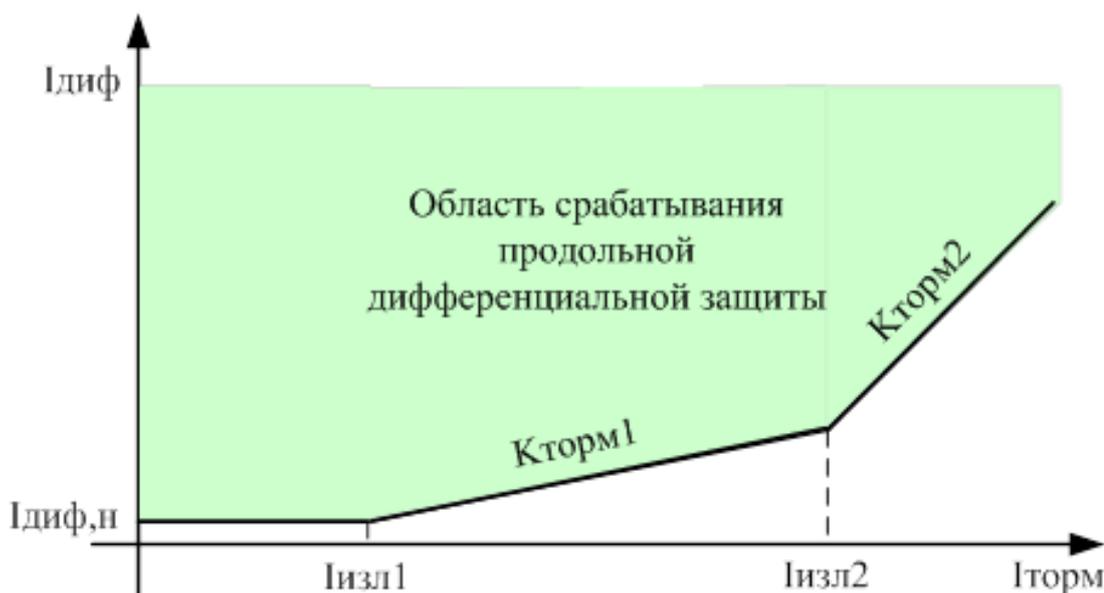


Рисунок 2.1 – Тормозная характеристика срабатывания

К сожалению, тормозная характеристика на рисунке 2.1 способна обеспечить отстройку только от токов небаланса в установившемся режиме КЗ. В переходном режиме, когда возможно насыщение ТТ, мгновенное значение тока небаланса может быть равно величине тока КЗ. Хотя защита, как правило, реагирует на интегральные параметры (например, действующее значение тока), значения которых зависит от значений в предыдущие моменты времени, велика вероятность излишнего срабатывания. Поэтому принимаются дополнительные меры по обеспечению правильной работы защиты, некоторые из которых приведены далее.

1. *Дополнительное торможение.* Одной из таких мер является введение области дополнительного торможения на тормозную характеристику (рисунок 2.2), принцип работы которой основан на том, что ТТ не насыщается мгновенно (необходимо время, чтобы рабочая точка на характеристике намагничивания переместилась в область насыщения ТТ). Из-за этого в первый момент КЗ токи трансформируются точно, дифференциальный ток мал, а тормозной ток большой. Рабочая точка на тормозной характеристике попадает в область дополнительного торможения, что фиксируется защитой и на заданное время (около 150 мс [14]) отключение блокируется. При насыщении одного из ТТ появляется дифференциальный ток, и рабочая точка переходит в область

срабатывания. Однако защита не срабатывает, так как уже было зафиксировано попадание в дополнительную область торможения [22].

Исходя из этого, должна быть обеспечена точная трансформация ТТ в течение времени, необходимого для фиксации попадания замера в область дополнительного торможения. Это время составляет около 3 м/с [14], что гораздо меньше времени достоверного измерения тока для дифференциальных защит трансформатора (25 м/с).

Поскольку внешнее КЗ является тяжёлым режимом, из-за него возможно появление внутреннего КЗ. Поэтому в дифференциальных защитах, использующих область дополнительного торможения, предусматривается логика отмены блокировки на срабатывание.

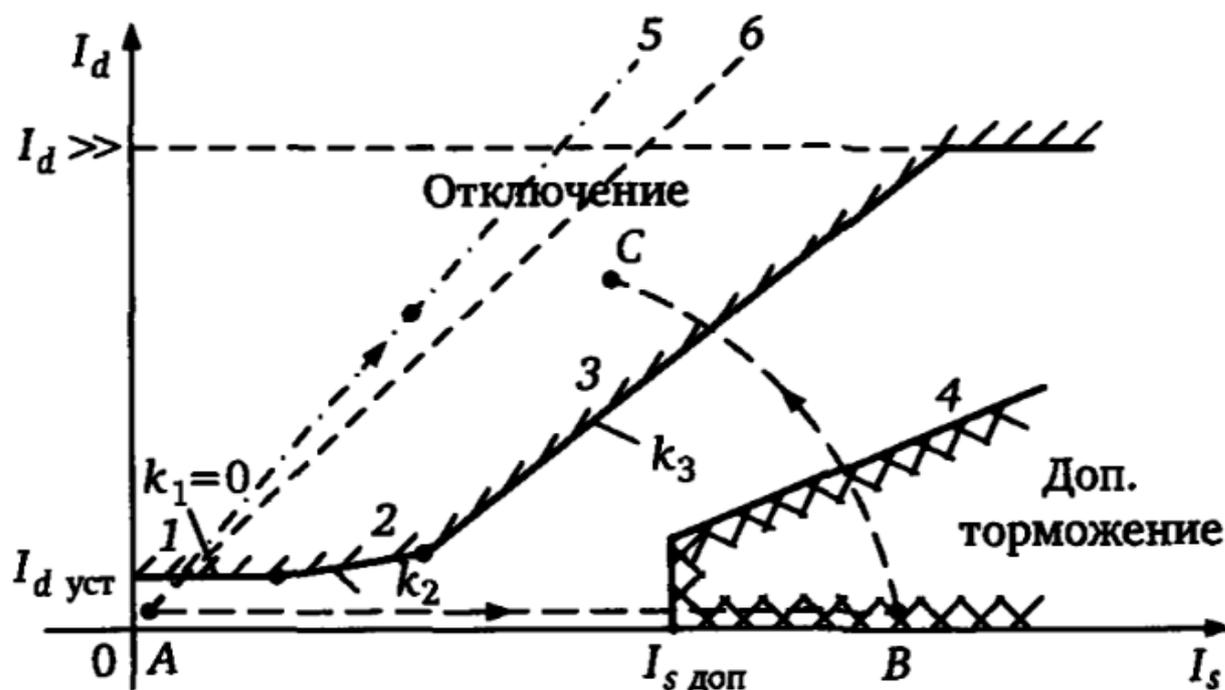


Рисунок 2.2 – Тормозная характеристика срабатывания с областью дополнительного торможения

К недостаткам данного способа можно отнести то, что его устойчивое проявление наблюдается только в начале первого периода ПП [23].

Описанный выше алгоритм применяется в дифференциальных защитах шин (ошиновок) и силовых трансформаторах фирмы «Siemens AG» [24, 25].

2. *Торможение гармоническими составляющими.* Как правило, насыщение измерительных ТТ имеет место при наличии апериодической слагающей в токе КЗ. При этом во вторичном токе содержится высокая доля второй гармонической составляющей.

Исходя из этого, по величине второй или нулевой гармонике производится соответствующее увеличение тормозного сигнала [22].

Так как апериодическая слагающая в токе КЗ и вторая гармоника во вторичном токе характерны и при внутреннем КЗ, то при описанном способе торможения в данном режиме возможны задержки в срабатывании, [23]. Также, вычисление гармонического состава требует времени, что накладывает ограничения по времени срабатывания защиты.

3. *Применение направленного торможения.* Направленное торможение – способ торможения, при котором тормозной сигнал формируется по следующей формуле:

$$I_T = \sqrt{I_1 \cdot I_2 \cdot \cos(180^\circ - \alpha)}, \quad (2.1)$$

где I_1 – модуль наибольшего тока плеч; I_2 – сумма модулей токов плеч за исключением тока I_1 ; α – угол между векторами токов I_1 и I_2 .

В режиме внешнего КЗ угол α близок к 180° и тормозной сигнал максимален. В режиме внутренних КЗ угол α находится в диапазоне от -90° до 90° , при таких значениях $I_T = 0$. В режиме опробования, когда ток протекает только по одному плечу, $I_2 = 0$ и $I_T = 0$. Указанное справедливо в установившемся режиме КЗ.

У данного способа торможения также есть свои недостатки. Например, в режиме внешнего КЗ с двухсторонним питанием и глубоким насыщением ТТ повреждённой ветви, когда ток в плече защиты практически исчезает, процедура определения тока I_1 может ошибочно назначить один из токов питающих ветвей, и тогда $\alpha = 0$ и $I_T = 0$. Поэтому для повышения устойчивости функционирования предусматривается блокирование таких защит при сверхтоках внешних КЗ [23] и дополнение защиты дифференциальной отсечкой.

Описанный выше способ торможения применяется в МП РЗА силовых трансформаторов фирмы ООО НПП «ЭКРА» [26].

2.2 Внутреннее КЗ и бросок тока намагничивания

Обеспечение устойчивого функционирования дифференциальной защиты силового трансформатора при внутренних КЗ осложнено таким явлением, как бросок тока намагничивания (БТН).

Бросок тока возникает в результате насыщения сердечника силового трансформатора при его включении на холостой ход (ХХ). Поскольку амплитуда тока БТН может превышать номинальный ток трансформатора примерно в 7 раз, а на стороне смежного напряжения ток отсутствует, то данный режим воспринимается дифференциальной защитой как внутреннее КЗ. Хотя величина БТН сопоставима с

величиной тока КЗ, такой режим не является аварийным и не требует отключения, соответственно защита должна блокироваться.

Одним из самых используемых методов отстройки от БТН в цифровых РЗ является определение гармонического состава дифференциального тока [25, 26, 27, 28]. Установлено, что в БТН преобладает ток второй гармоники. Соответственно, контролируя процентный гармонический состав (как правило, отношение тока второй гармоники к току основной гармоники) дифференциального тока, можно отличать БТН от внутреннего КЗ и блокировать защиту [22]. Уставка по блокировке у различных производителей варьируется от 10 до 15 %.

Описанный выше способ блокировки имеет свои недостатки. Так как вычисление процентного состава гармонических составляющих в дифференциальном токе требует времени, то во избежание неселективного действия при внешних КЗ или включении отключение от дифференциальной защиты трансформатора должно быть замедлено на 10-25 м/с.

Также данный способ блокировки не всегда устойчив при насыщении ТТ. Рассмотрим случай, когда при внутреннем КЗ, сопровождающимся глубоким насыщением ТТ, вторичный сигнал искажается, приобретая форму, приведённую на рисунке В.1. В искажённом вторичном токе содержится высокая доля второй гармоники, из-за чего защита воспринимает данный режим не как КЗ, а как БТН [29]. В итоге, защита блокируется до тех пор, пока ТТ не выйдет из насыщения, т.е. происходит задержка в срабатывании защиты. Такое замедление в срабатывании влечёт за собой следующие последствия:

- дорогостоящий ремонт трансформатора;
- нарушение динамической устойчивости ЭЭС и, как следствие, перерыв в электроснабжении;
- каскадное развитие аварии при наличии других неисправностей, наносящее большой урон ЭЭС и потребителям.

Как следует из [30], при наличии больших постоянных времени (0,1 с и более) в режиме внутреннего однофазного КЗ велика вероятность появления задержек в срабатывании, превышающих предельное время срабатывания РЗ по условию сохранения динамической устойчивости ЭЭС. Поэтому для ускорения срабатывания защиты при больших кратностях тока обязательно должна вводиться дифференциальная отсечка, в которой используется только дифференциальный принцип без контроля гармонического состава.

Также необходимо отметить, что при трёхфазных КЗ (которые являются наиболее тяжёлым видом повреждения с точки зрения устойчивости ЭЭС) отказы в срабатывании

дифференциальной защиты трансформатора, обмотки которого на стороне ВН соединены по схеме «звезда», исключены [30].

Трансформаторы тока могут насыщаться и от самого БТН (рисунок 2.3). В этом случае вторичный ток становится более симметричным относительно оси абсцисс, что влечёт за собой уменьшение второй гармоники в дифференциальном токе. В результате уставку блокировки также приходится уменьшать, однако это может привести к отказу или задержке в срабатывании защиты при внутренних КЗ, сопровождающихся насыщением ТТ.

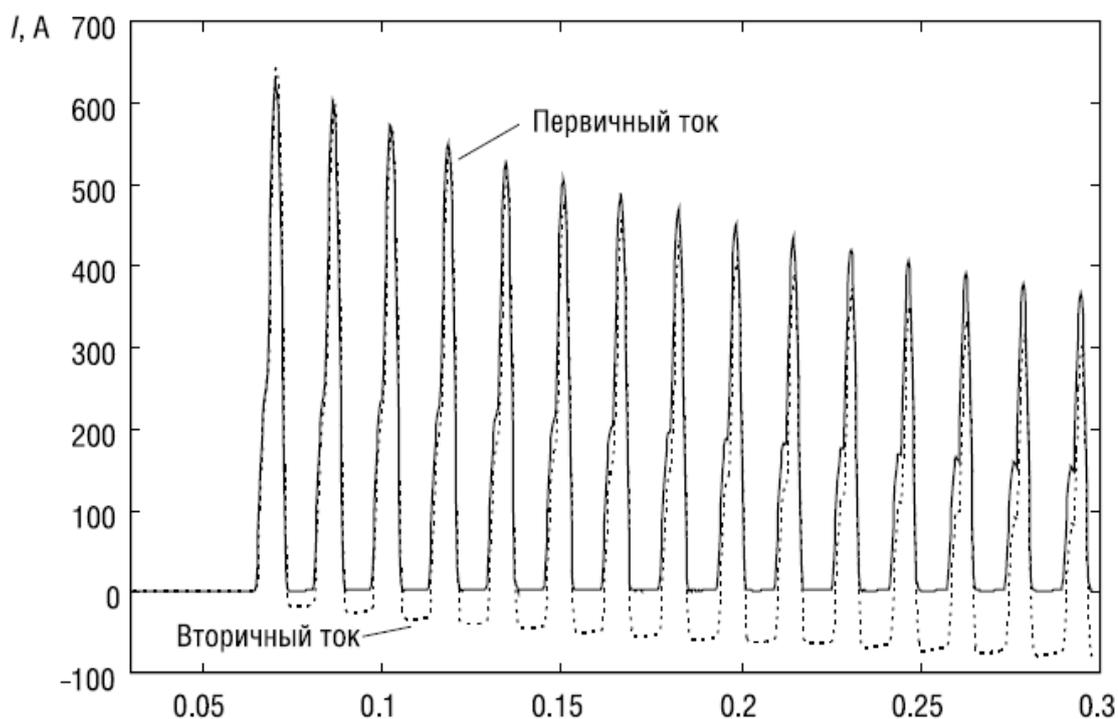


Рисунок 2.3 – Бросок тока намагничивания, сопровождающийся насыщением ТТ

Модифицированный алгоритм отстройки, предложенный Богданом Каштенни [31], позволяет блокировать ДЗТ при БТН с содержанием 2-й гармоники менее 15%. В данном алгоритме в качестве контролируемой величины выступает не отношение амплитуды (действующего значения) тока второй гармоники к амплитуде (действующему значению) тока первой гармоники, как в традиционной блокировке, а отношение комплексных величин токов этих же гармоник (т.е. учитываются фазы токов):

$$\underline{I}_{21} = \frac{I_2}{I_1}, \quad (2.2)$$

где I_2 – полный ток второй гармонической составляющей; I_1 – полный ток основной гармоники.

В результате характеристика срабатывания принимает вид как на рисунке 2.4. При этом зона срабатывания со временем изменяется для надёжного отключения при внутренних КЗ [31].

Как следует из [31], статистическая оценка данного алгоритма выявила возможность перекрещивания области, в которой находятся значения вектора I_{21} при внутреннем КЗ и области, в которой находятся значения вектора I_{21} при БТН, что может привести к неустойчивому функционированию защиты.

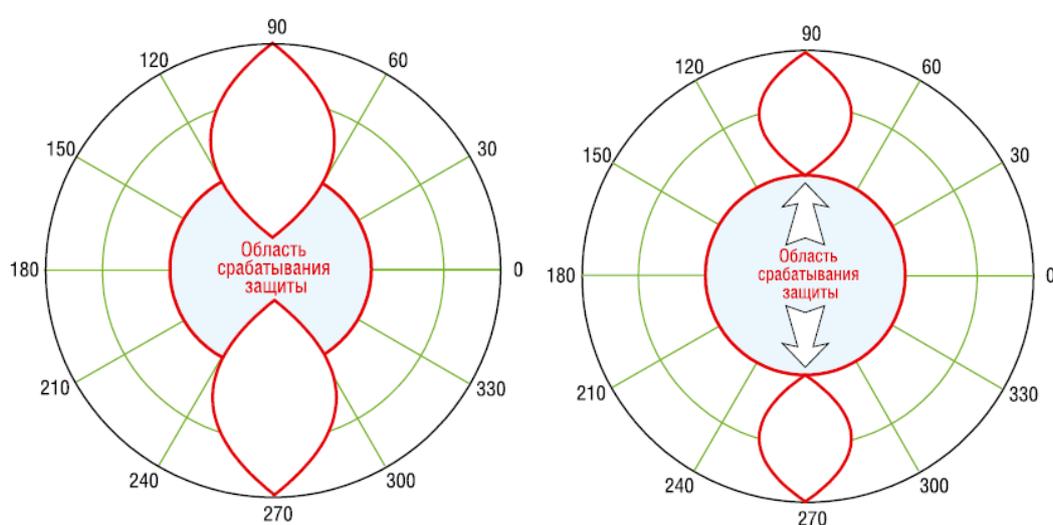


Рисунок 2.4 – Область срабатывания защиты для модифицированного алгоритма отстройки по второй гармонике: слева – изначальная область срабатывания; справа – расширенная область срабатывания

2.3 Восстановление вторичного тока

Решением проблемы устойчивого функционирования РЗ при насыщении ТТ может стать «восстановление» искажённого вторичного тока. Под «восстановлением» понимается вычисление МП терминалом вторичного тока, которое может осуществляться [32, 33]:

- 1) с использованием параметров вторичной цепи и характеристики намагничивания ТТ;
- 2) с использованием интервалов точной трансформации.

Первый способ также называют «восстановлением» по обратной модели ТТ. Основными недостатками такого метода являются:

- невозможность определения остаточной индукции в сердечнике, что даёт погрешности в расчёте более 1000 %;
- большие погрешности вычисления вторичного тока при насыщении для ТТ, характеристика намагничивания (ХН) которого близка к ПХН [34].

Последний недостаток особенно важен, ведь большинство ТТ в российской промышленности изготавливаются из холоднокатаной стали, ХН которой как раз близка ПХН. Вычисление вторичного тока с достаточной точностью возможно при аппроксимации ХН до спрямлённой характеристики намагничивания (СХН), но для этого должны соблюдаться критерии применимости такой аппроксимации [35].

Также важно отметить, что разработанные алгоритмы «восстановления» тока по обратной модели применимы только для одиночных ТТ, т.е. не соединённых в группы (в том числе по схеме «полная звезда») [33, 34, 36].

Основной сложностью при реализации «восстановления» вторым способом является точное определение момента насыщения ТТ. Это возможно сделать при помощи:

1. Использования принципа отставания во времени дифференциального тока от тормозного (см. подраздел 2.1);
2. Контроля производной вторичного тока;
3. Выявления участков достаточно точной трансформации.

Первое решение применимо только для дифференциальных защит. Второе решение эффективно только при резких переходах ТТ от ненасыщенного состояния к насыщенному, также имеет место низкая помехоустойчивость. Решения, относящиеся к третьей группе, теоретически являются самими быстродействующими. Однако, на практике они чувствительны к наличию высших гармоник во вторичном токе, что обуславливает необходимость применения цифровой фильтрации. Из-за этого время действия защиты увеличивается до 20 мс [33].

В терминале «ТОР 300 ДЗТ 512» производства ООО «Релематика» используется метод восстановления вторичного тока с использованием интервалов точной трансформации, описанный в [37, 38]. Такой метод позволяет обеспечить время срабатывания защиты при тяжёлых внутренних повреждениях на уровне 25-30 мс и повысить устойчивость функционирования при внешних КЗ. Как следует из [39], полная погрешность восстановленного тока, вычисленная по формуле (2.3), находится на уровне 20-35 %.

$$\varepsilon = \frac{100}{I_1} \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{1}{k_T} \cdot i_1 - i_2 \right)^2 dt}, \quad (2.3)$$

где I_1 – действующее значение первичного тока, к которому приводится численное значение погрешности; T – длительность периода тока; k_T – коэффициент трансформации ТТ; i_1 – мгновенное значение первичного тока; i_2 – мгновенное значение вторичного тока.

2.4 Нейронные сети в релейной защите

В настоящее время активно развиваются технологии искусственных нейронных сетей (ИНС). Этому способствует материальная база, созданная за последние несколько лет: высокая мощность вычислительных машин, обучающая литература и программные инструменты.

Известны случаи применения ИНС в различных сферах: медицина, связь и коммуникация, банковское дело, предпринимательство, нефтедобывающая промышленность и др. Такая технология не могла обойти и электроэнергетику, где уже сейчас ИНС используются в целях:

- прогнозирования электрической нагрузки;
- диагностики состояния оборудования;
- оптимизации размещения возобновляемых источников энергии (ВИЭ).

При этом использование ИНС в системах РЗА, в частности для обеспечения правильной работы при насыщении ТТ, находится под вопросом. В диссертациях последних лет, посвящённых методам повышения устойчивости функционирования дифференциальной защиты, про ИНС ничего не сказано [39, 40, 41]. В публикациях, посвящённых применению ИНС в РЗА, нет ни слова про насыщение ТТ [42, 43].

В [44] указано использование ИНС для отстройки от БТН в дифференциальных защитах трансформатора Sepam T87 фирмы Schneider Electric. Нейронная сеть сама определяет необходимость действия на отключение или блокировку на основании комплексного анализа всех входных величин. К сожалению, данные о результатах внедрения такой технологии и какие-либо подробности о реализации отсутствуют.

Согласно публикации [45], в которой выполнялось восстановление искажённого тока, рекуррентная ИНС не успевала распознать момент начала КЗ. В [46] реализовано восстановление искажённого тока при помощи ИНС и вейвлет-преобразования.

Исходя из вышесказанного следует, что тема применения ИНС для повышения устойчивости функционирования РЗА при насыщении ТТ в настоящий момент раскрыта не полностью.

