

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)

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 г.

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА**

\_\_\_\_\_ *Аристархов Сергей Дмитриевич* \_\_\_\_\_

(фамилия, имя, отчество студента – автора работы)

\_\_\_\_\_ *Синтез математической модели дифференциальной защиты на примере устройства* \_\_\_\_\_

(тема работы)

\_\_\_\_\_ *АО "РАДИУС Автоматика"* \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_ *Факультет энергетики* \_\_\_\_\_

(полное название факультета)

Направление подготовки \_\_\_\_\_ *13.03.02 – Электроэнергетика и электротехника* \_\_\_\_\_

(код и наименование направления подготовки бакалавра)

**Руководитель  
от НГТУ**

\_\_\_\_\_ *Осинцев А.А.* \_\_\_\_\_

(фамилия, имя, отчество)

\_\_\_\_\_ *к.т.н., доцент* \_\_\_\_\_

(ученая степень, ученое звание)

\_\_\_\_\_ \_\_\_\_\_  
(подпись, дата)

**Автор выпускной  
квалификационной работы**

\_\_\_\_\_ *Аристархов С.Д.* \_\_\_\_\_

(фамилия, имя, отчество)

\_\_\_\_\_ *ФЭН, ЭН1-63* \_\_\_\_\_

(факультет, группа)

\_\_\_\_\_ \_\_\_\_\_  
(подпись, дата)

**Консультанты по разделам:**

\_\_\_\_\_ *Экономическая часть* \_\_\_\_\_

(краткое наименование раздела)

\_\_\_\_\_ *Охрана труда* \_\_\_\_\_

(краткое наименование раздела)

\_\_\_\_\_ *Нормоконтроль* \_\_\_\_\_

(краткое наименование раздела)

\_\_\_\_\_ *Б.Н. Мошкин* \_\_\_\_\_

(подпись, дата, инициалы, фамилия)

\_\_\_\_\_ *А.М. Парахин* \_\_\_\_\_

(подпись, дата, инициалы, фамилия)

\_\_\_\_\_ *А.А.Осинцев* \_\_\_\_\_

(подпись, дата, инициалы, фамилия)

Новосибирск 2020

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)

\_\_\_\_\_  
(подпись, дата)

**ЗАДАНИЕ  
НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ БАКАЛАВРА**

студенту \_\_\_\_\_ *Аристархову Сергею Дмитриевичу*  
(фамилия, имя, отчество)

Направление подготовки \_\_\_\_\_ *13.03.02 – Электроэнергетика и электротехника*  
(код и наименование направления подготовки бакалавра)

\_\_\_\_\_ *Факультет энергетики*  
(полное название факультета)

Тема \_\_\_\_\_ *Синтез математической модели дифференциальной защиты на примере*  
(полное название темы выпускной квалификационной работы бакалавра)  
\_\_\_\_\_ *устройства АО "РАДИУС Автоматика"*

Исходные данные (или цель работы) \_\_\_\_\_ *Исследование принципов работы*  
\_\_\_\_\_ *микропроцессорных устройств дифференциальной защиты трансформатора;*  
\_\_\_\_\_ *разработка имитационной математической модели, позволяющей исследовать*  
\_\_\_\_\_ *функционирование устройств дифференциальной защиты; сопоставление*  
\_\_\_\_\_ *разработанной модели с реальным устройством*

Структурные части работы \_\_\_\_\_ *Обзор функций и возможностей микропроцессорного*  
\_\_\_\_\_ *терминала "Сириус-Т"; описание методики расчета уставок дифференциальной*  
\_\_\_\_\_ *защиты трансформатора "Сириус-Т"; обзор алгоритмов работы цифровых*  
\_\_\_\_\_ *фильтров микропроцессорных устройств релейной защиты; реализация модели*  
\_\_\_\_\_ *дифференциальной защиты в среде MATLAB; построение сетевого графика*  
\_\_\_\_\_ *разработки модели микропроцессорного устройства "Сириус-Т"; техника*  
\_\_\_\_\_ *безопасности при эксплуатации микропроцессорного терминала; расчет*

защитного заземления подстанции 110/10 кВ

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

Задание согласовано и принято к исполнению.

**Руководитель  
от НГТУ**

Осинцев А.А.

(фамилия, имя, отчество)

к.т.н., доцент

(ученая степень, ученое звание)

02.03.20

(подпись, дата)

**Студент**

Аристархов С.Д.

(фамилия, имя, отчество)

ФЭН, ЭН1-63

(факультет, группа)

02.03.20

(подпись, дата)

Тема утверждена приказом по НГТУ № 1359/2 от « 05 » марта 202 0 г.  
изменена приказом по НГТУ № \_\_\_\_\_ от « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 202 0 г.