3 РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОБУЧЕНИЯ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

В данной работе планируется разработать ИНС, которая обеспечивает несрабатывание дифференциальной защиты при внешних КЗ. Такое возможно с помощью восстановления искажённого вторичного тока.

Для того, чтобы ИНС могла восстановить вторичный ток, её необходимо сперва обучить. Под обучением подразумевается нахождение таких весовых коэффициентов между нейронами, чтобы решение поставленной задачи выполнялось с нужной точностью. Рассматривается обучение «с учителем», т.е. когда у каждого примера в обучающем наборе данных имеется свой «правильный ответ». На вход нейронной сети подаётся обучающий набор, а на выходе должны появляться «правильные ответы». При этом в процессе обучения весовые коэффициенты корректируются таким образом, чтобы ответы ИНС совпадали с «правильными ответами».

В нашем случае обучающим набором данных являются осциллограммы искажённого насыщением вторичного тока ТТ, а «правильными ответами» – осциллограммы первичного тока, приведённого к числу витков вторичной обмотки. Поскольку для обучения ИНС необходимо большое количество таких осциллограмм, а их снятие, естественно, не представляется возможным, то сначала надо разработать математические модели, с помощью которых можно было бы получить нужные кривые. Разработке этих моделей и посвящена данная глава.

В соответствии с [2], причиной крупной аварии на ПС 500 кВ Тамань в 2018 году стала излишняя работа дифференциальной токовой отсечки в составе дифференциальной защиты ошиновки стороны НН (ДЗО НН в шкафу типа ШЭ2710 542543 [47]) автотрансформатора (АТ) при КЗ на шинах 10 кВ. В работе рассматриваются аналогичные условия.

3.1 Модель первичной сети

В качестве исследуемого объекта выбрана проектируемая филиалом АО «НТЦ ФСК ЕЭС» – СибНИИЭ ПС 500 кВ Нижнеангарская. На данной ПС проектом предусмотрена установка двух автотрансформаторов 500/220/10 кВ.

Схема распределения защит по ТТ для исследуемого участка (АТ-1) приведена на рисунке 3.1. Дифференциальная защита ошиновки (ДЗО) стороны НН имеет два плеча. Токовые цепи первого плеча подключены к ТТ-1-10 АТ-1, встроенному в вводы АТ-1. Токовые цепи второго плеча подключены к ТТ-2-10 АТ-1, который находится в ячейке ЗРУ 10 кВ. Устойчивость работы ДЗО НН в переходном режиме зависит от правильности

работы указанных выше ТТ. В зону защиты, помимо ошиновки, также входит реактор РТ-10 АТ-1. Вторичные обмотки ТТ соединены по схеме «полная звезда».

На рисунке 3.1 красным цветом выделен терминал с функцией ДЗО НН и керны ТТ, к которым подключается этот терминал. Также на рисунке приведён ток в установившемся режиме внешнего трёхфазного КЗ.

Для моделирования переходных процессов в первичной сети используется модель, разработанная в программном комплексе Matlab/Simulink. Блок «System» моделирует импеданс и ЭДС системы. Блок «Reactor» моделирует сопротивление реактора РТ-10 АТ-1. Блок «Load_10» моделирует нагрузку 10 кВ. Блок «Fault» моделирует место КЗ. Блоки «ТТ-1-10 АТ-1» и «ТТ-2-10 АТ-1» моделируют места установки соответствующих ТТ. Структурная схема модели приведена на рисунке 3.2. Параметры блоков модели приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Параметры модели первичной сети

Параметр		Значение
Блок «System»	E , кВ	$10,6 \angle 0^\circ$
	R_{sys} , Ом	0,006
	L_{sys} , мГн	0,3024
Блок «РТ-10 АТ-1»	R_{react} , Ом	0,008
	L_{react} , мГн	1,114
Блок «Load»	U , кВ	10
	P , МВт	5,92
	Q , МВар	1,95

Для проверки правильности работы модели рассчитаем действующее значение тока в установившемся режиме при внешнем трёхфазном КЗ:

$$\begin{aligned}
 I_{\text{кЗрасч.}} &= \frac{E}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{(R_{sys} + R_{react})^2 + \omega \cdot (L_{sys} + L_{react})^2}} = \\
 &= \frac{10,6 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{(0,006 + 0,008)^2 + 314 \cdot 10^{-6} \cdot (0,3024 + 1,114)^2}} = 13,75 \text{ кА}
 \end{aligned}$$

На рисунке 3.3 приведена осциллограмма тока, полученная путём моделирования.

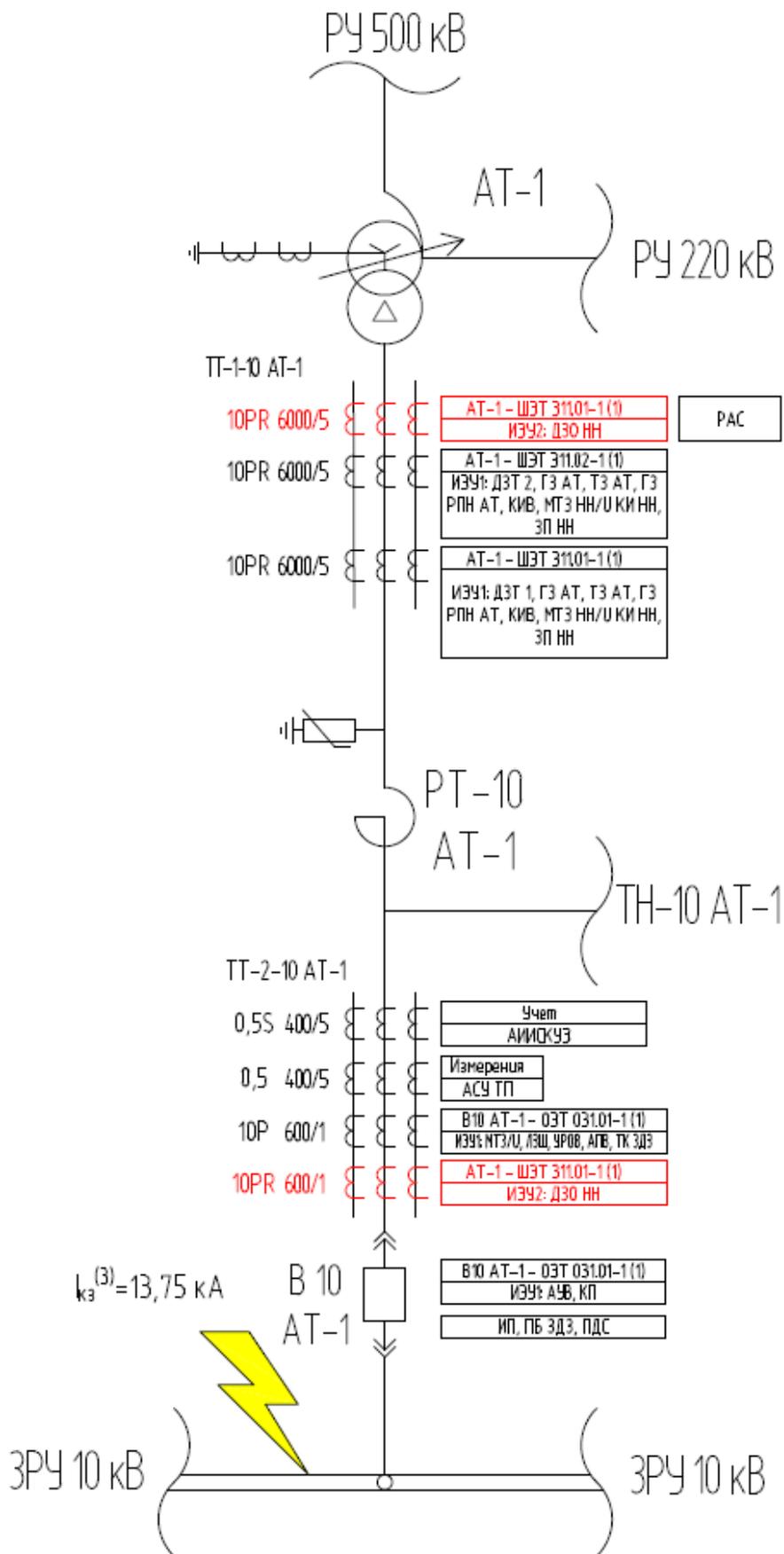


Рисунок 3.1 – Схема распределения защит по ТТ для исследуемого участка (АТ-1)

Continuous

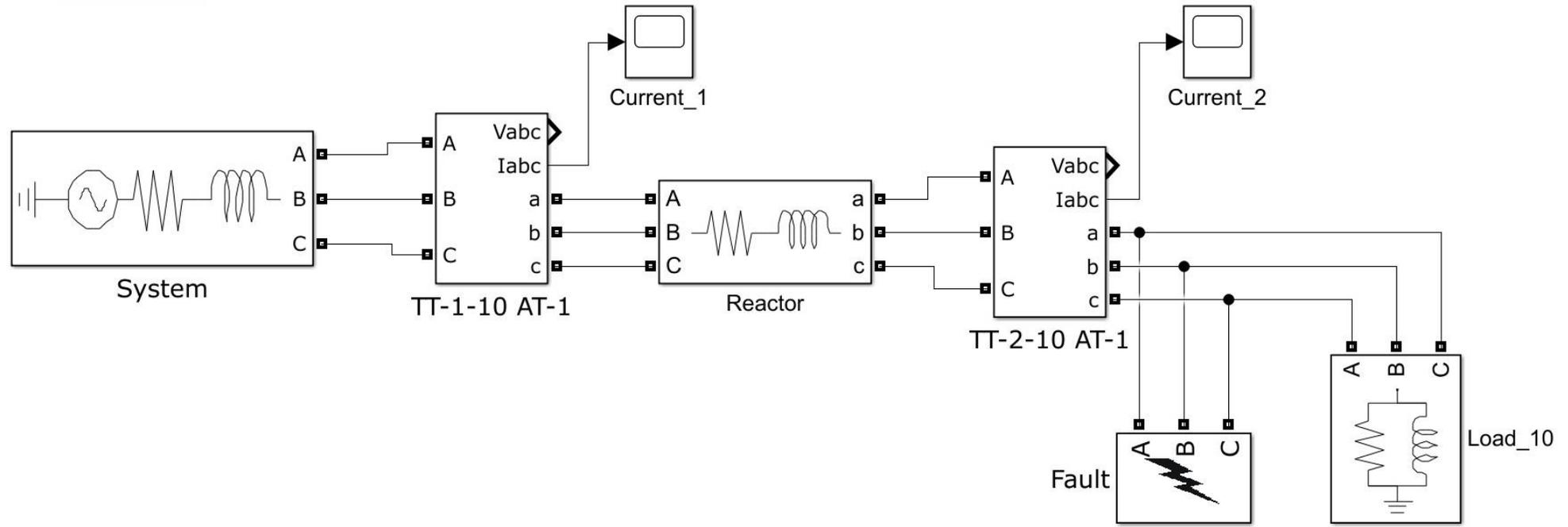


Рисунок 3.2 – Структурная схема модели первичной сети

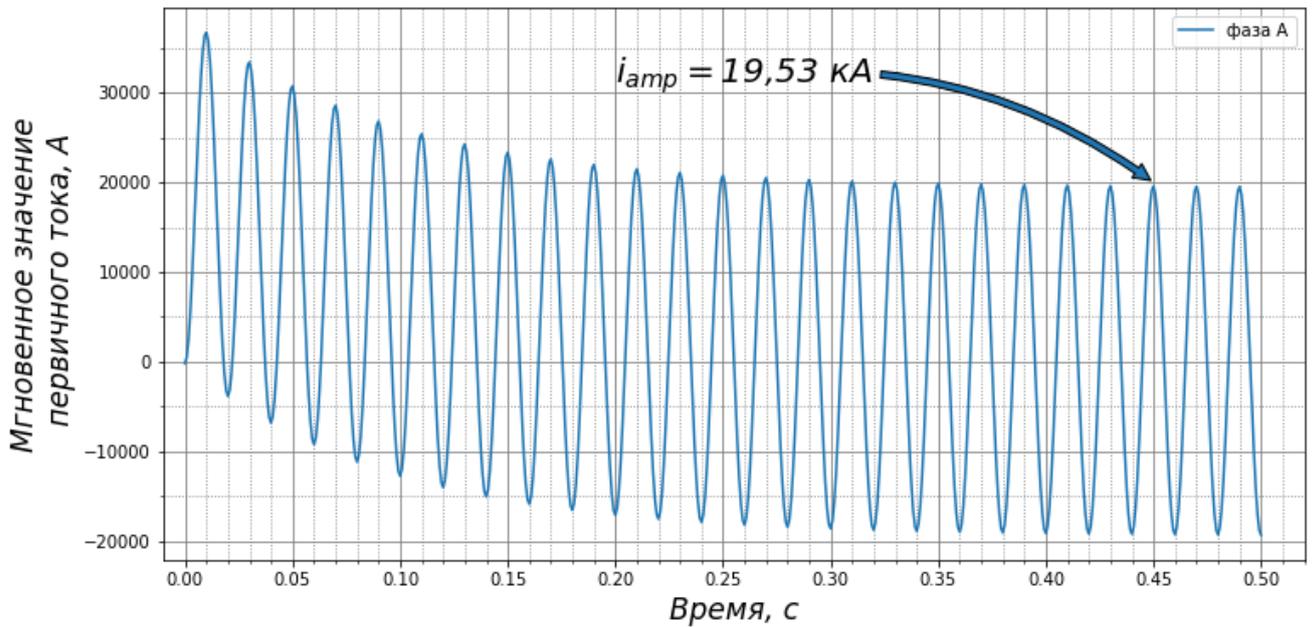


Рисунок 3.3 – Осциллограмма первичного тока

Действующее значение равно:

$$I_{\text{КЗмодел.}} = \frac{i_{\text{amp}}}{\sqrt{2}} = \frac{19,53}{\sqrt{2}} = 13,81 \text{ кА}$$

Относительная погрешность модели составляет:

$$\delta = \frac{|I_{\text{КЗрасч.}} - I_{\text{КЗмодел.}}| \cdot 100\%}{I_{\text{КЗрасч.}}} = \frac{|13,75 - 13,81| \cdot 100\%}{13,75} = 0,44 \%$$

Так как погрешность составляет менее 0,5 %, то использование данной модели допустимо.

Отметим, что на рисунке 3.3 приведена только осциллограмма тока в фазе А. Первичные токи во время переходного процесса в фазах В и С будут отличаться из-за сдвига в 120 электрических градусов. Остаточная индукция в сердечниках ТТ каждой фазы в общем случае не одинаковая. Поскольку при соединении вторичных обмоток ТТ по схеме «полная звезда» из-за наличия нулевого провода имеет место взаимное влияние друг на друга ТТ во всех трёх фазах, при формировании обучающей выборки также необходимо моделировать токи в фазах В и С.

3.2 Модель трансформатора тока

Для моделирования переходных процессов в трансформаторах тока используется одна из моделей, учитывающая схему соединения вторичных обмоток «полная звезда» (рисунок 3.4,а). Модель на рисунке 3.4,а описывается системой дифференциальных уравнений (3.1). На рисунке 3.4,б приведена схема одиночного ТТ для пояснения вывода уравнений.

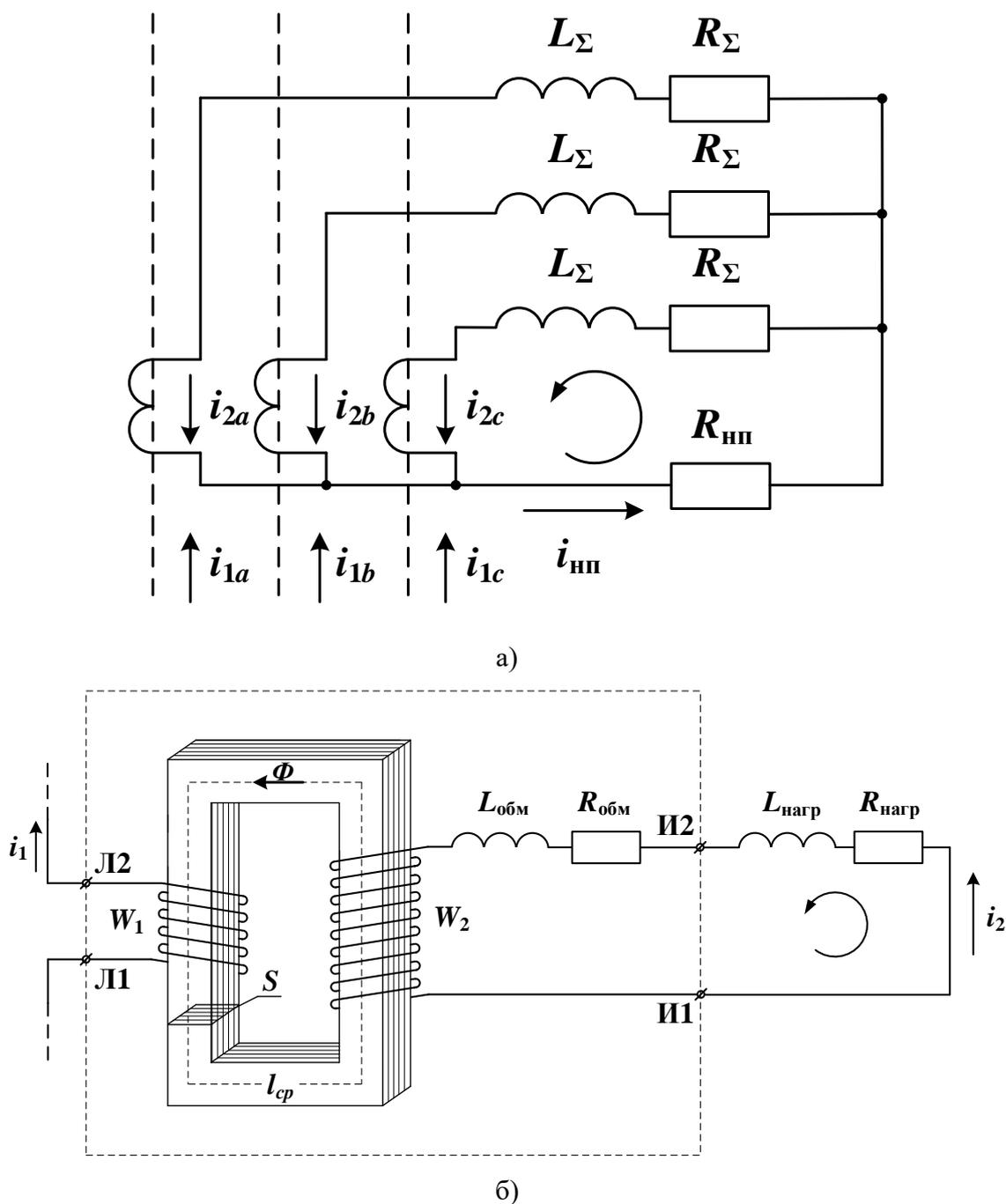


Рисунок 3.4 – Схема трансформатора тока:

а) «полная» звезда; б) одиночный трансформатор тока.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{di_{2a}}{dt} L_{\Sigma} + i_{2a} R_{\Sigma} + i_{\text{нп}} R_{\text{нп}} = \frac{dB_a}{dt} S W_2; \\ \frac{di_{2b}}{dt} L_{\Sigma} + i_{2b} R_{\Sigma} + i_{\text{нп}} R_{\text{нп}} = \frac{dB_b}{dt} S W_2; \\ \frac{di_{2c}}{dt} L_{\Sigma} + i_{2c} R_{\Sigma} + i_{\text{нп}} R_{\text{нп}} = \frac{dB_c}{dt} S W_2; \\ \frac{dB_a}{dt} = \mu_{\partial a} \frac{\frac{di_{1a}}{dt} W_1 - \frac{di_{2a}}{dt} W_2}{l_{\text{cp}}}; \\ \frac{dB_b}{dt} = \mu_{\partial b} \frac{\frac{di_{1b}}{dt} W_1 - \frac{di_{2b}}{dt} W_2}{l_{\text{cp}}}; \\ \frac{dB_c}{dt} = \mu_{\partial c} \frac{\frac{di_{1c}}{dt} W_1 - \frac{di_{2c}}{dt} W_2}{l_{\text{cp}}}. \end{array} \right. \quad (3.1)$$

где i_{2k} – мгновенное значение вторичного тока в k -й фазе, А; i_{1k} – мгновенное значение первичного тока в k -й фазе, А; t – время, с; $L_{\Sigma} = L_{\text{обм}} + L_{\text{нагр}}$ – суммарная индуктивность вторичной цепи ТТ, Гн; $R_{\Sigma} = R_{\text{обм}} + R_{\text{нагр}}$ – суммарное активное сопротивление вторичной цепи, Ом; B_k – магнитная индукция в сердечнике ТТ k -й фазы, Тл; S – площадь поперечного сечения сердечника, м²; W_2 – число витков вторичной обмотки; W_1 – число витков первичной обмотки; $\mu_{\partial k}$ – дифференциальная магнитная проницаемость в ТТ k -й фазы, Тл · м/А; l_{cp} – средняя линия сердечника, м; $i_{\text{нп}} = i_{2a} + i_{2b} + i_{2c}$ – мгновенное значение тока в нулевом проводе; $R_{\text{нп}}$ – сопротивление нулевого провода; $B = f(H)$ – характеристика намагничивания.

Одним из главных допущений в используемой модели трансформатора тока является то, что зависимость $B(H)$ определяется основной кривой намагничивания, а не петлёй гистерезиса (рисунок 1.5). Это упрощает процесс моделирования, делает его более быстрым. Основанием такого допущения является то, что ТТ изготавливаются из марки стали с узкой петлёй гистерезиса, приближенной к основной кривой намагничивания. Поскольку в работе исследуется поведение ТТ в экстремальных режимах (короткие замыкания), большая точность не требуется. Допускается, что сердечник ТТ изготовлен из марки стали Э330А, характеристика намагничивания которой приведена на рисунке 3.5.

Для нахождения вторичных токов ТТ необходимо решить систему дифференциальных уравнений (3.1) с использованием зависимости $B(H)$. Перед решением задаются начальные значение вторичного тока i_{2k} и индукции B_k . Поскольку момент КЗ будет изменяться при помощи изменения настроек блока «Fault», то начальное значение i_{2k}

всегда принимается равным 0. Задание начального значения B_k , по сути, является заданием остаточной индукции в сердечнике.

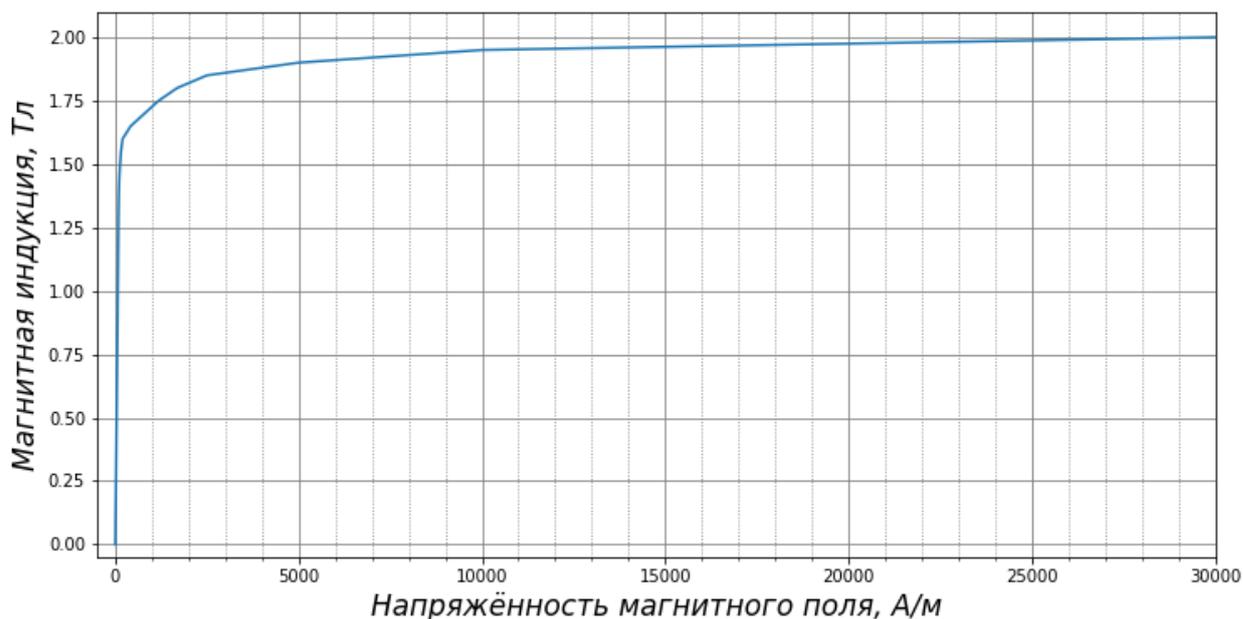


Рисунок 3.5 – Характеристика намагничивания

Обоснованием для возможности применения вышеописанной модели является совпадение характера переходного процесса на рисунке В.1 (оранжевая кривая) с приведёнными в [8].

Выполним проверку трансформаторов тока с целью определения требуемых технических характеристик. Параметры ТТ выбраны из [8]. В качестве ТТ-1-10 АТ-1 предусматривается к установке ТВТ-10. В качестве ТТ-2-10 АТ-1 предусматривается к установке ТПОЛ-10. Поскольку в [8] для ТПОЛ-10 приведены данные только для 5-ти амперного ТТ, а на рисунке 3.1 предусматривается 1 амперный, то номинальное сопротивление нагрузки увеличено в 25 раз, а число витков вторичной обмотки в 5 раз. Исходные данные для расчёта и параметры проверяемых ТТ приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Исходные данные для расчёта и параметры ТТ

Наименование параметра	Обозначение	ТВТ-10	ТПОЛ-10
Номинальный первичный ток, А	$I_{ном}$	6000	600
Номинальный вторичный ток, А	$I_{2ном}$	5	1
Номинальная предельная кратность	$K_{ном}$	12	19
Номинальная мощность нагрузки, ВА	$S_{ном}$	30	15

Наименование параметра	Обозначение	ТВТ-10	ТПОЛ-10
Номинальный $\cos\phi$ нагрузки	$\cos\phi$	0,8	0,8
Активное сопротивление вторичной обмотки, Ом	R_2	1,14	0,26
Индуктивное сопротивление вторичной обмотки, Ом	X_2	1	0
Площадь поперечного сечения сердечника, м ²	Q	$8,1 \cdot 10^{-4}$	$14,3 \cdot 10^{-4}$
Средняя линия, м	l_{cp}	1,07	0,338
Число витков вторичной обмотки	w_2	1200	600
Мощность, потребляемая терминалом, ВА	$S_{уст}$	3	0,5
Коэффициент мощности нагрузки	$\cos\phi_n$	1	1
Количество последовательно включённых терминалов	m	2	1
Переходное сопротивление контактов, Ом	$R_{конт}$	0,05	0,05
Длина токовых цепей, м	L	400*	375
Расчётный ток КЗ, А	$I_{кз}$	64290	13750

*В реальном проекте длина контрольных кабелей составляет 685 м. Забегая вперёд, скажем, что при длине 685 м и параметрах как в таблице 3.2 ТВТ-10 не проходит даже обычную проверку на 10%-ю погрешность, не говоря уже проверке на время до насыщения. Поэтому в данной работе длина контрольных кабелей уменьшена до 400 м.

Проверка трансформаторов тока на 10%-ю погрешность осуществляется в следующем порядке.

Определяется номинальное сопротивление нагрузки:

$$Z_{ном} = \frac{S_{ном}}{I_{2,ном}^2} \quad (3.2)$$

Нагрузка на ТТ, обусловленная сопротивлением вторичной обмотки:

$$Z_2 = \sqrt{R_2^2 + X_2^2} \quad (3.3)$$

Сопротивление терминала:

$$R_{уст} = \frac{S_{уст}}{I_{2.ном}^2} \quad (3.4)$$

Расчётная кратность тока:

$$K_{расч} = \frac{I_{кз}}{I_{1.ном}} \quad (3.5)$$

Затем находится допустимая нагрузка на ТТ при расчётном значении кратности тока:

$$Z_{нагр.доп} = \frac{K_{ном} \cdot (Z_2 + Z_{ном})}{K_{расч}} \quad (3.6)$$

После этого определяется сечение жил кабеля $S_{каб}$, соответствующее допустимой нагрузке $Z_{нагр.доп}$. Сечение выбирается не меньше $2,5 \text{ мм}^2$ по условию механической прочности и не больше 6 мм^2 для удобного присоединения кабеля к клеммам шкафа.

$$R_{каб} = \frac{L \cdot \rho}{S_{каб}}, \quad (3.7)$$

где $\rho = 0,0175 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$ – удельное сопротивление медной жилы контрольного кабеля.

Далее находится действительная расчётная нагрузка ТТ при трёхфазном КЗ (в сети 10 кВ замыкание на землю не является коротким):

$$Z_{нагр.расч} = R_{каб} + R_{конт} + m \cdot R_{уст} \quad (3.8)$$

Расчётное полное сопротивление вторичной нагрузки ТТ принимается чисто активным, поскольку сопротивление контрольных кабелей, контактов, МП терминалов РЗ имеют активный характер. Поэтому $X_{нагр.расч} = 0$.

Затем рассчитывается допустимая кратность тока при расчётном значении нагрузки на ТТ:

$$K_{\text{доп}} = \frac{K_{\text{ном}} \cdot (Z_2 + Z_{\text{ном}})}{Z_2 + Z_{\text{нагр.расч}}} \quad (3.9)$$

Также определяется напряжение на зажимах вторичной обмотки ТТ при максимальном токе КЗ:

$$U_{\text{макс}} = \sqrt{2} \cdot K_y \cdot \frac{I_{\text{макс.кз}} \cdot I_{2.\text{ном}} \cdot Z_{\text{нагр.расч}}}{I_{1.\text{ном}}}$$

где $K_y = 2$ – ударный коэффициент.

Критерии соответствия ТТ требованиям следующие:

$$Z_{\text{нагр.расч}} < Z_{\text{нагр.доп}}$$

$$K_{\text{расч}} < K_{\text{доп}}$$

$$U_{\text{макс}} < 1410 \text{ В}$$

В таблице 3.3 приведены результаты проверки ТТ на 10%-ю погрешность. Оба ТТ прошли проверку.

Поскольку документы [4] и [5] были приняты только в 2018 и 2019 годах, и ранее проверка на допустимое время до насыщения не проводилась, то на большинстве объектов электроэнергетики установлены обычные трансформаторы с классом точности 10P. Поэтому в работе рассматриваются именно они.

Отметим, что в реальном проекте для проверяемых ТТ был принят класс точности 10PR, а также большие номинальные предельные кратности и мощности для обеспечения правильного функционирования защиты в переходном режиме.

Необходимо сказать, что проектируемый автотрансформатор представляет собой группу из трёх однофазных. Поэтому трансформаторы тока ТТ-1-10 АТ-1 располагаются «внутри треугольника» обмотки стороны НН.

Таблица 3.3 – Проверка ТТ

Наименование ТТ на ПС 500 кВ Нижнеангарская	Класс точности обмотки	Сечение жил кабеля, $S_{\text{каб}}$ (мм ²)	Номинальное сопротивление нагрузки ТТ, $Z_{\text{ном}}$ (Ом)	Нагрузка на ТТ, обусловленная вторичной обмоткой, Z_2 (Ом)	Сопротивление терминала, $R_{\text{уст}}$ (Ом)	Сопротивление жилы кабеля, $R_{\text{каб}}$ (Ом)	Расчетная предельная кратность, Красч	Допустимая предельная кратность, Кдоп	Расчетная нагрузка на ТТ, $Z_{\text{нагр.расч.}}$ (Ом)	Допустимая нагрузка на ТТ, $Z_{\text{нагр.доп.}}$ (Ом)	Наибольшее напряжение на нагрузке, $U_{\text{макс}}$ (В)	$Z_{\text{нагр.расч.}} < Z_{\text{нагр.доп.}}$	Красч < Кдоп	$U_{\text{макс}} < 1410$
ТТ-1-10 АТ-1	10Р	6	1,2	1,52	0,12	1,167	10,72	10,96	1,46	1,53	220,73	Да	Да	Да
ТТ-2-10 АТ-1	10Р	2,5	15,0	0,26	0,50	2,625	22,92	84,41	3,18	12,39	205,80	Да	Да	Да

4 МОДЕЛЬ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

4.1 Общие сведения

Сложность создания ИНС заключается в следующем. Имеется большое количество параметров, влияющих на результат работы сети: тип и количество слоёв, количество нейронов в каждом слое, функции активации в каждом слое, функция потерь, способ оптимизации весов, количество эпох обучения, размер мини-выборок, на которых обучается сеть и т.д. Различные комбинации этих параметров могут давать разные результаты. Очевидно, что таких комбинаций может быть очень много. При этом сказать заранее, что та или иная модель будет лучше или хуже, чрезвычайно сложно. Поэтому не существует готового решения какой-то новой задачи и подбор оптимальных параметров во многих случаях, по сути, осуществляется эмпирическим путём [48]. Использование библиотек для автоматического подбора гиперпараметров ИНС (например, Keras Tuner) в работе не рассматривается.

За время существования науки о машинном обучении накопились некоторые сведения, упрощающие создание ИНС. К примеру, для решения задач классификации наиболее успешно применяются модели, использующие свёрточные слои. При работе с временными рядами лучшие результаты показывают рекуррентные ИНС [49].

Не меньшую сложность представляет собой получение и обработка данных для обучения. Обучающая выборка должна быть как можно более репрезентативной. В контексте устройства РЗА это означает, что обучающий набор данных должен содержать осциллограммы тока во всех возможных режимах работы защищаемого оборудования. Таких режимов достаточно много: внутренние и внешние КЗ различных видов, переход внешнего КЗ во внутреннее, асинхронный ход, переход асинхронного хода во внутреннее КЗ, режим БТН, режим перевозбуждения, аварийные режимы с учётом токов нагрузки и т. д.

Важно иметь в виду, что при слишком сложной ИНС цифровое устройство РЗА может работать с задержкой. Поэтому, помимо точности восстановления тока, к разработанной ИНС предъявляются требования в части скорости работы.

4.2 Моделирование внешних КЗ

Прежде всего, используя модели, описанные в предыдущей главе, необходимо получить осциллограммы вторичных токов, а также первичных токов, приведённых к числу витков вторичной обмотки.

В данной работе рассматривается работа ИНС только при внешних трёхфазных КЗ, при этом принимаются следующие допущения:

- 1) Рассчитываются только металлические КЗ (переходное сопротивление равно 0);
- 2) Величина нагрузки на ТТ постоянная;
- 3) В момент КЗ индукция в сердечниках трёх фаз одинаковая;
- 4) Схемно-режимные параметры остаются одинаковыми.

Время моделирования – 0,3 с (что соответствует трём постоянным времени). Частота дискретизации – 1200 Гц. В каждый момент КЗ остаточная индукция в сердечнике ТТ может принимать одно из десяти значений, находящееся в интервале от -1,48 Тл до 1,48 Тл (что соответствует 86% от индукции насыщения 1,72 Тл). Всего моментов КЗ десять, каждый момент находится в интервале от 0,02 с до 0,039 с. Таким образом, в результате моделирования для каждой фазы получается $10 \cdot 10 = 100$ осциллограмм первичного и вторичного токов. Пример таких осциллограмм приведён на рисунке 4.1.

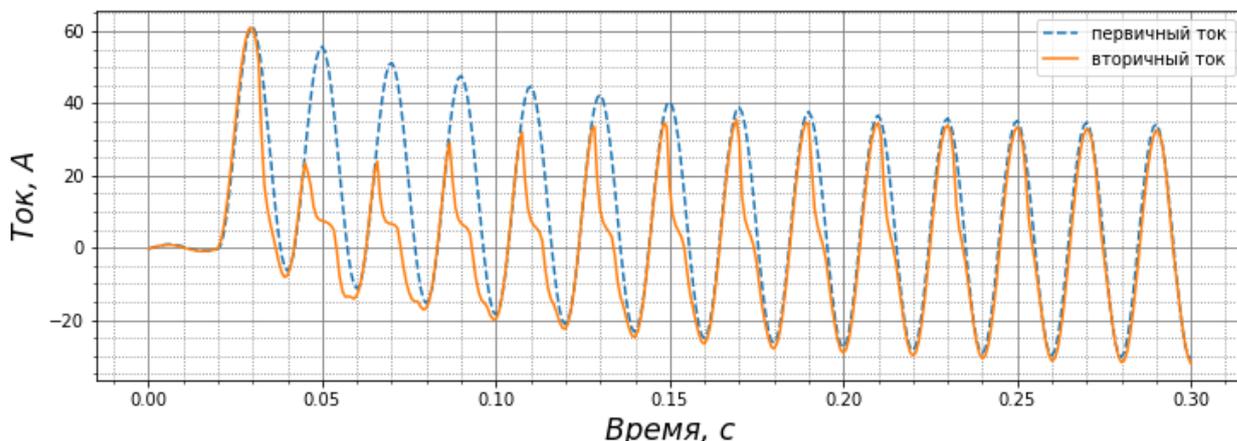


Рисунок 4.1 – Первичный и вторичный ток фазы А

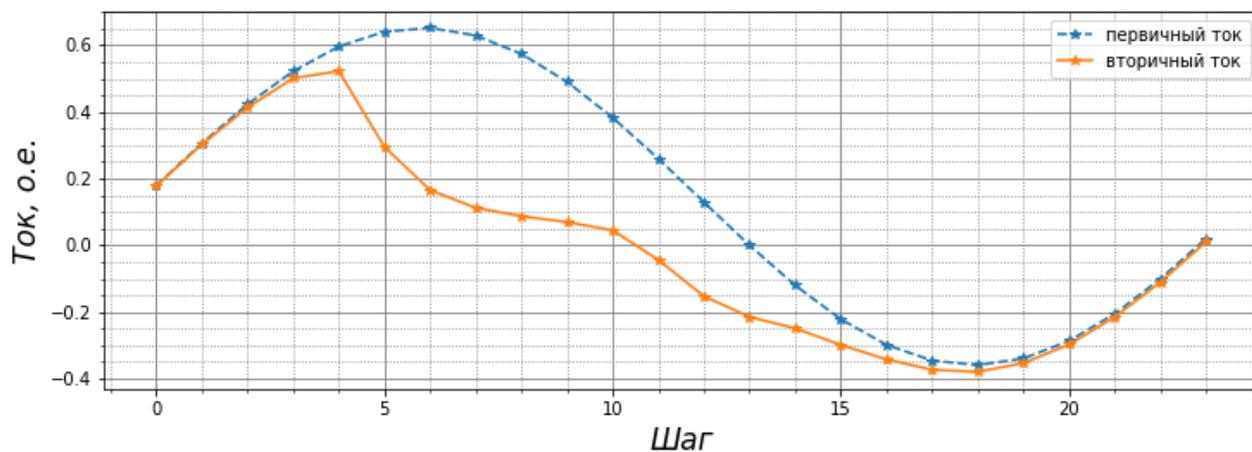
4.3 Подготовка данных для обучения ИНС

При обучении на вход ИНС данные должны подаваться в том виде, в котором они будут поступать и в реальной работе. Примем, что все дальнейшие разработанные модели получают на свой вход мгновенные значения токов за предыдущий период, что при частоте дискретизации 1200 Гц соответствует 24 выборкам.

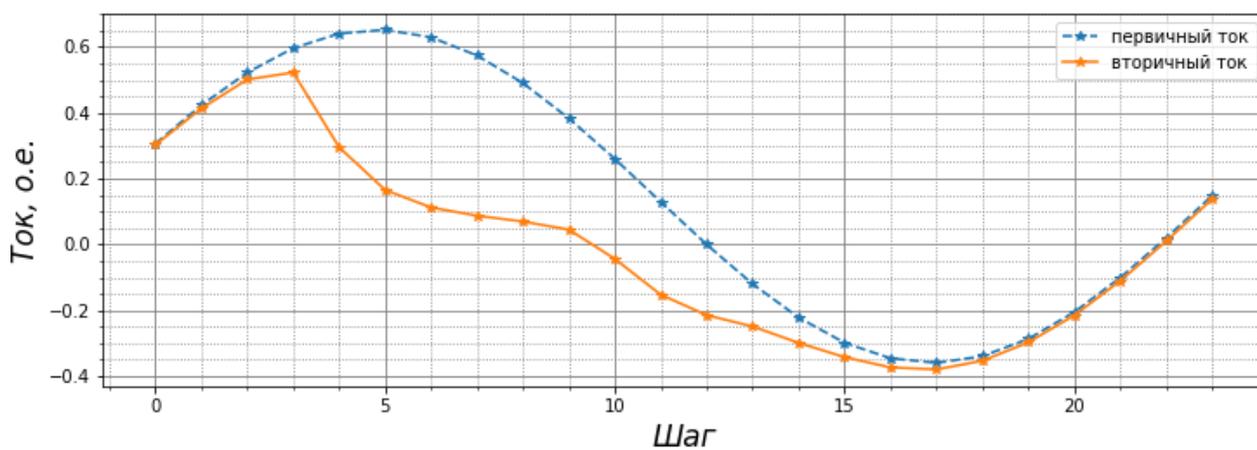
Подготовка обучающих данных осуществляется следующим образом. Берётся первая осциллограмма вторичного тока и соответствующая ей осциллограмма первичного тока. Из этих осциллограмм выделяется один период (рисунок 4.2,а), что и будет первым сэмплом (примером) в обучающем наборе. Затем берётся следующий сэмпл, сдвинутый по оси времени вправо на одну выборку (рисунок 4.2,б). Таким образом «проходится» вся осциллограмма вторичного (первичного) тока, после чего осуществляется переход к

следующей осциллограмме. Для обучения ИНС используются осциллограммы вторичного тока, полученные с ТТ-2-10 АТ-1.

Из одной осциллограммы тока получается 338 сэмплов. Поэтому весь обучающий набор состоит из $338 \cdot 100 = 33800$ сэмплов.



а)



б)

Рисунок 4.2 – Пример формирования обучающей выборки

Также необходимо сказать, что ИНС обучаются намного лучше на стандартизированных наборах данных (когда все значения попадают в диапазон от -1 до 1 или от 0 до 1). В задаче восстановления имеет смысл использовать стандартизацию ещё и по той причине, что абсолютное значение вторичного тока в зависимости от величины тока КЗ и коэффициента трансформации ТТ для разных объектов может быть неодинаковым. При этом характер переходного процесса в первичной сети и ТТ остаётся неизменным. Таким образом, модель, обученная на стандартизированных данных, может использоваться для восстановления тока и на других объектах.

Для стандартизации данных разделим полученные значения мгновенных токов на удвоенное мгновенное значение тока КЗ в установившемся режиме, поделённое на коэффициент трансформации ТТ-2-10 АТ-1:

$$\frac{2 \cdot \sqrt{2} \cdot 13750}{600} = 65 \text{ A}$$

Отметим, что во время обучения обновление весовых коэффициентов происходит не после рассмотрения каждого сэмпла, а после рассмотрения всех сэмплов в батче (мини-выборке). В этом случае меньше вероятность попадания в локальный минимум функции ошибки, время обучения также существенно уменьшается. Размер одного батча определяется при создании модели.

Необходимо следить за тем, чтобы ИНС хорошо работала с данными, не используемыми для обучения. Иначе возможно переобучение – ситуация, когда сеть хорошо работает с данными, которые она раньше видела, но плохо работает с данными, которые она видит впервые. Для этой цели из обучающего набора выделяется проверочный набор данных (20 % от обучающего). Во время обучения сэмплы из проверочного набора не поступают на вход ИНС. Данные из проверочного набора поступают на вход ИНС только после прохождения каждой эпохи обучения. Критерием переобучения является тот факт, что ошибка модели на обучающем наборе данных продолжает уменьшаться, а ошибка на проверочном наборе не изменяется.

Чтобы ИНС обучалась распознавать признаки данных, а не признаки выборки, батчи перемешиваются случайным образом.

4.4 Разработка ИНС

4.4.1 Восстановление фрагментами на основе полносвязных слоёв

В результате работы создаваемой модели искажённый ток за предыдущий период должен быть преобразован как можно ближе к соответствующему первичному току (рисунок 4.2). Рассмотрим модели на основе полносвязных слоёв.

Модель №1

Параметры модели №1 приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Параметры модели №1

Параметр	1 слой	2 слой	3 слой
Тип слоя	Dense	Dense	Dense
Количество нейронов	100	48	24

Параметр	1 слой	2 слой	3 слой
Функция активации	-	sigmoid	-
Функция потерь	mse		
Оптимизатор	adam		
Размер мини-выборки	100		
Количество эпох	10		

Количество нейронов в выходном слое должно совпадать с количеством точек за один период. В нашем случае это 24 нейрона.

Так как размер батча составляет 100 сэмплов, а 20 % сэмплов используется для проверочного набора данных, то количество обновлений весов равно:

$$\frac{33800 \cdot (1 - 0,2)}{100} = 270$$

Время обучения составило 10 секунд.

Поскольку на осциллограммах мгновенные значения тока могут принимать отрицательные значения, то использование в качестве функции потерь средней абсолютной ошибки в процентах (MAPE) может ввести в заблуждение при интерпретации результатов обучения. Поэтому используется средняя квадратическая ошибка (MSE):

$$MSE = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N (y_1 - y_2)^2, \quad (4.1)$$

где y_1 – фактическое значение; y_2 – прогноз модели; N – количество выборок.

Изменение MSE для модели №1 на каждой эпохе обучения приведено на рисунке 4.3.

Из рисунка 4.3 следует, что переобучение ещё не наступило, так как ошибка на проверочном и обучающем наборах данных продолжают уменьшаться.

Примеры восстановления вторичного тока из обучающей выборки с помощью модели №1 приведены на рисунке 4.4.

Из рисунка 4.4 видно, что данная модель довольно точно восстанавливает ток в установившемся режиме КЗ. Однако в этом режиме погрешность ТТ и так не должна превышать 10%. В переходном режиме, когда ТТ насыщается, модель несколько улучшает

ситуацию в моменты срыва вторичного тока, делая его больше. В доаварийном режиме данная модель некорректно восстанавливает ток.

Такая ошибка как MSE несёт в себе мало информации, поскольку все ошибки возводятся в квадрат. Из-за этого большие ошибки становятся ещё больше, а малые ошибки уменьшаются.

При оценке погрешности ТТ в релейной защите используют формулу (2.3). Оценим погрешность ТТ без восстановления и с восстановлением по формуле (2.3) для случаев, приведённых на рисунке 4.4 (рисунок 4.5).

Рисунок 4.5 подтверждает тезисы, сделанные выше. В доаварийном режиме модель плохо восстанавливает ток (но это и не требуется). Во время переходного процесса, когда ТТ насыщается, погрешность с восстановлением тока меньше, чем без него. В установившемся режиме КЗ при работе модели погрешность ТТ находится на уровне 10 %.

Предполагается, что разработанная модель используется для предотвращения излишнего срабатывания защиты вследствие насыщения ТТ. Наибольшая опасность такого срабатывания возникает в начале ПП. Поэтому логично, что оценивать качество работы модели надо на интервале времени, где ТТ глубоко насыщается. Примем за такой интервал промежуток времени от начала КЗ t_0 до $t_0 + 0,1$ с.

Средняя погрешность вторичного тока на интервале времени от t_0 до $t_0 + 0,1$ с по всем осциллограммам без восстановления составляет 55,63 %, а с восстановлением – 25,11 %.

На рисунке 4.6 приведён случай, когда погрешность восстановленного тока составляет 71,5 % (наихудший результат модели), а погрешность ТТ около 90 %.

Время восстановления одного периода искажённого тока составляет около 0,04 с, что является недопустимым значением для быстродействующей защиты. Если учесть, что модель начинает восстанавливать ток только спустя период после начала КЗ, то наименьшая задержка в срабатывании составляет целых 0,06 секунд. Необходимо сказать, что язык программирования Python, на котором создаются все модели ИНС в данной работе, не является оптимальным с точки зрения быстродействия выполнения программы. Реальные алгоритмы, реализованные в МП терминалах, выполняются при помощи языка С.

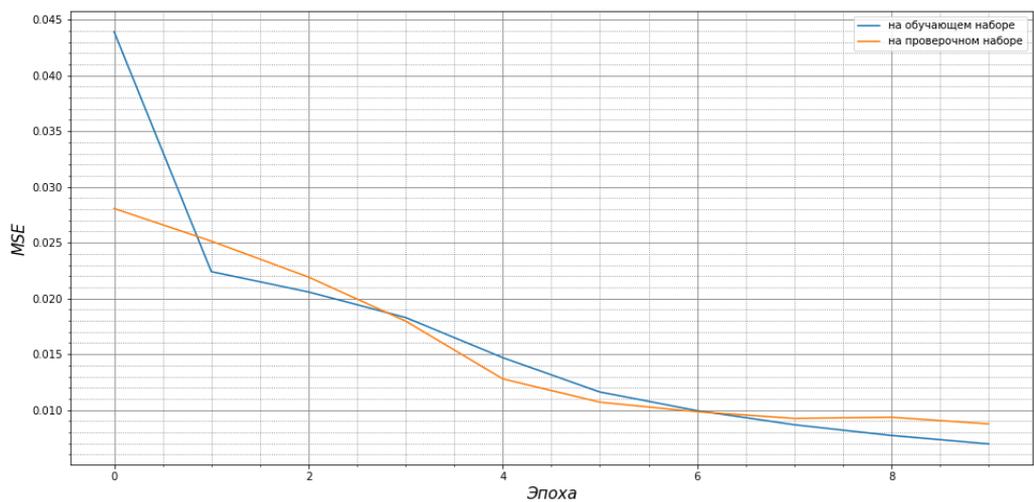
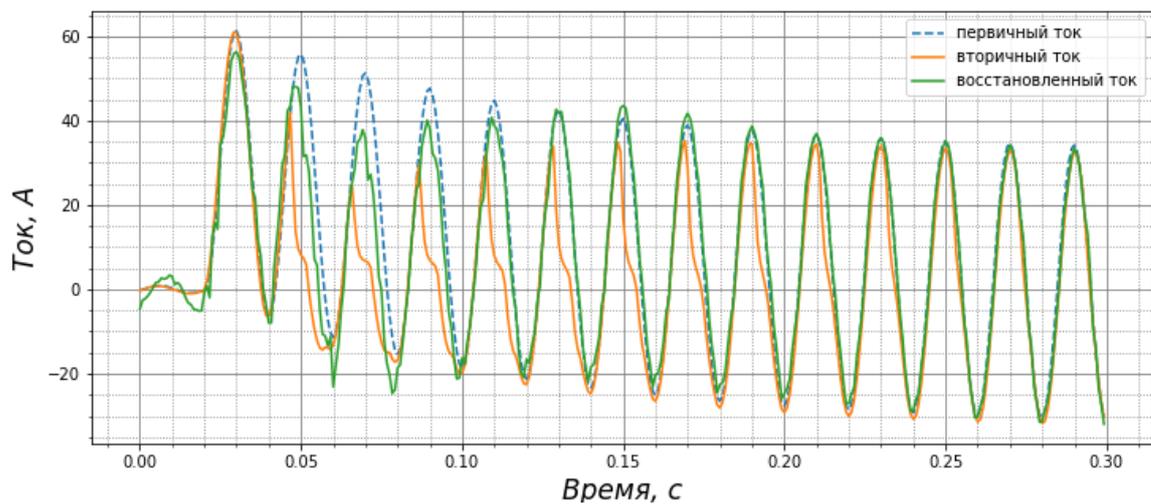
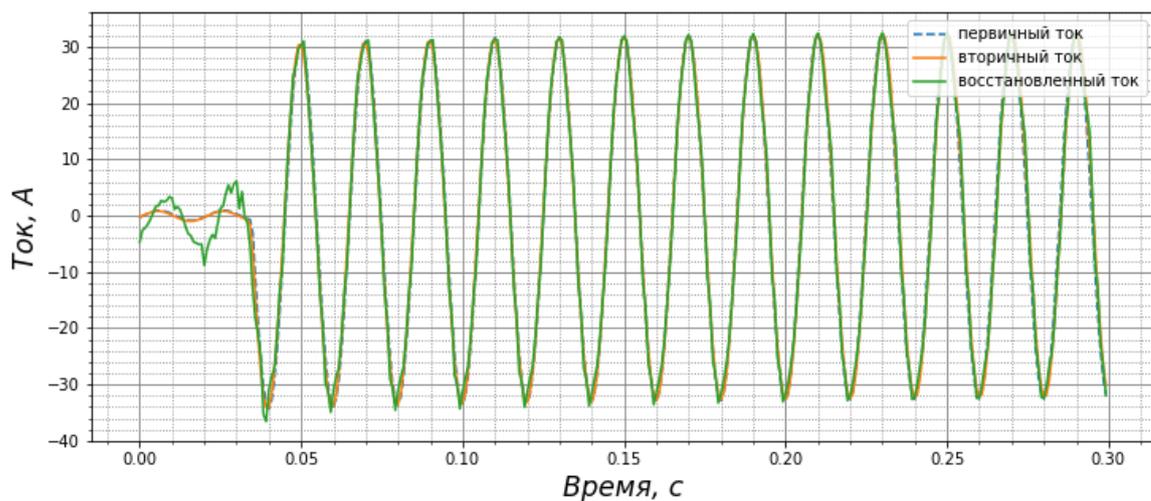


Рисунок 4.3 – Изменение MSE для модели №1

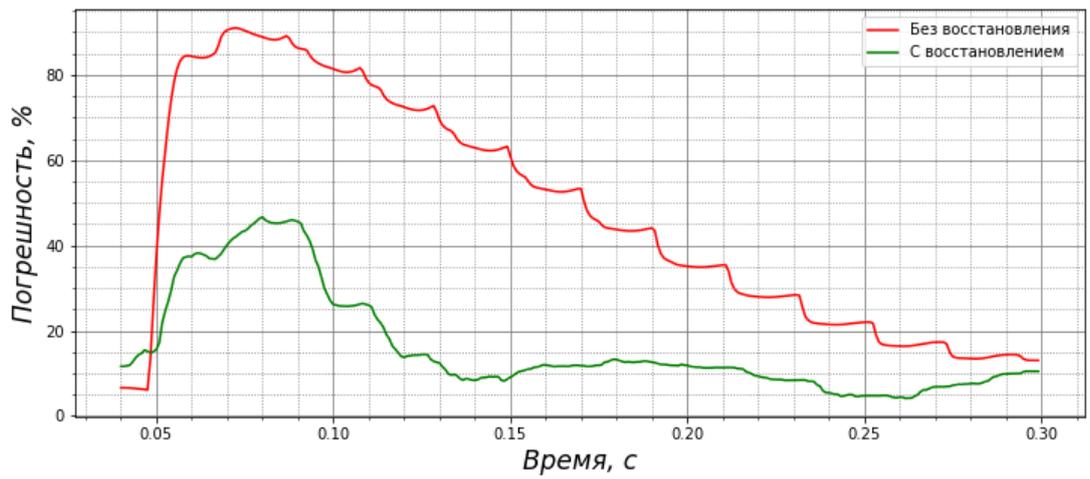


а)

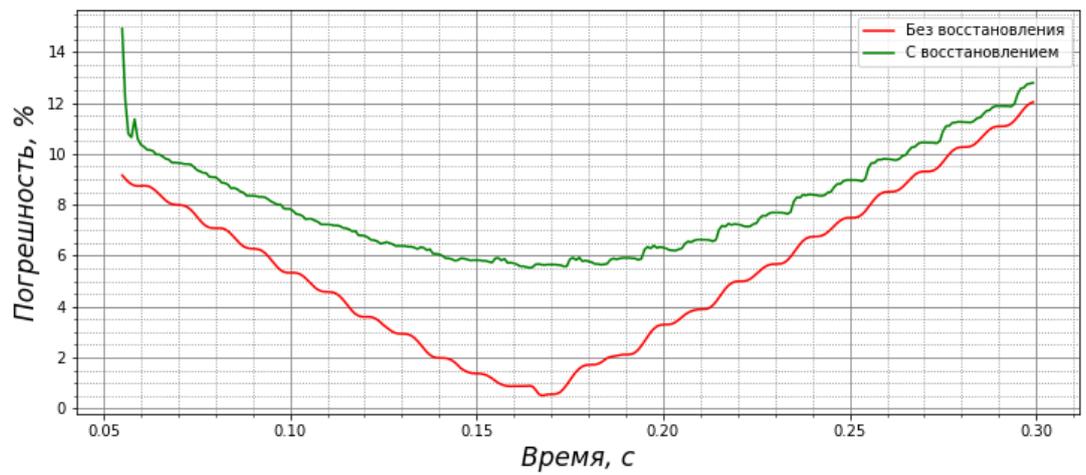


б)

Рисунок 4.4 – Примеры восстановления тока с помощью модели №1



а)



б)

Рисунок 4.5 – Оценка погрешности ТТ

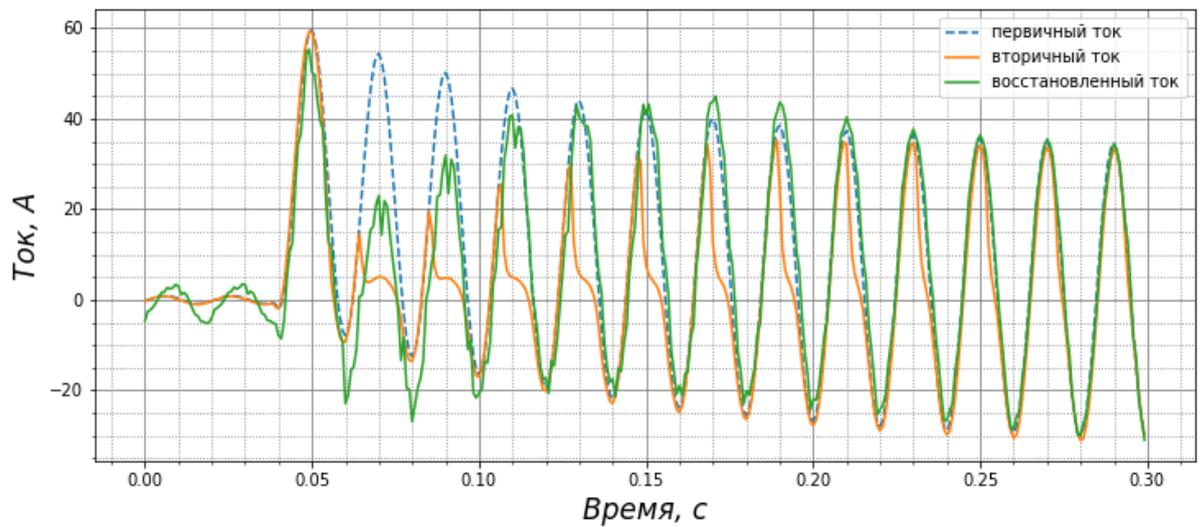


Рисунок 4.6 – Осциллограмма, соответствующая наихудшему восстановлению вторичного тока для модели №1

Модель №2

Параметры модели №2 приведены в таблице 4.2. Изменения по сравнению с предыдущей моделью выделены курсивом.

Таблица 4.2 – Параметры модели №2

Параметр	1 слой	2 слой	3 слой
Тип слоя	Dense	Dense	Dense
Количество нейронов	<i>200</i>	48	24
Функция активации	-	sigmoid	-
Функция потерь	mse		
Оптимизатор	adam		
Размер мини-выборки	<i>50</i>		
Количество эпох	<i>50</i>		

Время обучения составило 50 секунд. Изменение MSE на каждой эпохе обучения приведено на рисунке 4.7.

Из рисунка 4.7 следует, что переобучение наступило примерно на 30-й эпохе, когда ошибка на проверочном и обучающем наборе данных практически перестала уменьшаться.

Примеры восстановления вторичного тока из обучающей выборки с помощью модели №2 приведены на рисунке 4.8.

Оценим погрешность ТТ без восстановления и с восстановлением по формуле (2.3) для случая, приведённого на рисунке 4.8,а (рисунок 4.9).

Средняя погрешность вторичного тока на интервале времени от t_0 до $t_0 + 0,1$ с по всем осциллограммам с восстановлением составляет 12,13 %, что почти в два раза меньше, чем для модели №1.

На рисунке 4.10 приведён случай, когда погрешность восстановленного тока составляет 59,2 % (наихудший результат модели), а погрешность ТТ около 90 %.

Время работы модели составляет 0,04 с.

Исходя из рисунков 4.8, 4.9, 4.10 и средней погрешности ТТ очевидно, что качество восстановления тока у модели №2 лучше. Точность работы ИНС возможно улучшать и дальше, подбирая другие гиперпараметры.

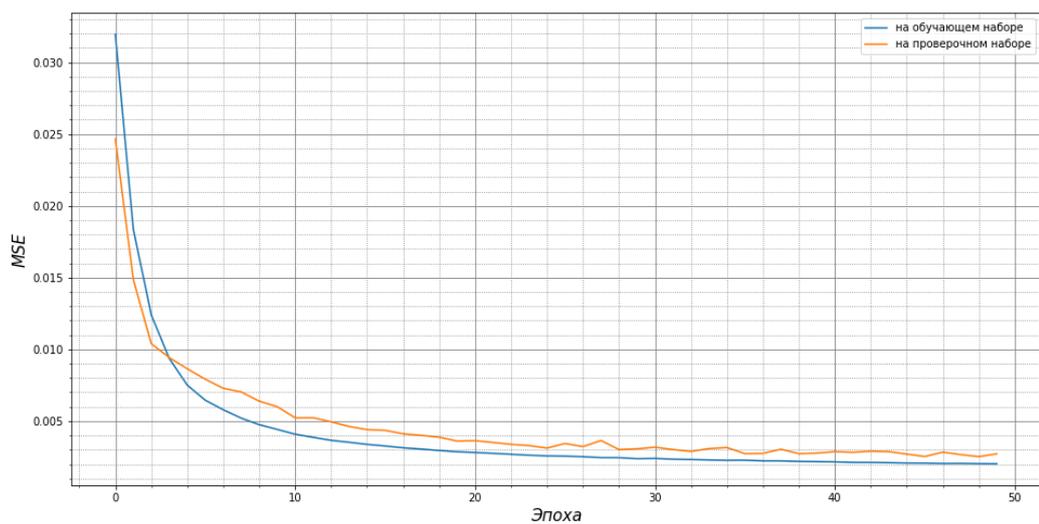
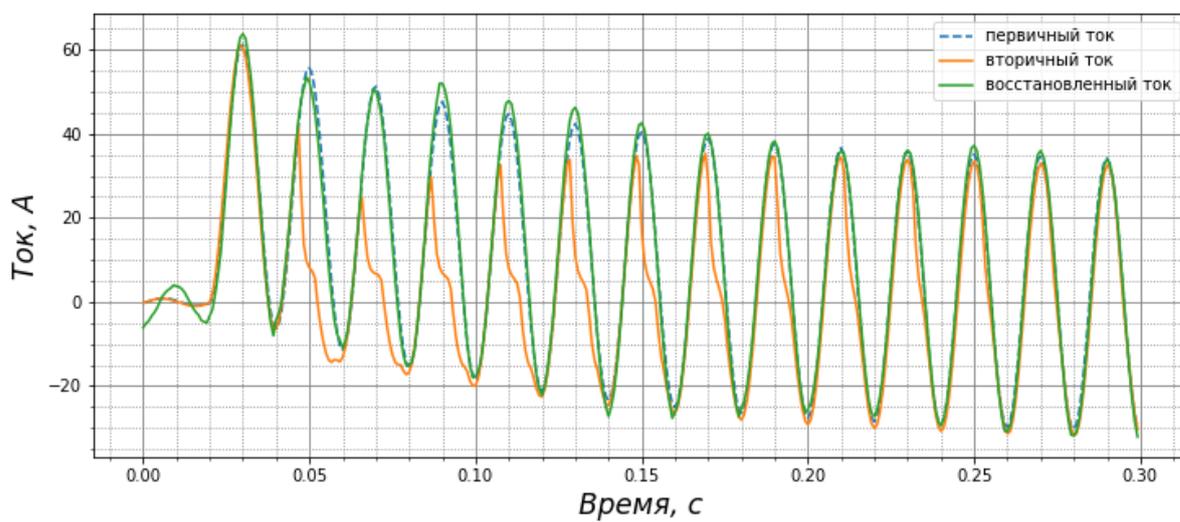
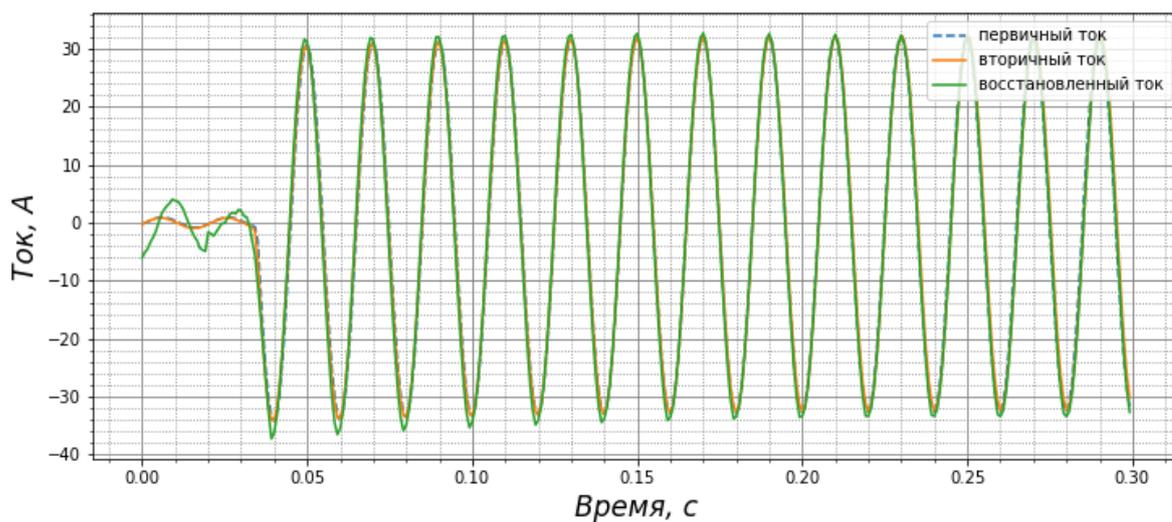


Рисунок 4.7 – Изменение MSE для модели №2



а)



б)

Рисунок 4.8 – Примеры восстановления тока с помощью модели №2

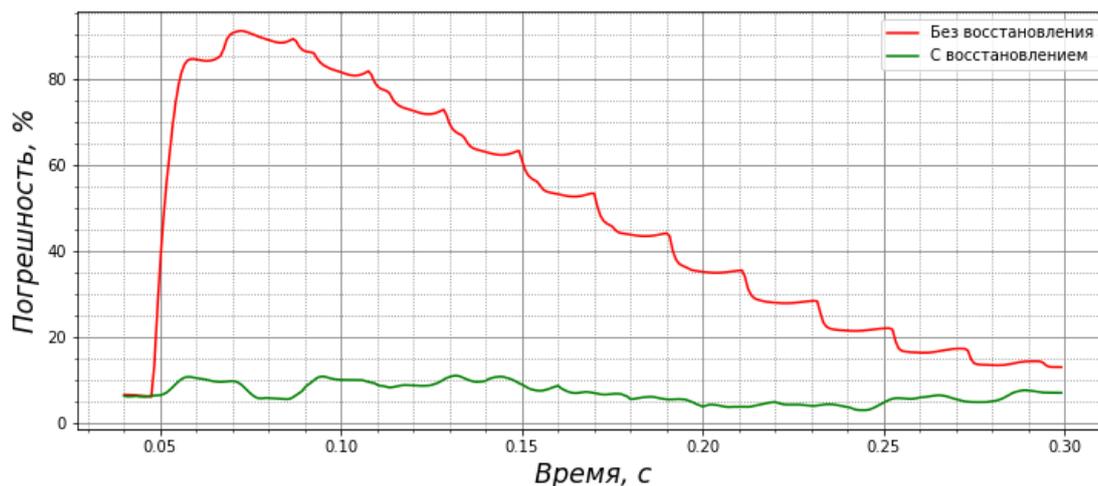


Рисунок 4.9 – Оценка погрешности ТТ

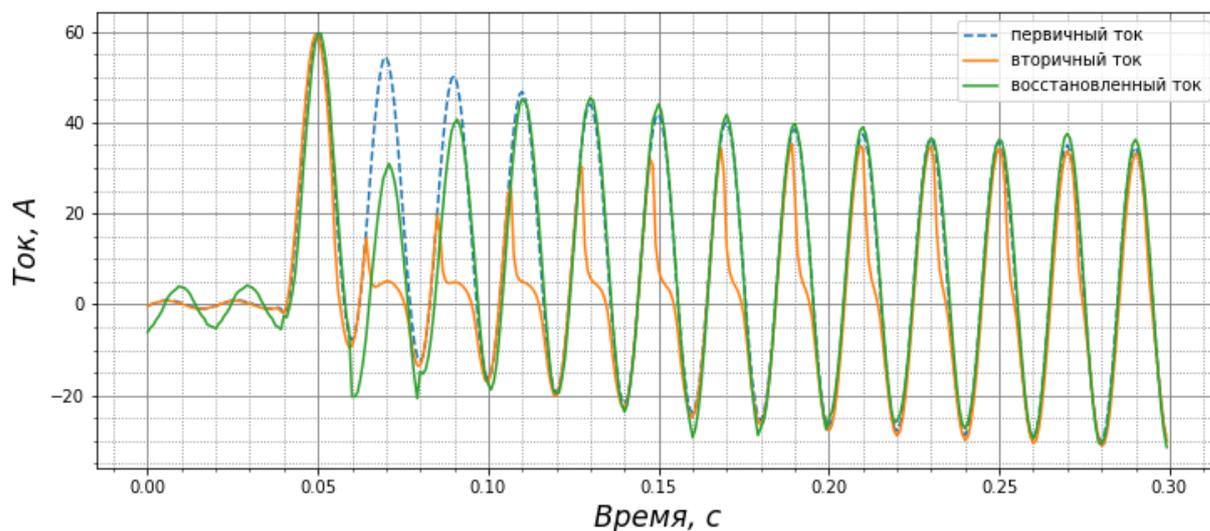


Рисунок 4.10 – Осциллограмма, соответствующая наихудшему восстановлению вторичного тока для модели №2

4.4.2 Восстановление фрагментами на основе рекуррентных слоёв

Теперь рассмотрим ИНС, разработанные на основе рекуррентных слоёв. Восстановление также осуществляется интервалами по 0,02 секунды.

Модель №3

Параметры модели №3 приведены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Параметры модели №3

Параметр	1 слой	2 слой
Тип слоя	LSTM	Dense
Количество нейронов	48	24

Параметр	1 слой	2 слой
Функция активации	tanh	-
Функция потерь	mse	
Оптимизатор	Adam	
Коэффициент скорости обучения	0,005	
Размер мини-выборки	100	
Количество эпох	40	

Поскольку для рекуррентных нейронных сетей особенно остро стоит вопрос о переобучении, то вводится коэффициент скорости обучения 0,005. Данный коэффициент на каждом этапе обновления весов уменьшает величину, на которую изменяются веса. Тем самым обучение происходит более медленно, а вероятность попасть в локальный минимум функции ошибки становится меньше.

Время обучения составило 73 секунды. Изменение MSE на каждой эпохе обучения приведено на рисунке 4.11.

Как следует из рисунка 4.11, ошибка на проверочном наборе данных довольно сильно перестала снижаться на 19-й эпохе. Тем не менее, имеет смысл проверить данную модель более детально.

Примеры восстановления вторичного тока из обучающей выборки с помощью модели №3 приведены на рисунке 4.12.

Оценим погрешность ТТ без восстановления и с восстановлением по формуле (2.3) для случая, приведённого на рисунке 4.12,а (рисунок 4.13).

Средняя погрешность вторичного тока на интервале времени от t_0 до $t_0 + 0,1$ с по всем осциллограммам с восстановлением составляет 5 %, что почти в 2,5 раза меньше, чем для модели №2. Время работы модели составляет 0,04 с.

На рисунке 4.14 приведён случай, когда погрешность восстановленного тока составляет 32,7% (наихудший результат модели), а погрешность ТТ около 90 %.

Исходя из рисунков 4.12, 4.13, 4.14 и средней погрешности ТТ очевидно, что качество восстановления тока у модели №3 лучше, чем у модели №2. Особенно выделяется случай, соответствующий наихудшему восстановлению вторичного тока (рисунки 4.10, 4.14), где разница между погрешностями достигает 26,5 %.

Тут важно сказать, что при создании и обучении модели имеется элемент неопределённости. Он связан с тем, что:

1. При инициализации ИНС первоначальные весовые коэффициенты задаются случайным образом.

2. Сэмплы, попадающие в проверочный набор, также выбираются случайным образом.

К примеру, рисунки 4.8,а и 4.12,а. Вероятно, что сэмплы, соответствующие кривым на этих рисунках, попали в тренировочный набор данных (т.е. ИНС видит эти данные при обучении на каждой эпохе). Поэтому результаты восстановления тока на этих кривых для модели №2 и модели №3 очень хорошие. Напротив, возможно, что сэмплы, соответствующие кривым на рисунках 4.10 и 4.14, попали в проверочный набор данных (т.е. ИНС не видит эти данные при обучении вообще). Поэтому и результаты восстановления для таких кривых получаются хуже.

Для «уравнивания шансов» каждой модели при их создании фиксируется псевдогенератор случайных чисел.

Ещё одна возможная причина, по которой восстановление одних кривых более удачно, а других менее – это неодинаковое их соотношение в тренировочном наборе данных. Если кривых, на которых вторичный ток имеет форму как на рисунках 4.8,а и 4.12,а, больше, чем кривых, где вторичный ток имеет форму как на рисунках 4.10, 4.14, то и ИНС будет лучше обучена восстанавливать кривые тока именно из первой группы.

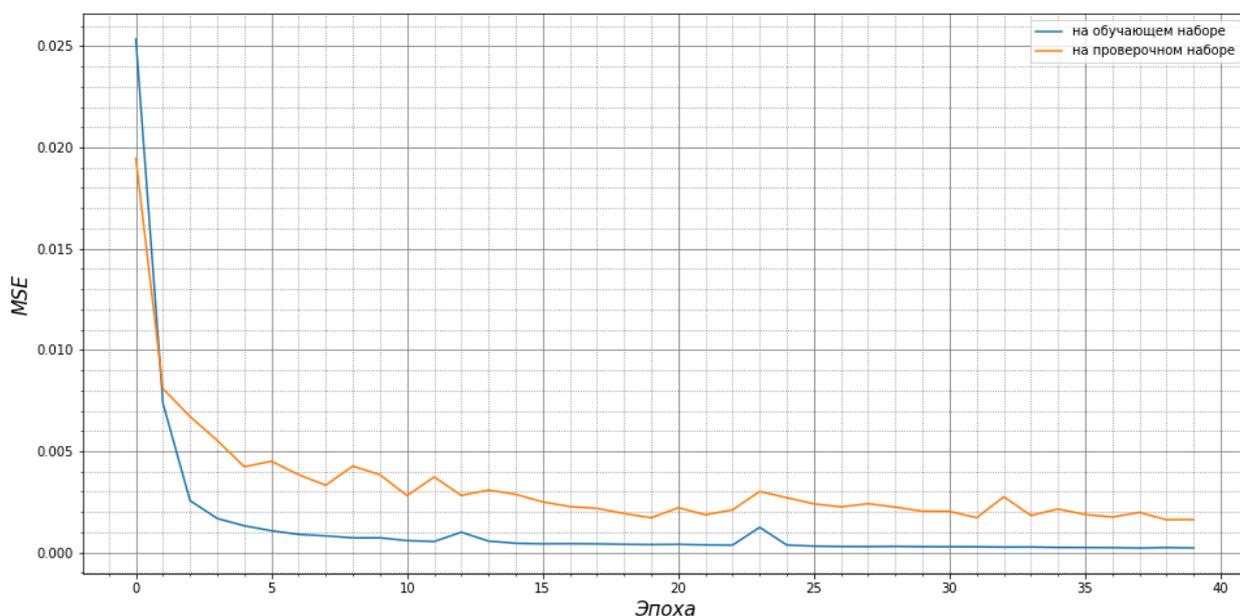
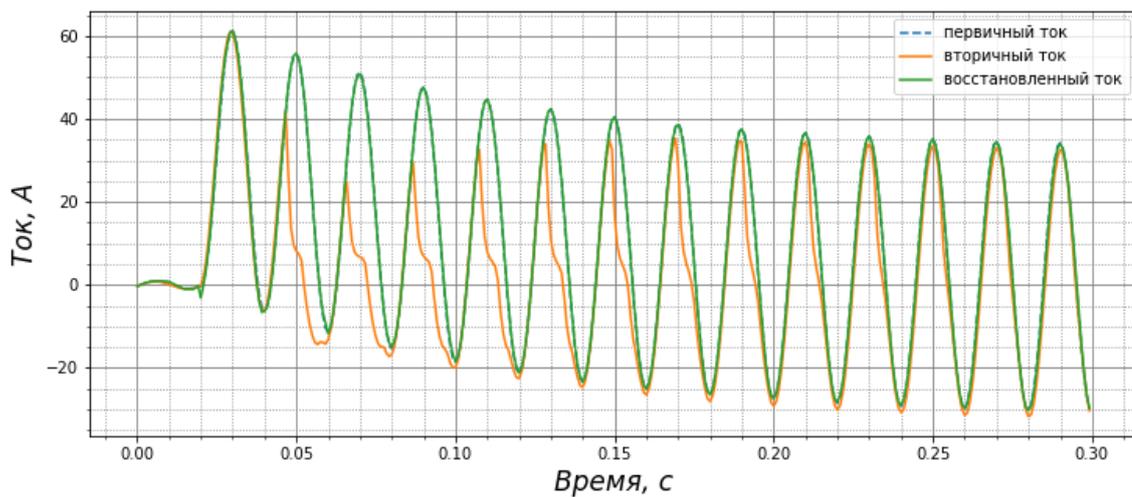
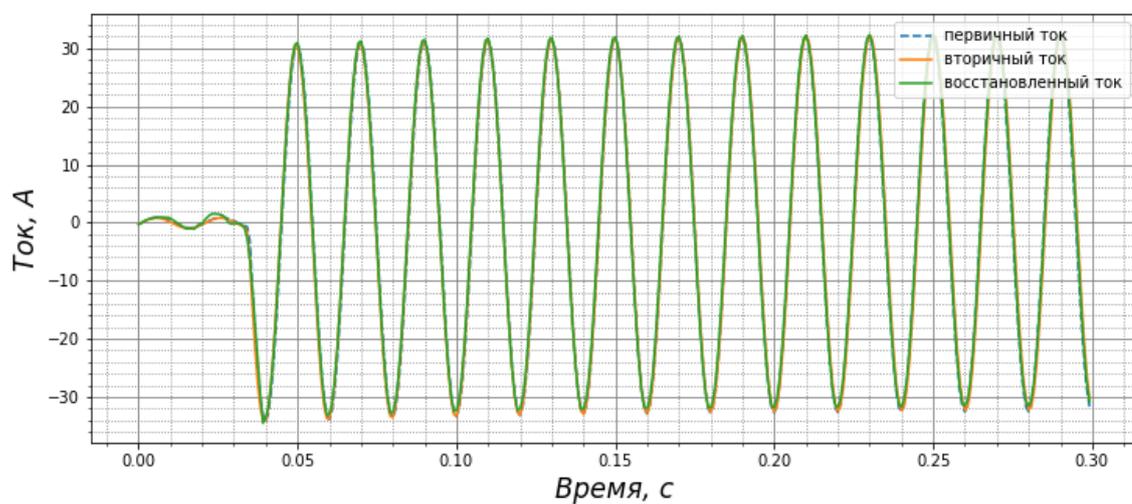


Рисунок 4.11 – Изменение MSE для модели №3



а)



б)

Рисунок 4.12 – Примеры восстановления тока с помощью модели №3

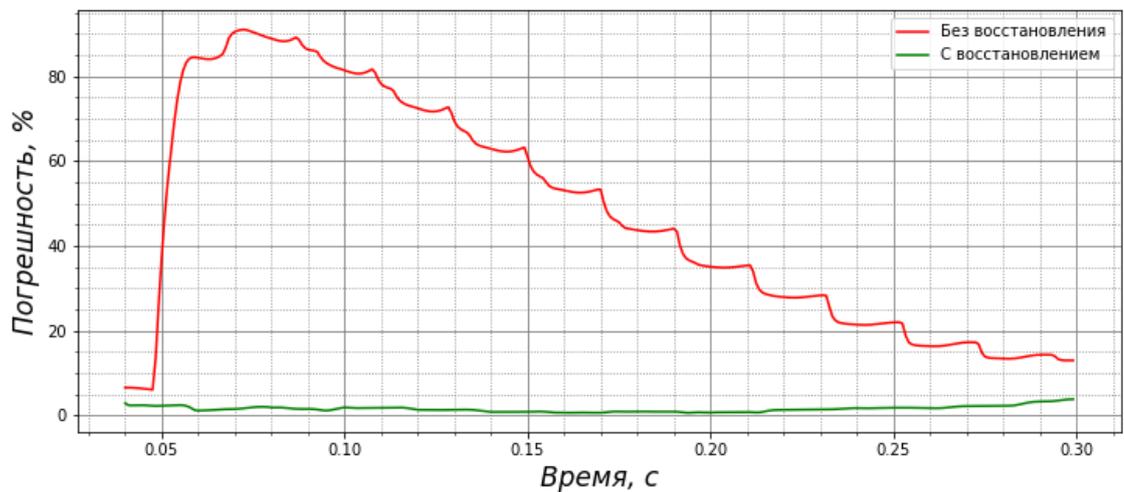


Рисунок 4.13 – Оценка погрешности ТТ

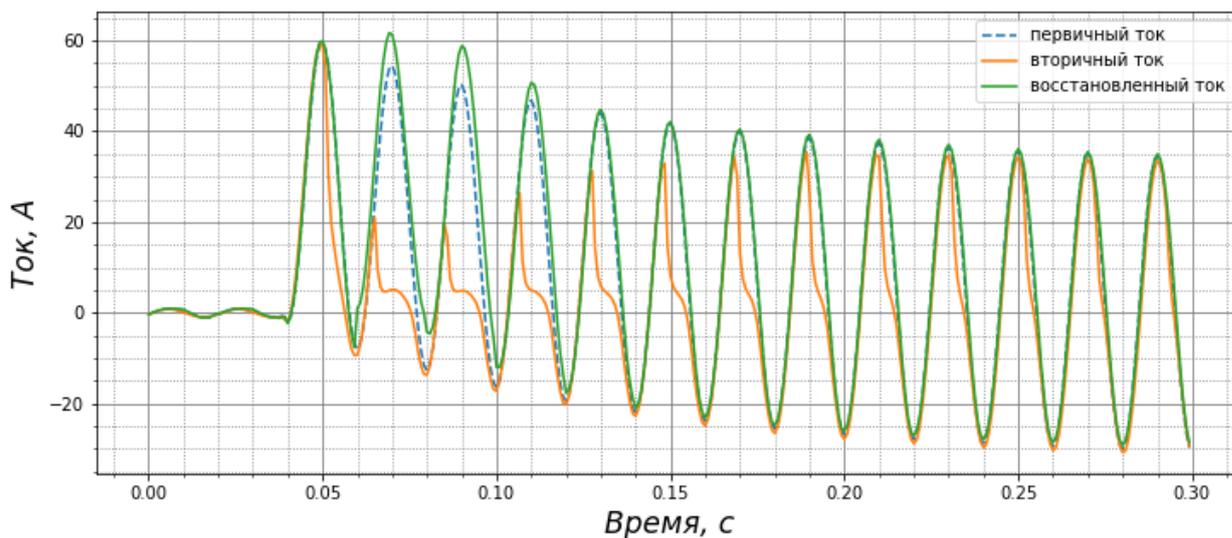


Рисунок 4.14 – Осциллограмма, соответствующая наихудшему восстановлению вторичного тока для модели №3.

Модель №4

Параметры модели №4 приведены в таблице 4.4.

Основное отличие модели №4 от модели №3 заключается в том, что в качестве функции потерь используется средняя абсолютная ошибка (MAE):

$$MAE = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N |y_1 - y_2|, \quad (4.2)$$

где y_1 – фактическое значение; y_2 – прогноз модели; N – количество выборок.

Время обучения составило 45 секунд. Изменение MAE на каждой эпохе обучения приведено на рисунке 4.15.

Таблица 4.4 – Параметры модели №4

Параметр	1 слой	2 слой
Тип слоя	LSTM	Dense
Количество нейронов	48	24
Функция активации	tanh	-
Функция потерь	mae	
Оптимизатор	Adam	
Коэффициент скорости обучения	0,01	
Размер мини-выборки	100	
Количество эпох	43	

Как следует из рисунка 4.15, ошибка на проверочном и тестовом наборах данных продолжает уменьшаться, а значит возможно улучшение качества работы сети подбором лучших гиперпараметров.

Примеры восстановления вторичного тока из обучающей выборки с помощью модели №4 приведены на рисунке 4.16.

Оценим погрешность ТТ без восстановления и с восстановлением по формуле (2.3) для случая, приведённого на рисунке 4.16,а (рисунок 4.17).

Средняя погрешность вторичного тока на интервале времени от t_0 до $t_0 + 0,1$ с по всем осциллограммам с восстановлением составляет 3,62 %, что почти в 1,4 раза меньше, чем для модели №3. Время работы модели составляет 0,04 с.

На рисунке 4.18 приведён случай, когда погрешность восстановленного тока составляет 20,4% (наихудший результат модели), а погрешность ТТ около 90 %.

Исходя из рисунков 4.16, 4.17, 4.18 и средней погрешности ТТ очевидно, что качество восстановления тока у модели №4 лучше, чем у модели №3.

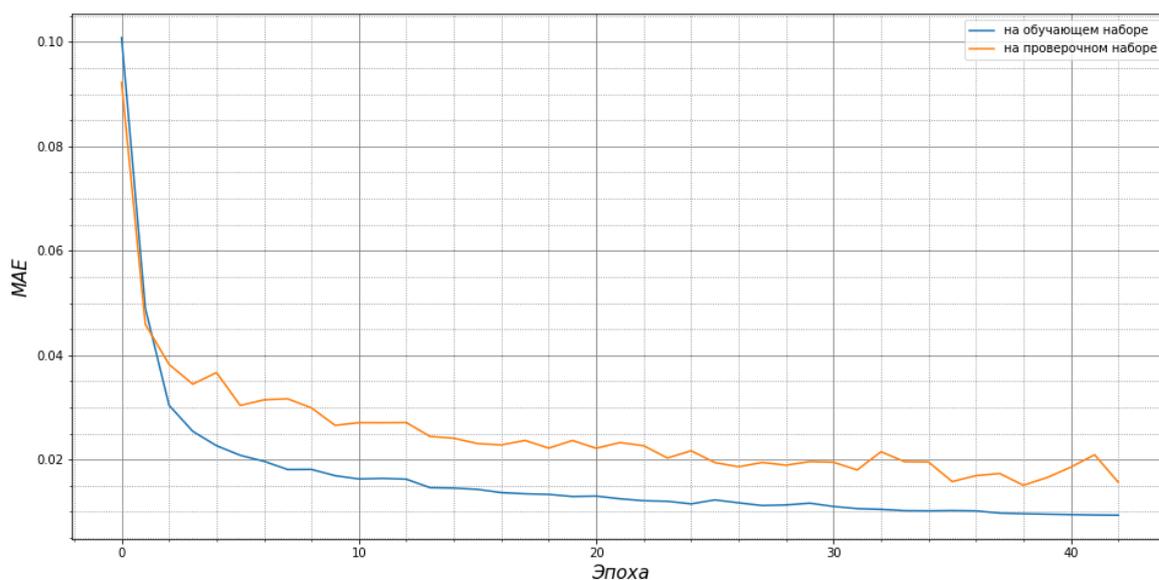
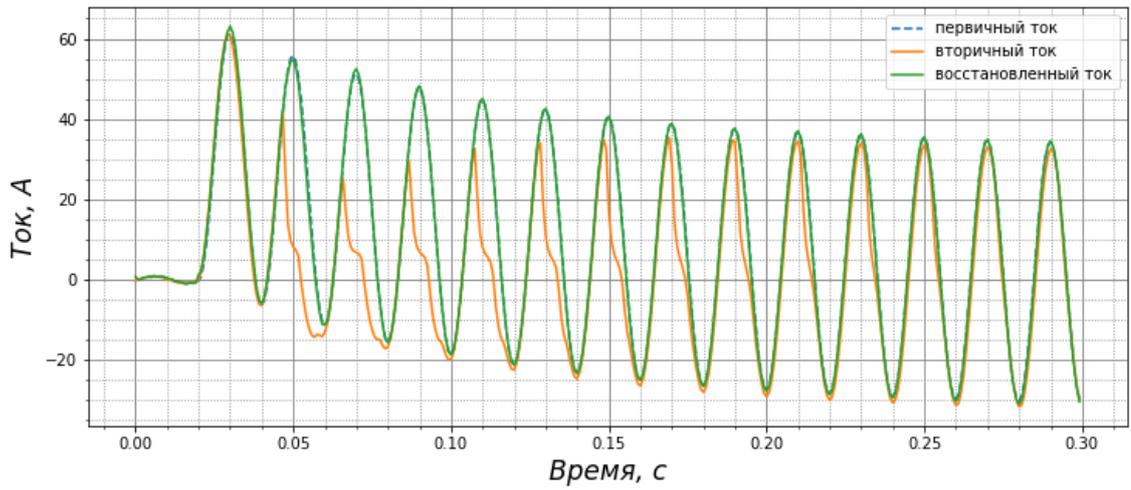
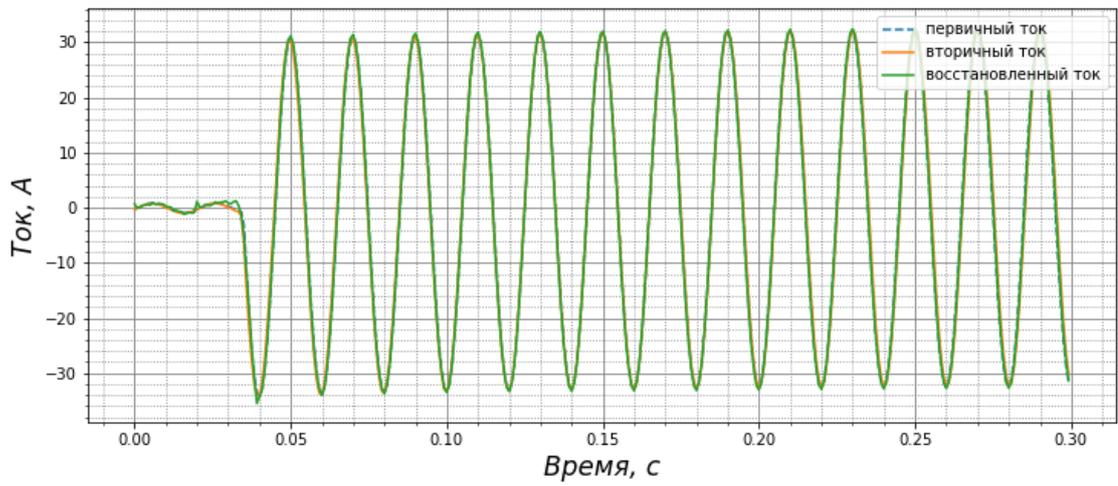


Рисунок 4.15 – Изменение MAE для модели №4



а)



б)

Рисунок 4.16 – Примеры восстановления тока с помощью модели №4

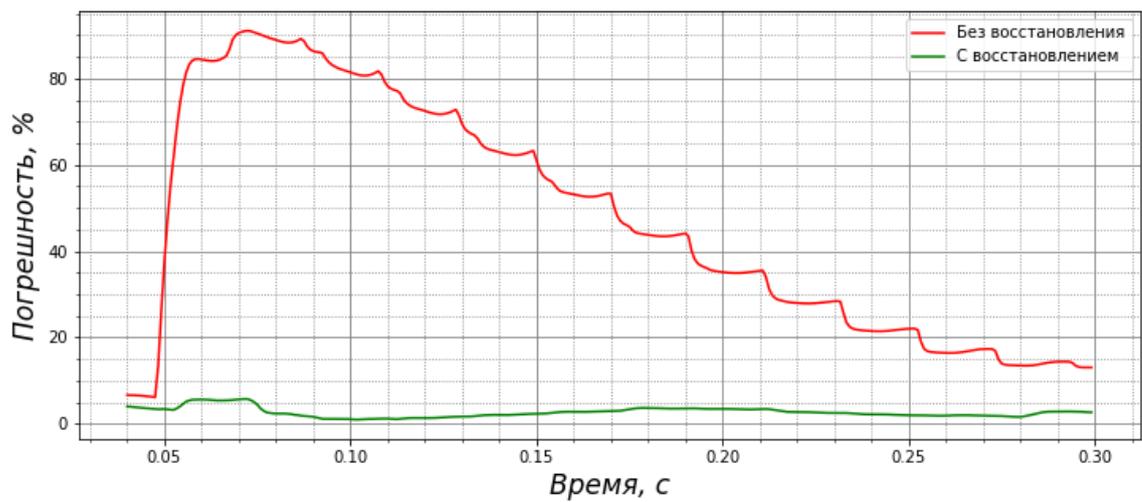


Рисунок 4.17 – Оценка погрешности ТТ

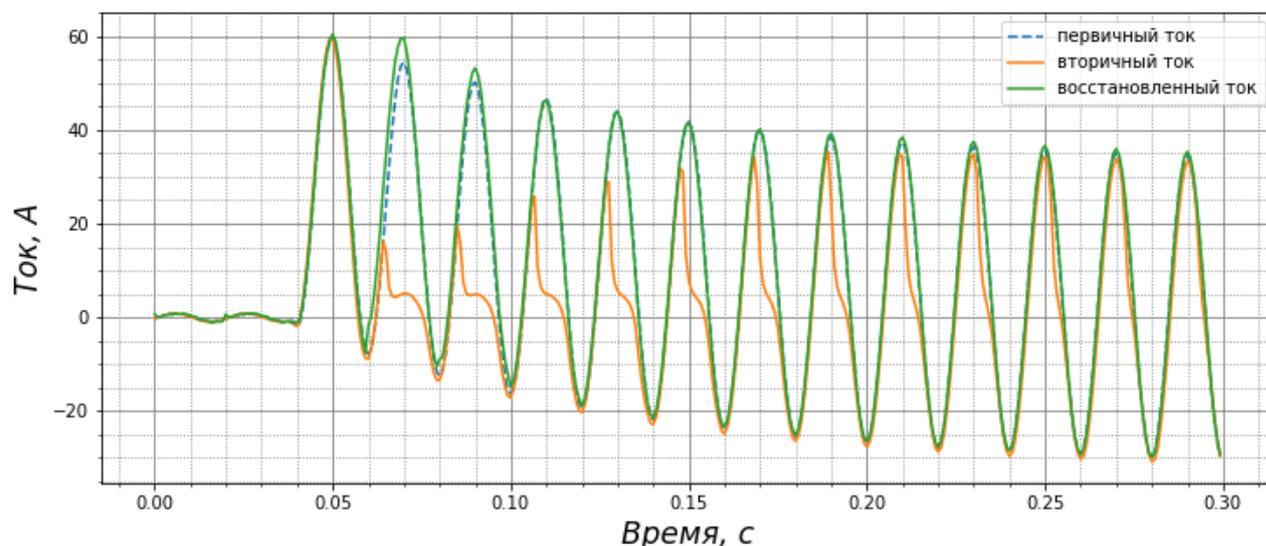


Рисунок 4.18 – Осциллограмма, соответствующая наихудшему восстановлению вторичного тока для модели №4

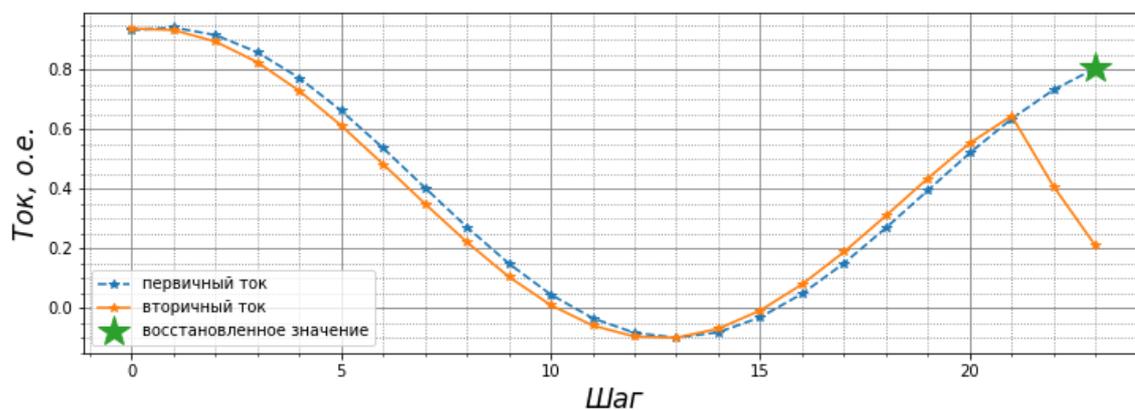
4.4.3 Восстановление вторичного тока по одной выборке

До сих пор в работе рассматривались модели, восстанавливающие ток интервалами по 0,02 с. Как уже было сказано ранее, такое восстановление увеличивает время срабатывания защиты как минимум на один период. Поэтому предпочтительно, чтобы ИНС восстанавливала ток в реальном времени по одной выборке. Пример такого восстановления приведён на рисунке 4.19.

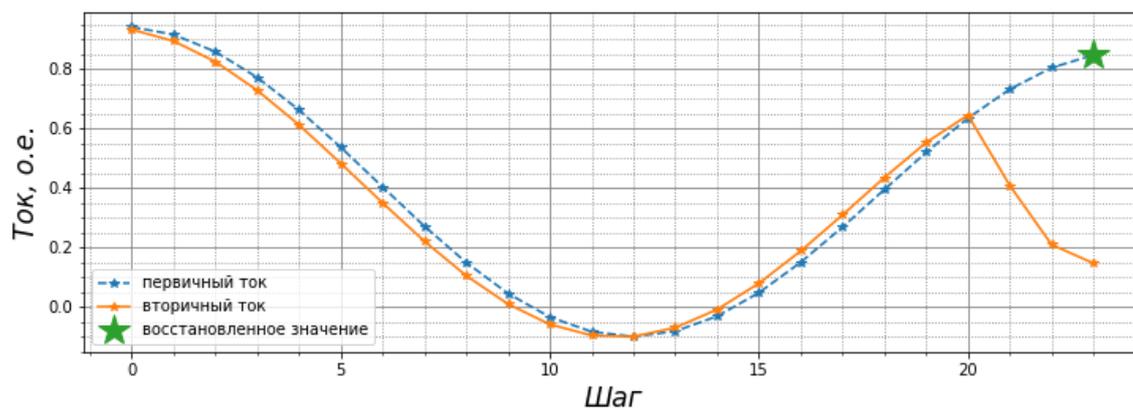
Модель №5

Параметры модели №5 приведены в таблице 4.5.

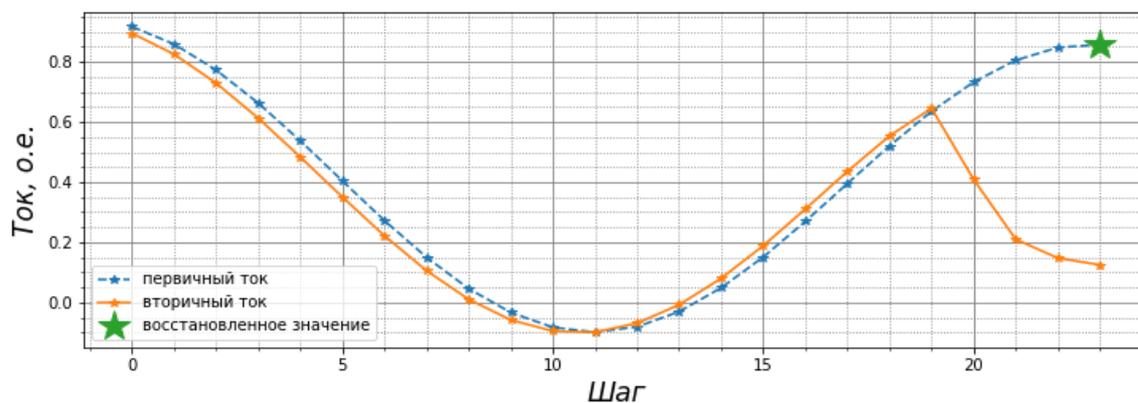
Модель №5 отличается от модели №4 лишь тем, что в выходном слое имеется только один нейрон, а не 24 (количество нейронов в выходном слое определяется количеством выборок, которое восстанавливает модель).



а)



б)



в)

Рисунок 4.19 – Пример восстановления тока по одной выборке

Таблица 4.5 – Параметры модели №5

Параметр	1 слой	2 слой
Тип слоя	LSTM	Dense
Количество нейронов	48	1
Функция активации	tanh	-
Функция потерь	mae	
Оптимизатор	Adam	
Коэффициент скорости обучения	0,01	
Размер мини-выборки	100	
Количество эпох	50	

Время обучения составило 52 секунды. Изменение MAE на каждой эпохе обучения приведено на рисунке 4.20.

Как следует из рисунка 4.20, ошибка на проверочном и тестовом наборах данных продолжает уменьшаться, а значит возможно улучшение качества работы сети подбором лучших гиперпараметров.

Примеры восстановления вторичного тока из обучающей выборки с помощью модели №5 приведены на рисунке 4.21.

Оценим погрешность ТТ без восстановления и с восстановлением по формуле (2.3) для случая, приведённого на рисунке 4.21,а (рисунок 4.22).

Средняя погрешность вторичного тока на интервале времени от t_0 до $t_0 + 0,1$ с по всем осциллограммам с восстановлением составляет 3,83 %. Это немного больше, чем для модели №4. Время работы модели №5 составляет 0,04 с.

В итоге, точность восстановления вторичного тока для моделей №4 и №5 практически идентична. Время восстановления тока также одинаково. При этом модель №4 восстанавливает 24 выборки, а модель №5 всего одну. Это говорит о том, что на время работы модели влияет не сама архитектура сети, а скорее возможности языка программирования. Поэтому сделать правильный вывод о скорости работы моделей не представляется возможным.

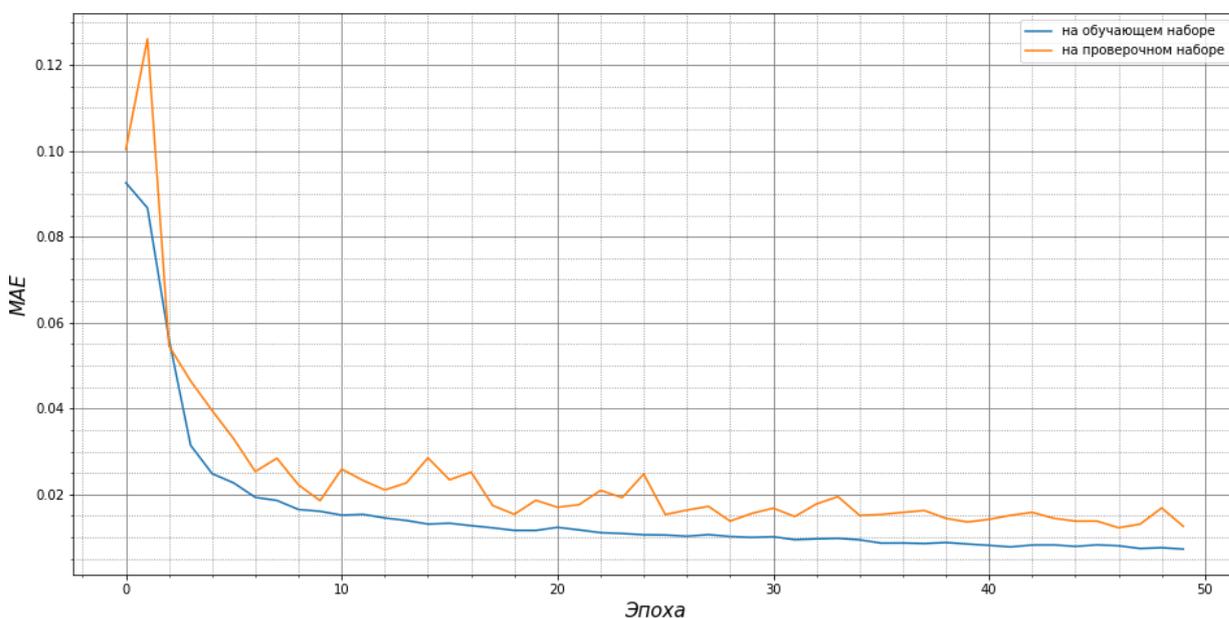
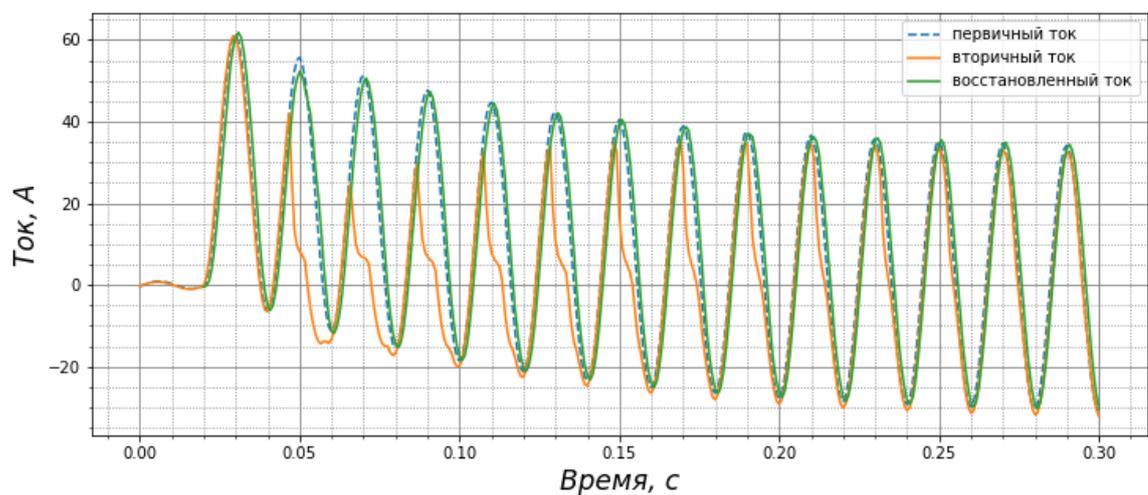
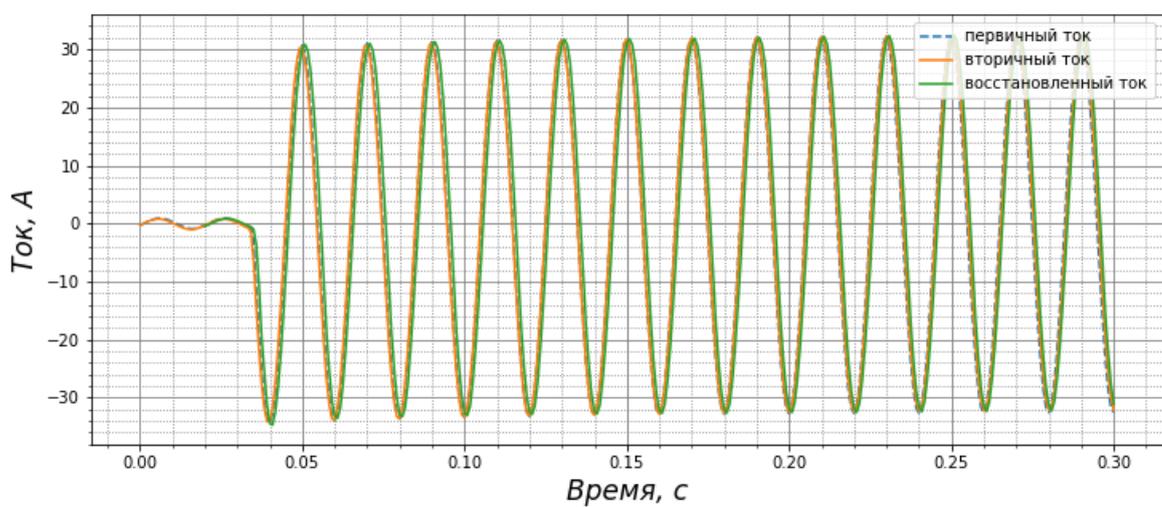


Рисунок 4.20 – Изменение MAE для модели №5



а)



б)

Рисунок 4.21 – Примеры восстановления тока с помощью модели №5

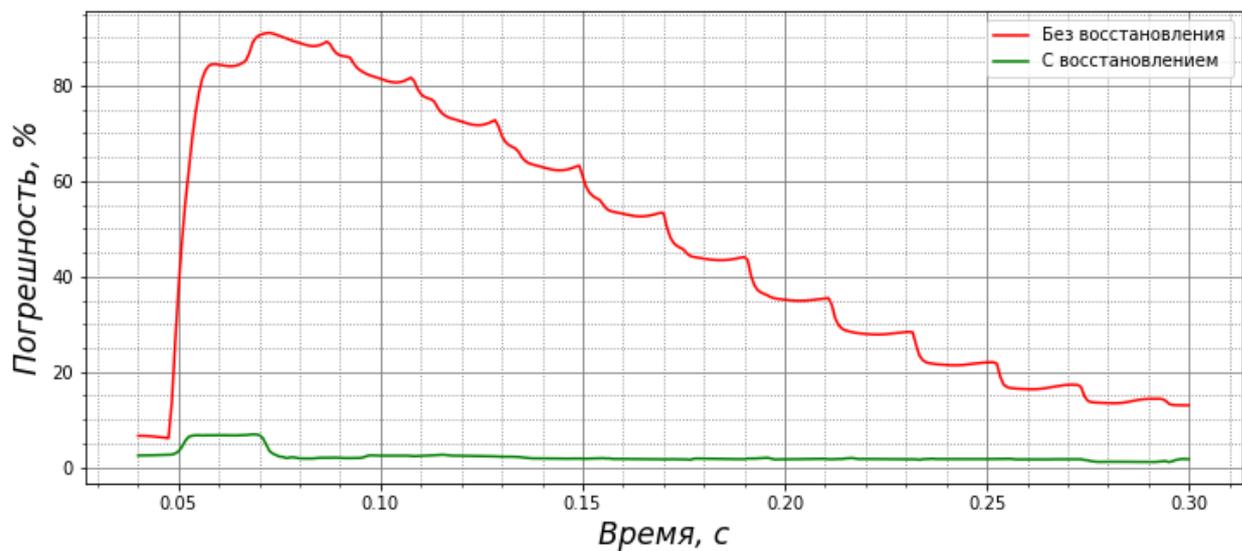


Рисунок 4.22 – Оценка погрешности ТТ

4.5 Тестирование ИНС

Во время обучения ИНС гиперпараметры подбирались таким образом, чтобы получить наилучшие результаты на проверочных наборах данных. Поэтому существует вероятность, что параметры модели «подогнаны» под проверочный набор данных и имеет смысл ещё раз проверить работу моделей на данных, которых не было ни в обучающей, ни в проверочной выборках.

Тестирование ИНС будет проводится на осциллограммах вторичного тока, снятых с ТТ-1-10 АТ-1. Расчётный вид КЗ – внешнее двухфазное КЗ фаз В и С. Рассматривается один момент КЗ – 0,025 секунд с момента начала моделирования. Остаточная индукция в фазах неодинаковая и может принимать одно из трёх значений: -1,5 Тл, 0 Тл, 1,5 Тл (учтены все возможные сочетания остаточных индукций ТТ в трёх фазах).

Для тестирования выбираются модели, показавшие наилучшие результаты при обучении: модель №4 и модель №5. Стандартизация данных происходит таким же образом, как и при обучении, с той лишь разницей, что изменяется коэффициент трансформации ТТ:

$$\frac{2 \cdot \sqrt{2} \cdot 13750}{1200} = 32,41 \text{ А}$$

Примеры восстановления тока из тестового набора данных для модели №4 приведены на рисунках 4.23 и 4.24. Примеры восстановления тока из тестового набора данных для модели №5 приведены на рисунках 4.25 и 4.26.

Видно, что результаты восстановления на тестовом наборе хуже, чем на обучающем и проверочном. Для модели №4 наибольшая погрешность ТТ во время переходного процесса составляет 42% (без восстановления погрешность находится на уровне 64 %). Для модели №5 наибольшая погрешность ТТ во время переходного процесса составляет 32%. При этом ИНС несколько завывают восстановленный ток.

Отметим, что модель №4 и модель №5 приблизительно одинаково восстанавливают ток КЗ, но совершенно по-разному восстанавливают нагрузочный ток в неповреждённой фазе (фаза А на рисунках 4.23, 4.24, 4.25, 4.26).

Тем не менее, в моменты срыва вторичного тока обе модели восстанавливает его на достаточно хорошем уровне, облегчая условия функционирования дифференциальной защиты и повышая её устойчивость.

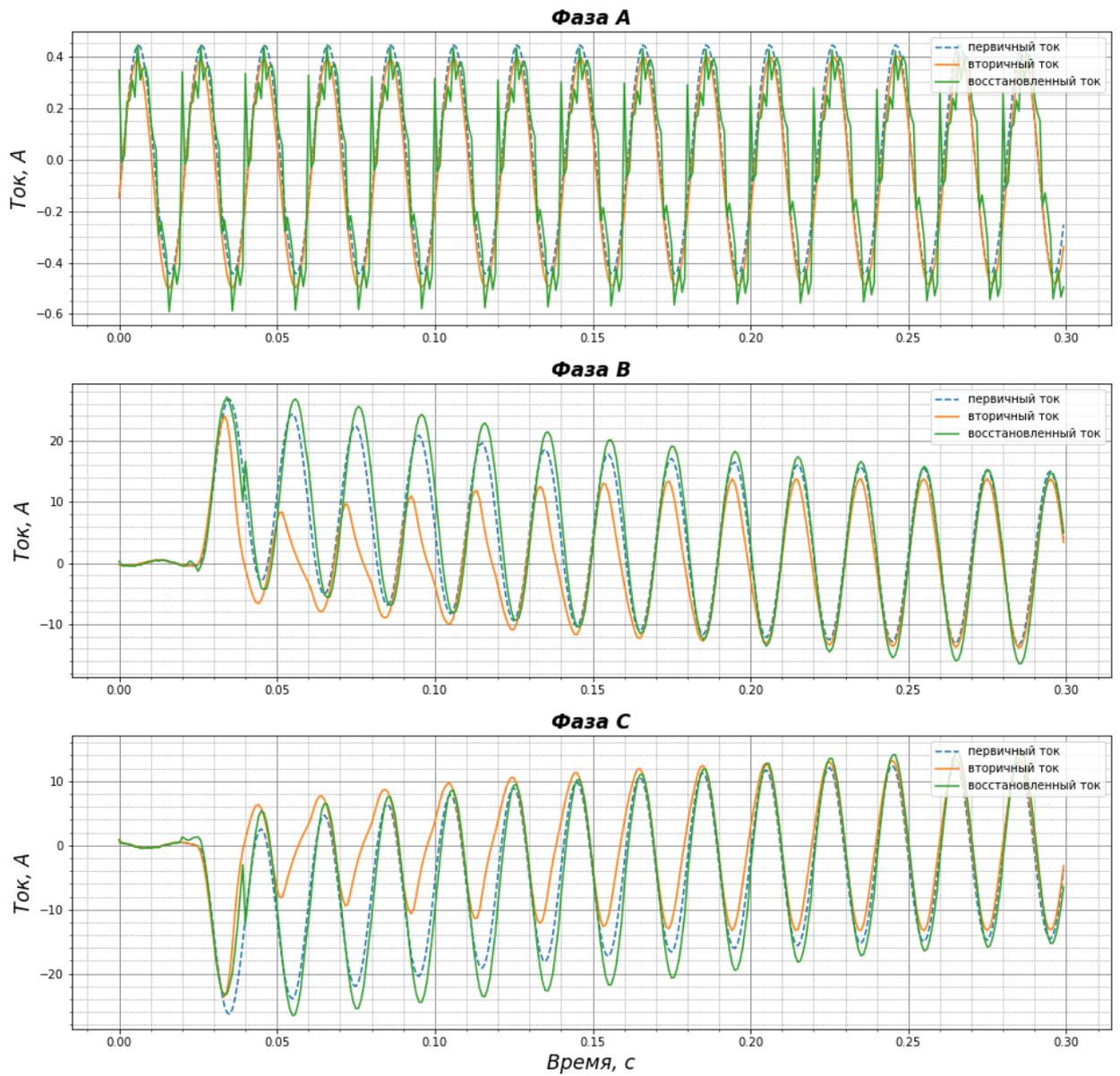


Рисунок 4.23 – Пример №1 восстановления тока из тестового набора для модели №4

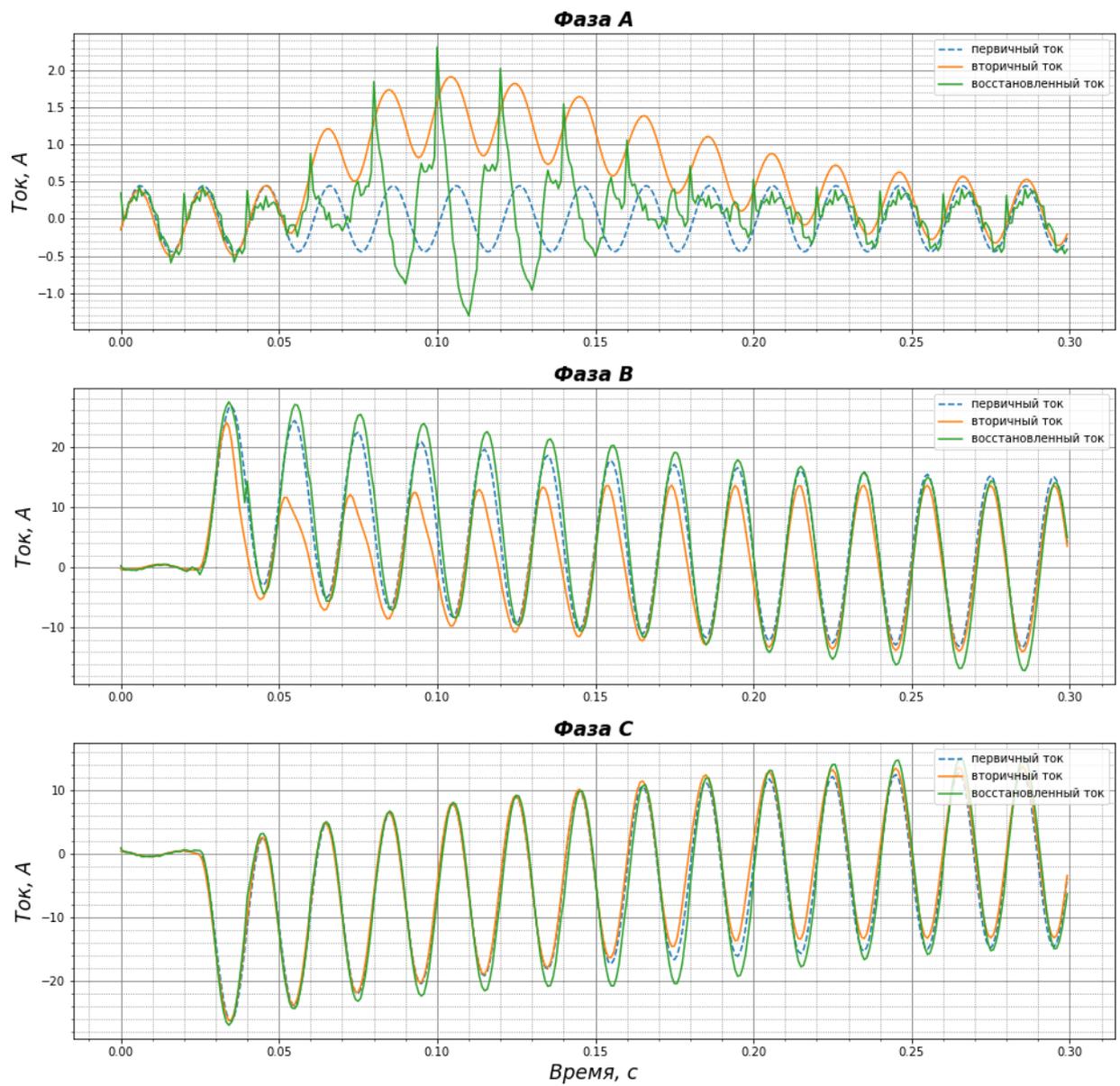


Рисунок 4.24 – Пример №2 восстановления тока из тестового набора для модели №4

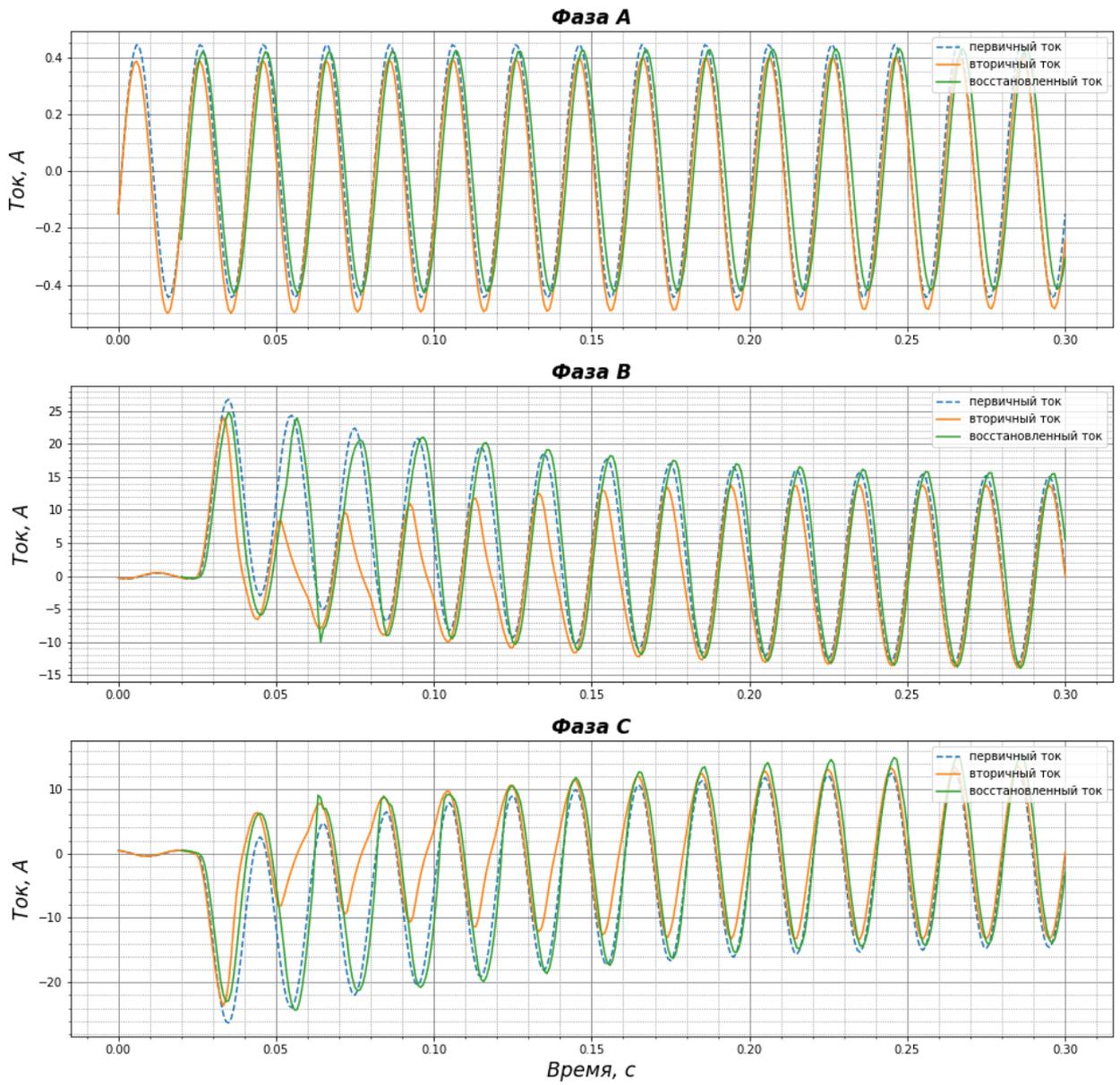


Рисунок 4.25 – Пример №1 восстановления тока из тестового набора для модели №5

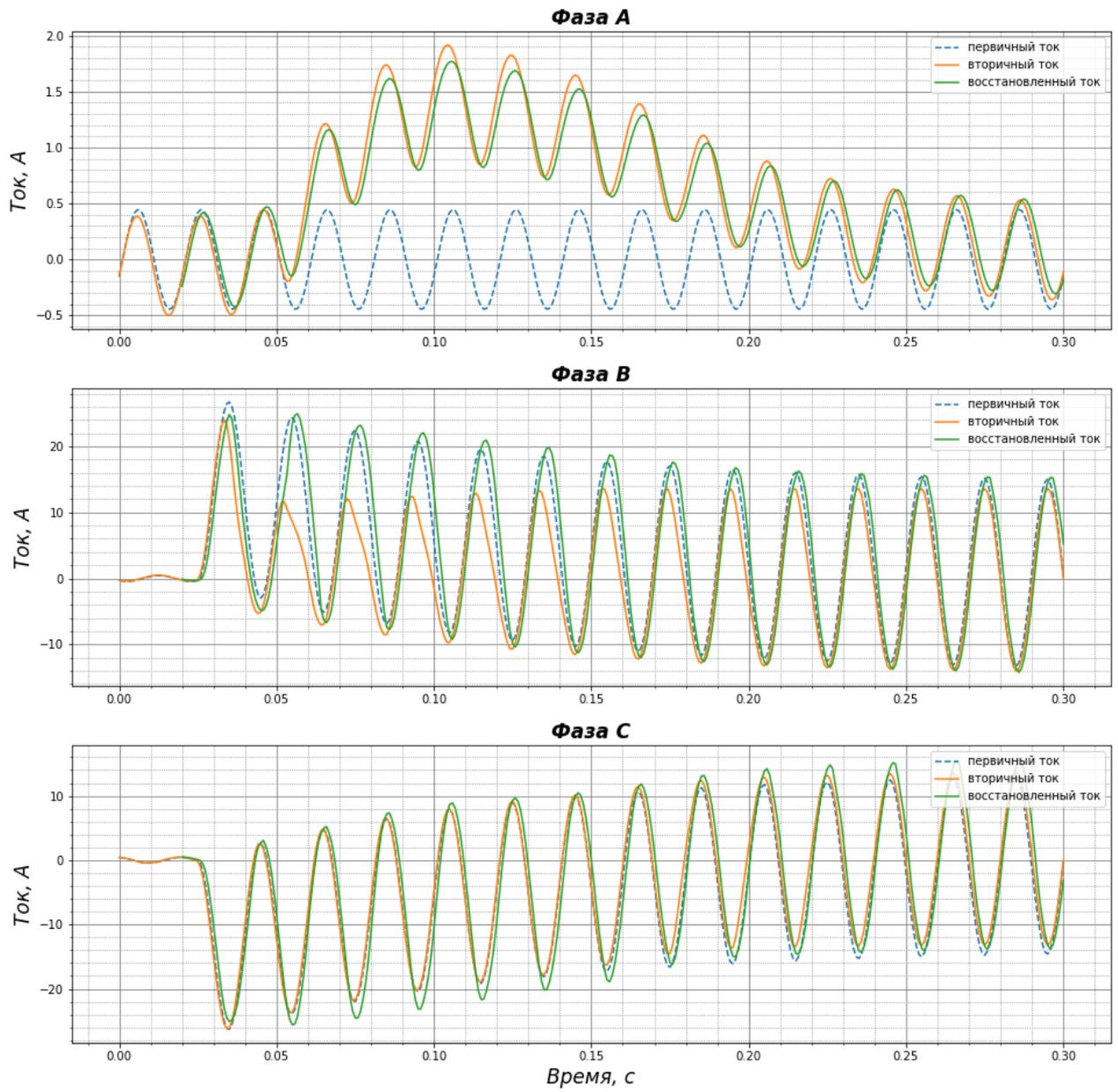


Рисунок 4.26 – Пример №2 восстановления тока из тестового набора для модели №5

5 ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

5.1 Определение ущерба от ненадёжности

Определение математического ожидания потери эффективности от ненадёжности дифференциальной защиты $M_{ПЭ}$ позволит обосновать необходимость использования разработанных моделей и оценить выгоду от их внедрения.

Значение $M_{ПЭ}$ в год t может быть оценено по следующей формуле [50]:

$$M_{ПЭ} = P_{изл} \cdot \Omega_{внеш} \cdot c_{изл} \cdot t_{восст}, \quad (5.1)$$

где $P_{изл}$ – вероятность излишнего срабатывания при КЗ вне зоны действия защиты;

$\Omega_{внеш}$ – поток внешних КЗ;

$c_{изл}$ – стоимость одного излишнего срабатывания, определяемая как цена недоотпуска электрической энергии потребителю в результате аварии;

$t_{восст}$ – время восстановления нормальной работы потребителей электроэнергии после излишнего срабатывания.

Определим ущерб от ненадёжности дифференциальной защиты трансформатора на примере ТДН-16000/110, на котором в качестве основной защиты применена дифференциальная защита с использованием реле серии ДЗТ-21. Срок службы трансформатора примем равным 25 лет. Поток внешних КЗ на отходящих присоединениях можно принять равным $\Omega_{внеш} = 4 \text{ год}^{-1}$ [50]. Передаваемая через трансформатор активная мощность принимается равной:

$$P_{пер} = 0,8 \cdot S_{ном} = 0,8 \cdot 16000 = 12800 \text{ кВт}$$

Пренебрегая временем ожидания начала работ по восстановлению повреждённого оборудования и временем выявления неисправности, примем время восстановления равным $t_{восст} = 5 \text{ ч}$, а вероятность излишних срабатываний $P_{изл} = 0,057$. Стоимость штрафа за недоотпуск электрической энергии, по данным ФСК ЕЭС, можно ориентировочно принять 1,5 долл./кВт*час (или 112 руб./кВт*час). Тогда, учитывая мощность трансформатора, принимаем:

$$c_{изл} = P_{пер} \cdot 112 = 12800 \cdot 112 = 1433,6 \text{ тыс. руб./час}$$

Уровень инфляции в России составляет около 5,5 % ($E_H = 0,055$). Примем, что за время эксплуатации это значение остаётся постоянным.

Рассчитаем математическое ожидание ущерба от ненадёжности за первый год:

$$M_{\text{ПЭ}} = P_{\text{изл}} \cdot \Omega_{\text{внеш}} \cdot c_{\text{изл}} \cdot t_{\text{восст}} = 0,057 \cdot 4 \cdot 1433,6 \cdot 5 = 1634 \text{ тыс. руб.}$$

Математическое ожидание ущерба от ненадёжности за $N = 25$ лет с учётом инфляции при постоянном значении $M_{\text{ПЭ}}$, приведённое к текущему году, рассчитывается как:

$$M_{\Sigma} = M_{\text{ПЭ}} \cdot \sum_{t=1}^N (1 + E_{\text{н.н.}})^{1-t} = 23,12 \text{ млн. руб.}$$

Таким образом, для рассматриваемого трансформатора за 25 лет эксплуатации при применении разработанных моделей математическое ожидание ущерба от ненадёжности устройств РЗА может быть снижено на 23 миллиона рублей. Отметим, что описанный выше подход не учитывает множество других факторов. Например, недоотпуск энергии потребителям может привести к аварии на производстве и к увеличению ущерба. Не был учтён поток повреждений других элементов первичной сети; не учитывается фактический уровень инфляции, изменение штрафных санкций за недоотпуск электроэнергии, снижение надёжности оставшихся в работе элементов ЭЭС.

5.2 Определение рыночной стоимости разработанных моделей

Для получения прибыли разработанный программный продукт должен поставляться выше себестоимости. Поэтому и возникает необходимость определения этой себестоимости, расчёт которой осуществляется по методике, изложенной в [51].

Стоимость разработки ПО $C_{\text{пр}}$ определяется по формуле:

$$C_{\text{пр}} = C_{\text{осн}} + C_{\text{доп}} + C_{\text{соц}} + C_{\text{м}} + C_{\text{маш.вр}} + C_{\text{н}}, \quad (5.2)$$

где $C_{\text{осн}}$ – основная заработная плата исполнителей;

$C_{\text{доп}}$ – дополнительная заработная плата исполнителей, учитывающая потери времени на отпуска и болезни и принимаемая в размере 10% от основной заработной платы;

$C_{\text{соц}}$ – единый социальный налог ЕСН, представляющий собой отчисления во внебюджетные фонды государственного социального страхования (пенсионный фонд,

фонд обязательного медицинского страхования, фонд социального страхования) и рассчитываемый в соответствии с установленной ставкой ЕСН, равной 34% от основной и дополнительной заработной платы;

C_m – затраты на используемые материалы;

$C_{\text{маш.вр}}$ – стоимость машинного времени;

C_n – накладные расходы, которые включают в себя затраты на управление, уборку, ремонт, электроэнергию, отопление и т.п. Принимаются в размере 60% от основной и дополнительной заработной платы.

На статью «основная заработная плата» относят заработную плату сотрудников, непосредственно участвующих в разработке ПО. Расчёт осуществляется по формуле:

$$Z_{\text{исп}} = Z_{\text{ср}} \cdot T, \quad (5.3)$$

где $Z_{\text{исп}}$ – заработная плата исполнителей;

$Z_{\text{ср}}$ – средняя тарифная ставка работника, руб./чел.*дни;

T – трудоёмкость разработки ПО, чел*дни.

Значение $C_{\text{осн}}$ определяется как сумма $Z_{\text{исп}}$ всех исполнителей. Средняя тарифная ставка определяется как:

$$Z_{\text{ср}} = \frac{C}{\Phi_{\text{мес}}}, \quad (5.4)$$

где C – месячная заработная плата работника, руб./мес.;

$\Phi_{\text{мес}} = 20$ дней – среднее количество рабочих дней в месяце.

Примем, что разработка моделей ИНС велась автором работы и научным руководителем порядка 60 дней, т.е. $T = 60$ чел.· дней. Примем месячную заработную плату автора работы равной 40000 руб., а научного руководителя – 60000 руб. Тогда:

$$C_{\text{осн}} = Z_{\text{исп1}} + Z_{\text{исп2}} = (C_1 + C_2) \cdot \frac{1}{\Phi_{\text{мес}}} \cdot T = (40000 + 60000) \cdot \frac{1}{20} \cdot 60 = 300000 \text{ руб.}$$

Средства, выделенные на статью «дополнительная заработная плата», рассчитываются как:

$$C_{\text{доп}} = 0,1 \cdot C_{\text{осн}} = 0,1 \cdot 300000 = 30000 \text{ руб.}$$

Средства, выделенные на статью «социальный налог», рассчитываются как:

$$C_{\text{соц}} = 0,34 \cdot (C_{\text{осн}} + C_{\text{доп}}) = 0,34 \cdot (300000 + 30000) = 112200 \text{ руб.}$$

На статью «используемые материалы» относят все затраты на электронные носители данных, бумагу для принтера, канцтовары и т.д. Примем эти затраты равными $C_m = 2000$ рублей.

Затраты на машинное время, необходимое для разработки ПО, включают: расходы на приобретение и подготовку материалов научно-технической информации, расходы на пользование средствами связи, приобретение вспомогательного ПО и оборудования и иные затраты, связанные с работой на персональном компьютере. Расчёт затрат на машинное время осуществляется по следующей формуле:

$$C_{\text{маш.вр}} = K_{\text{маш.вр}} \cdot Z_{\text{маш.вр}} + Z_{\text{экс.}} \quad (5.5)$$

где $K_{\text{маш.вр}}$ – тарифная стоимость одного часа машинного времени;

$Z_{\text{маш.вр}}$ – машинное время, используемое для проведения работ;

$Z_{\text{экс.}}$ – затраты на приобретение ПК и его эксплуатацию.

Необходимое количество машинного времени для реализации проекта по разработке программы рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{маш.вр}} = T \cdot T_{\text{см}} \cdot T_{\text{ср.маш}} \quad (5.6)$$

где $T = 60$ чел.·дней – трудоёмкость работ;

$T_{\text{см}} = 8$ часов – продолжительность рабочей смены;

$T_{\text{ср.маш}} = 0,9$ – средний коэффициент использования ПК.

$$Z_{\text{маш.вр}} = T \cdot T_{\text{см}} \cdot T_{\text{ср.маш}} = 60 \cdot 8 \cdot 0,9 = 432 \text{ часа}$$

Величина $Z_{\text{экс.}}$ включает в себя затраты на приобретение ПК, вспомогательных программ, оборудования. Примем эти затраты равными $Z_{\text{экс.}} = 100000$ руб.

Примем, что мощность ПК составляет около $P_{\text{ПК}} = 350$ Вт, тогда при тарифе на электроэнергию $C_{\text{ээ}} = 2,93$ руб./кВт·ч получим:

$$K_{\text{маш.вр.}} = P_{\text{пк}} \cdot C_{\text{ээ}} = 0,350 \cdot 2,93 = 1,03 \text{ руб./час}$$

Тогда:

$$C_{\text{маш.вр.}} = K_{\text{маш.вр.}} \cdot Z_{\text{маш.вр.}} + Z_{\text{экс.}} = 1,03 \cdot 432 + 100000 = 100445 \text{ руб.}$$

На статью «накладные расходы» относят расходы, связанные с управлением и организацией работ, внедрение и тестирование ПО, техническую поддержку. Накладные расходы рассчитываются относительно основной заработной платы:

$$C_{\text{н}} = K \cdot C_{\text{осн}}, \quad (5.7)$$

где $K = 60\%$ – коэффициент учёта накладных расходов.

$$C_{\text{н}} = K \cdot C_{\text{осн}} = 0,6 \cdot 300000 = 180000 \text{ руб.}$$

Результаты расчёта затрат на проектирование программного продукта приведены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Смета затрат на разработку ПО

№	Затраты	Обозначение	Сумма, руб.
1	Основная заработная плата	$C_{\text{осн}}$	300000
2	Дополнительная заработная плата	$C_{\text{доп}}$	30000
3	Социальный налог	$C_{\text{соц}}$	112200
4	Материалы	$C_{\text{м}}$	2000
5	Машинное время	$C_{\text{маш.вр.}}$	100445
6	Накладные расходы	$C_{\text{н}}$	180000
7	Итого	$C_{\text{пр}}$	724645

Таким образом, себестоимость разработанного ПО составляет 725 тыс. рублей.

Оптовая цена программы $C_{\text{опт}}$ может быть рассчитана по формуле:

$$C_{\text{опт}} = \frac{C_{\text{пр}}}{n} + П, \quad (5.8)$$

где $C_{\text{пр}} = 724645$ руб. – себестоимость разработки программы;

n – количество реализованных программ;

Π – прибыль.

Значение прибыли рассчитывается по формуле:

$$\Pi = Y_p \cdot C_{\text{пр}}/n, \quad (5.9)$$

где $Y_p = 0,2$ – средний уровень рентабельности.

Таким образом, при расчётном количестве реализованных программ $n = 3$ оптовая цена ПО составит:

$$C_{\text{опт}} = \frac{C_{\text{пр}}}{n} + \Pi = \frac{724645}{3} + 0,2 \cdot \frac{724645}{3} = 289858 \text{ руб.}$$

Отпускная оптовая цена реализации программы потребителям должна включать в себя налог на добавленную стоимость (НДС) и рассчитываться по формуле:

$$C_{\text{отп}} = C_{\text{опт}} + \text{НДС}, \quad (5.10)$$

где $\text{НДС} = 0,2 \cdot C_{\text{опт}}$ – налог на добавленную стоимость.

$$C_{\text{отп}} = C_{\text{опт}} + \text{НДС} = 289858 + 0,2 \cdot 289858 = 347829,6 \text{ руб.}$$

Таким образом, себестоимость разработанного ПО составила 724645 рублей. При реализации 3-х копий ПО отпускная цена составляет 347829,6 руб.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1) Переходной режим – явление случайное. Содержание апериодической составляющей в токе КЗ, как правило, меньше 70 %. Остаточная индукция также носит вероятностный характер. Согласно канадскому исследованию, большие значения остаточной индукции (60-80 %) были выявлены в 27 % ТТ и 141 [14]. Соответственно, случай наложения большой апериодической составляющей на большую остаточную индукция ещё более редкий.

Тем не менее, при больших постоянных времени, совпадение большой апериодической составляющей и остаточной намагниченности возможно (аварии на Ростовской АЭС и ПС 500 кВ Тамань тому подтверждение). Большие постоянные времени характерны для электростанций и близлежащих подстанций – самых ответственных объектов электроэнергетики. Поэтому даже небольшая вероятность нарушения нормального режима работы данных объектов становится достаточной причиной повышать надёжность их работы.

2) Безусловно, для повышения надёжности электроснабжения необходимо повышать надёжность систем РЗА. Наиболее крупные аварии всегда являются следствием наложения нескольких неисправностей друг на друга. Неисправностью, являющейся первопричиной таких крупных аварий, может стать именно неправильное действие устройств РЗ при насыщении ТТ.

Но, помимо насыщения трансформаторов тока, могут быть и другие причины, приводящие к массовым отключениям. К примеру, из [1] следует, что трёхфазное КЗ на шинах 500 кВ Ростовской АЭС возникло в результате неправильных оперативных переключений (включение выключателя на заземляющий нож).

Более того, один из комплектов ДЗШ 500 кВ, выполненный на базе ШЭ2710 562, отработал правильно (не сработал излишне). Во втором комплекте, выполненном на базе панели ПДЭ-2006 и отработавшем излишне, отсутствовала блокировка по второй гармонике. То есть здесь главной причиной неправильной работы устройства РЗА явилось конструктивное несовершенство комплекта защиты.

В соответствии с [52] одними из организационных причин неправильной работы устройств РЗА являются: ошибочные или неправильные действия персонала (10,54%), дефекты изготовления (9,69%), дефекты монтажа (4,94%).

Одними из технических причин неправильной работы устройств РЗА являются: ошибки в заданных уставках (3,18%), ошибки при выполнении переключений с устройствами РЗА (4,5%), дефекты или неисправности электромеханической (15,6%),

микроэлектронной (4,74%) и микропроцессорной (3,96%) аппаратуры, дефекты или неисправности вторичных цепей РЗА (17,22%), дефекты или неисправности устройств РЗА из-за физического износа (10,44%).

Исходя из всего вышесказанного, необходимо повышать надёжность всех составляющих системы релейной защиты, а не только её устойчивость функционирования в переходных режимах.

3) Проблема насыщения ТТ существует с момента формирования электроэнергетики как отрасли. За это время свой вклад в решение проблемы внесло большое количество учёных, предложив те или иные технические решения. В настоящее время для дифференциальных защит, выполненных на микропроцессорной элементной базе, существуют достаточно эффективные алгоритмы для обеспечения несрабатывания при внешнем КЗ. Проблема разграничения внутреннего КЗ и БТН в дифференциальных защитах трансформаторов, несмотря на свою важность, не является такой острой. Существуют способы восстановления искажённого вторичного тока ТТ, реализованные в терминалах производителя устройств РЗА.

Исходя из тезисов п.1 (проблема устойчивого функционирования РЗА при насыщении ТТ имеет вероятностный характер и наиболее остро проявляется только на электростанциях и близлежащих подстанциях), п.2 (в системах РЗА существует большое количество других не менее важных технических проблем), п.5 (см. далее, наличие более совершенных преобразователей тока), а также вышесказанного по данному пункту, делается вывод о том, что проблема насыщения ТТ переоценена. Вероятно, более пристальное внимание к другим проблемам в системах РЗА приведёт к большему повышению надёжности, нежели продолжение исследований по исключению неправильной работы защит в переходных режимах.

4) Вопрос о допустимости и необходимости применения ИНС в системах РЗА остаётся открытым. С одной стороны, нейронные сети, безусловно, являются мощным инструментом. В работе реализованы простейшие рекуррентные ИНС, которые не могут считаться даже глубокими, т.к. содержат всего 2 слоя. Но даже они способны достаточно точно восстанавливать искажённый ток ТТ. В работе рассмотрены случаи, когда при помощи ИНС погрешность ТТ уменьшалась с 90 % до 5 %. Средняя погрешность ТТ в течение одной постоянной времени от начала КЗ у лучших моделей находится на уровне 4 %.

С другой стороны, типов защищаемого оборудования, режимов и аварийных ситуаций, в которых может оказаться это оборудование, чрезвычайно много. Собственно, при создании алгоритма устройства РЗА учёт всех возможных режимов и представляет

собой самую сложную задачу. Более того, один аварийный режим (например, однофазное КЗ), может переходить в другой (например, двухфазное КЗ). Чтобы нейронная сеть могла правильно работать в этих режимах, желательно эти режимы ей «показать». Сколько в таком случае потребуется обучающих наборов данных? Вероятно, предусмотреть все возможные режимы просто невозможно. Но если поведение «традиционного» алгоритма устройства РЗА в конкретном режиме можно чётко определить, то неизвестно, какой результат будет на выходе модели, функционирующей по принципу нечёткой логики. Допустимо ли использовать нечёткую логику в системах РЗА?

5) Применение ИНС в алгоритмах устройств РЗА кажется сомнительным решением ещё и по той причине, что уже сейчас существуют типы измерительных преобразователей тока, обеспечивающих правильную работу РЗА в переходных режимах. Более того, некоторые из них применяются на проектируемых объектах ОАО «ФСК ЕЭС». Использование таких преобразователей является более предпочтительным, чем алгоритмические решения в терминалах, так как проблема насыщения ТТ вообще отсутствует. Однако на подавляющем большинстве объектов установлены классические ТТ класса точности 10Р.

В этой связи, задача по обеспечению правильного функционирования устройств РЗА становится больше не технической, а технико-экономической. Для замены существующих ТТ класса 10Р необходимы большие капиталовложения. В нашей стране электроэнергетика является отраслью экономики, напрямую зависящей от государства. Поэтому, только имея сильный экономический институт, государство способно решить такую задачу, как повышение надёжности функционирования устройств РЗА, а дальнейшее развитие систем РЗА невозможно без развития государства.

Перейти к программному коду, в котором рассмотрены все примеры из данной работы, можно либо по указанной ниже ссылке, либо по QR-коду.

<https://colab.research.google.com/drive/1kUIsse8atsIiznRmd-03a-zwap21DY5e#scrollTo=di2Y4nOUOLk1>



СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Протокол совместного заседания секции «Управления режимами энергосистем, РЗА», секции «Проблемы надёжности и эффективности релейной защиты и средств автоматического управления в ЕЭС России» НП «НТС ЕЭС» и секции 3 НТС ПАО «Россети» «Управление режимами, автоматизация и применение автоматического управления в электрических сетях» по теме «Вопросы координации работы релейной защиты и измерительных трансформаторов тока» от 11.09.2015.
2. Письмо Минэнерго России № ЧА-3440/10 от 02.04.2019 г.
3. Постановление Правительства РФ от 13.08.2018 N 937 «Об утверждении правил технологического функционирования электроэнергетических систем и о внесении изменений в некоторые акты Правительства РФ» // <http://www.consultant.ru>.
4. ГОСТ Р 58669-2019 Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Релейная защита. Трансформаторы тока измерительные индуктивные с замкнутым магнитопроводом для защиты. Методические указания по определению времени до насыщения при коротких замыканиях.
5. ПНСТ 283-2018 Трансформаторы измерительные. Часть 2. Технические условия на трансформаторы тока (с Поправкой).
6. Шкафы РЗА серий ШЭ2607, ШЭ2710. Методические указания по проверке и выбору трансформаторов тока. ЭКРА.650323.085 Д (первая редакция). – 143 с.
7. Протокол совместного заседания секции «Проблемы надёжности и эффективности релейной защиты и средств автоматического системного управления», секции «Управления режимами энергосистем, РЗА» НП «НТС ЕЭС» и секции «Управление режимами, автоматизация и применение автоматического управления в электрических сетях» НТС ПАО «Россети» от 15.03.2018.
8. Королев, Е. П. Расчеты допустимых нагрузок в токовых цепях релейной защиты / Е. П. Королев, Э. М. Либерзон. – Москва: Энергия, 1980. – 208 с.
9. «Вся правда об оптических трансформаторах: часть 1» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://digitalsubstation.com/blog/2017/08/23/vsya-pravda-ob-opticheskikh-transformatorah-chast-1/>. - Заглавие с экрана. – (Дата обращения: 21.02.2021).
10. Любомир Кожович «Катушки Роговского – реальная альтернатива традиционным ТТ» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://digitalsubstation.com/blog/2017/05/24/katushki-rogovskogo-realnaya-alternativa-traditsionnym-tt/>. – Заглавие с экрана. – (Дата обращения: 21.02.2021).

11. ГОСТ 7746-2015 Межгосударственный стандарт. Трансформаторы тока. Общие технические условия: дата введения 2017-03-01.

12. ГОСТ Р МЭК 61869-2-2015 Трансформаторы измерительные. Часть 2. Дополнительные требования к трансформаторам тока: национальный стандарт Российской Федерации: дата введения 2015-04-28/ Федеральное агентство по техническому регулированию. – Изд. Официальное. – Москва: Стандартинформ, 2016. – 58 с.

13. Сивков А.С., Щеглов Л.В., Ведерников Г.А., Петрова О.В., ООО «Эльмаш (УЭТМ)». Дополнительные параметры трансформаторов тока для обеспечения надёжной работы сети. – Энергоэксперт. – 2018. – №3 – С. 44-47.

14. Г. Циглер. Цифровые устройства дифференциальной защиты: принципы и область применения / Под ред. А. Ф. Дьякова. – Нюрнберг: Энергоиздат, 2005. – 273 с.: ил.

15. И. Д. Кутявин. Влияние остаточного магнетизма трансформаторов тока на работу дифференциальных защит. – Известия томского ордена трудового красного знамени политехнического института имени С. М. Кирова. – 1956. – Том 82. – С. 27-33.

16. И. Д. Кутявин. Дифференциальная защита шин при помощи трансформаторов тока с воздушным зазором. – Известия томского ордена трудового красного знамени политехнического института имени С. М. Кирова. – 1951. – Том 70. – С. 69-79.

17. И. Д. Кутявин. К вопросу о типе трансформаторов тока для дифференциальных защит. – Известия томского ордена трудового красного знамени политехнического института имени С. М. Кирова. – 1956. – Том 82. – С. 34-38.

18. Федосеев А.М., Федосеев М.А. Релейная защита электроэнергетических систем: Учеб. Для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 528 с.: ил.

19. СТО 56947007 – 17.220.21.162-2014 Трансформаторы тока на напряжения 330, 500 и 750 кВ. Типовые технические требования, ОАО «ФСК ЕЭС».

20. ВГТ-220 (У1, УХЛ1*) Выключатель элегазовый колонковый (трёхполюсное/однополюсное исполнение) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://zeto.ru/products_and_services/high_voltage_equipment/vyklyuchateli-elegazovye-kolonkovye/vgt-220-1k-vyklyuchatel-elegazovyy-kolonkovyy. – Заглавие с экрана. – (Дата обращения: 03.03.2021).

21. ПАО «Россети» в цифрах [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://pro-rza.ru/pao-rosseti-v-tsifrah/>. – Заглавие с экрана. – (Дата образования: 06.03.2021).

22. Шнеерсон Э.М. Цифровая релейная защита. – М.: Энергоатомиздат, 2007. 549 с.: ил.

23. Глазырин В.Е. Выполнение продольных дифференциальных защит электрооборудования электрических станций и подстанций: учебное пособие / В.Е. Глазырин, А.А. Осинцев. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2017. – 71 с.

24. СТО 56947007 – 29.120.70.136-2012 Методические указания по выбору параметров срабатывания устройств РЗА серии SIPROTEC (Siemens AG) дифференциальной токовой защиты шин 110-750 кВ, ОАО «ФСК ЕЭС».

25. СТО 56947007-29.120.70.137-2012 Методические указания по выбору параметров срабатывания устройств РЗА серии SIPROTEC (Siemens AG) трансформаторов с высшим напряжением 110-220 кВ, ОАО «ФСК ЕЭС».

26. СТО 56947007-29.120.70.99-2011 Методические указания по выбору параметров срабатывания устройств РЗА подстанционного оборудования производства ООО НПП «ЭКРА», ОАО «ФСК ЕЭС».

27. СТО 56947007-29.120.70.109-2011 2011 Методические указания по выбору параметров срабатывания устройств РЗА оборудования подстанций производства компании «GE Multilin», ОАО «ФСК ЕЭС».

28. СТО 56947007-29.120.70.098-2011 Методические указания по выбору параметров срабатывания устройств РЗА оборудования подстанций производства ООО «АББ Силовые и Автоматизированные Системы», ОАО «ФСК ЕЭС».

29. М.А. Купарев Гармонический анализ токов внутренних коротких замыканий дифференциальной защиты трансформатора // Электро. – 2007. – №3. – С.15-18.

30. И.И. Литвинов, В.А. Титов, А.С. Трофимов Оценка вероятности отказа в срабатывании дифференциальной защиты трансформатора из-за блокировки по второй гармонике// Релейная защита и автоматизация. - 2020. – №4. – С. 14-21.

31. Каштенни, Б. Усовершенствованный алгоритм отстройки от бросков тока намагничивания / Б. Каштенни, Л. Севов // Релейщик. – 2009. – №1. – С. 30-41.

32. С.Л. Кужеков, Г.С. Нудельман Обеспечение правильной работы микропроцессорных устройств дифференциальной защиты при насыщении трансформаторов тока// Известия вузов. Электромеханика. – 2009. – №4.– С.12-18.

33. С.Л. Кужеков, А.А. Дегтярёв, Б.Б. Сербиновский Анализ способов восстановления информации о первичном токе трансформатора тока, работающего с насыщением сердечника // Релейная защита и автоматизация. - 2017. – №3. – С. 43-51.

34. С.Л. Кужеков, А.А. Дегтярёв О восстановлении периодической составляющей первичного тока трансформатора тока в переходном режиме// Известия вузов. Электромеханика. – 2011. – №3.– С.29-31.

35. А.Д. Рыбалкин, Шурупов А.А., Ермолкин И.А. Прогнозирование тока короткого замыкания при насыщении магнитопровода трансформатора тока// Сборник трудов НПП «ЭКРА»: «Цифровая электроэнергетика: проблемы и достижения». Выпуск V/
36. Кужеков С.Л., Дегтярёв А.А., Трясицын А.Д. Способ компенсации погрешностей трансформатора тока в переходных режимах// Патент РФ # 2 647 875 С2, 2016. Бюл. №9.
37. Ю.Я. Лямец, А.Б. Атнишкин, П.И. Воронов, И.Ю. Никонов Коррекция нелинейно искажённого тока// Релейная защита и автоматизация. - 2017. – №4. – С. 49-53.
38. Лямец Ю.Я., Атнишкин А.Б. Способ восстановления тока при насыщении трансформатора // Патент РФ № 2 648 991 С1, 2017. Бюл. №10.
- 39 Атнишкин А.Б. Адаптивные модификации алгоритма дифференциальной защиты трансформатора: автореферат на соискание учёной степени кандидата технических наук: 05.14.02 – Чебоксары, 2019. – 24 с.
40. Литвинов И.И. Повышение устойчивости функционирования дифференциальной защиты силового трансформатора: автореферат на соискание учёной степени кандидата технических наук: 05.14.02 – Новосибирск, 2018. – 24 с.
41. Ломан М.С. Микропроцессорная защита силовых понижающих трансформаторов: автореферат на соискание учёной степени кандидата технических наук: 05.14.02 – Минск, 2015. – 25 с.
42. Е. Л. Кокорин, В.С. Чайкин, С.А. Дмитриев Анализ возможности применения нейронных сетей для реализации алгоритмов РЗиА// Релейщик. – 2020. –№2. – С.8-14.
43. Николаева О.О., Климова Т.Г. Применение нейронных сетей и алгоритмов оптимизации для определения параметров АРВ синхронного генератора // Релейщик. – 2020. –№2. – С.16-23.
44. А.М. Александров Методика расчёта уставок дифференциальной защиты трансформаторов (Seram T87) / А.М. Александров // Техническая коллекция Schneider Electric. – 2007. – №9. – 19 с.
45. Усачев С. С., Волошин А.А., Энтентеев А.Р., Максудов Б.Т. Повышение эффективности функционирования релейной защиты в режимах с глубоким насыщением трансформатора тока с использованием методики, основанной на применении нейронных сетей. В сборнике: Электроэнергетика глазами молодёжи – 2018 Материалы IX Международной молодёжной научно-технической конференции. В 3-х томах. Ответственный редактор Э.В. Шамсутдинов. 2018. С. 139-142
46. Hong, Y.-Y.; Chang-Chian, P.-C. (2008). Detection and correction of distorted current transformer current using wavelet transform and artificial intelligence. , 2(4), 1–. doi:10.1049/iet-gtd:20070383.

47. Шкаф основных защит автотрансформатора с высшим напряжением 330 кВ и выше типа ШЭ2710 542543. Руководство по эксплуатации ЭКРА. 656453.035 РЭ. Редакция от 01.11.2019.

48. Рашид, Тарик. Создаём нейронную сеть. : Пер. с англ. – СПб.: ООО «Альфа-книга», 2017. – 272 с.: ил. – Парал. тит. англ.

49. Шолле Франсуа Глубокое обучение на Python. – СПб.: Питер, 2018. – 400 с.: ил. – (Серия «Библиотека программиста»).

50. Шалин А.И. Надёжность и диагностика релейной защиты энергосистем: Учебник. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. – 384 с.

51. Расчёт сметы затрат на разработку программного продукта [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.medicnotes.ru/hovs-953-3.html>. – Заглавие с экрана. – (Дата обращения: 29.05.21).

52. Информация о результатах функционирования устройств РЗА в ЕЭС России в 2020 году [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.so-ups.ru/functioning/tech-base/rza/rza-account-analys/rza-results-info/2020/>. – Заглавие с экрана. – (Дата обращения: 30.05.21).