ВКР сдана в ГЭК № 28.1, 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)

Охрана труда

(краткое наименование раздела)

02.03.20, Б.Н. Мошкин

(подпись, дата, инициалы, фамилия)

02.03.20, А.М. Парухин

(подпись, дата, инициалы, фамилия)

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
1 ОБЗОР МИКРОПРОЦЕССОРНОГО ТЕРМИНАЛА «СИРИУС-Т» .....	8
1.1 Эксплуатационные возможности устройства .....	9
1.2 Основная функция устройства.....	10
1.3 Дополнительные функции устройства.....	18
2 МЕТОДИКА РАСЧЕТА УСТАВОК ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ ТРАНСФОРМАТОРА «СИРИУС-Т».....	22
2.1 Расчет общих уставок .....	22
2.2 Расчет уставок чувствительной ступени дифференциальной защиты трансформатора (ДЗТ-2).....	24
2.3 Расчет уставок дифференциальной токовой отсечки (ДЗТ-1).....	29
3 ОБЗОР АЛГОРИТМОВ РАБОТЫ ЦИФРОВЫХ ФИЛЬТРОВ МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ УСТРОЙСТВ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ .....	30
3.1 Общие принципы .....	30
3.2 Метод наименьших квадратов .....	32
3.3 Формирование ортогональных составляющих .....	36
3.4 Дискретное преобразование Фурье .....	37
4 РЕАЛИЗАЦИЯ МОДЕЛИ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ В СРЕДЕ MATLAB .....	40
4.1 Определение времени срабатывания реального устройства .....	40
4.2 Реализация основного блока защиты .....	51
4.3 Реализация измерительного блока защиты .....	56
4.4 Определение наиболее оптимальной модели.....	66
5 СЕТЕВОЙ ГРАФИК РАЗРАБОТКИ МОДЕЛИ МИКРОПРОЦЕССОРНОГО УСТРОЙСТВА «СИРИУС-Т» .....	71
5.1 Цели и задачи составления сетевого графика .....	71
5.2 Система сетевого планирования и управления. Сетевой график и его элементы.....	73

5.3 Расчет сетевого графика четырехсекторным способом.....	79
5.4 Привязка сетевого графика к календарю.....	83
6 ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ МИКРОПРОЦЕССОРНОГО ТЕРМИНАЛА «СИРИУС-Т».....	87
7 РАСЧЕТ ЗАЩИТНОГО ЗАЕМЛЕНИЯ ПОДСТАНЦИИ .....	88
7.1 Общие сведения.....	88
7.2 Решение .....	89
7.3 Вывод по расчету .....	95
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	96
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	98

## **ВВЕДЕНИЕ**

По мере развития науки и техники на замену старым устройствам релейной защиты и автоматики, работающих на электромеханической и микроэлектронной базе, приходят микропроцессорные терминалы, обладающие рядом преимуществ. Главным из них является многофункциональность: цифровые устройства релейной защиты, помимо своих основных функций, осуществляют замер и отображение электрических величин, запись и хранение протоколов событий, осциллограмм аварийных режимов и т.д. Важным преимуществом микропроцессорных устройств является возможность удаленного управления ими, с использованием персонального компьютера, что очень важно на текущем этапе цифровизации электроэнергетических систем. Кроме того, микропроцессорные терминалы обладают значительной компактностью, что упрощает их транспортировку и эксплуатацию.

Микропроцессорные терминалы выполняют свои функции посредством численных расчетов и анализа дискретных цифровых сигналов. В данной работе предлагается более подробно разобраться с принципами функционирования цифровых устройств релейной защиты на базе терминала дифференциальной защиты трансформатора «Сириус-Т» производства АО «РАДИУС Автоматика», включающие в себя как программные, так и математические детали.

Для цифровых устройств релейной защиты важной задачей является дискретизация и обработка периодического сигнала тока, подаваемого с измерительного трансформатора тока (ТТ). Как известно, гармонический сигнал тока может быть представлен вращающимся в комплексной плоскости вектором, имеющим модуль и угол сдвига (начальную фазу) относительно базисного вектора, за который чаще всего принимается вектор напряжения. Главной задачей измерительного органа многих микропроцессорных терминалов является определение модуля и начальной фазы вектора тока,

характеризующего подаваемый на устройство сигнал. Именно этими величинами и оперирует микропроцессор.

Основным повреждением в энергосистеме является короткое замыкание, ток которого помимо основной гармоники промышленной частоты содержит экспоненциально затухающую аperiodическую составляющую. Помимо этого, сигнал тока содержит в себе компоненты высших гармоник. Поэтому алгоритмы обработки контролируемого сигнала измерительного органа терминала должны чётко и точно выделять только полезную составляющую сигнала, являющуюся током промышленной частоты.

С развитием вычислительной техники появилась возможность виртуального моделирования устройств РЗА, позволяющая проверить работоспособность терминала в условиях, приближенных к реальным. Целью настоящей работы является разработка и исследование работоспособности математической модели микропроцессорного устройства дифференциальной защиты трансформатора «Сириус-Т» производства АО «РАДИУС Автоматика» в среде MatLab. При этом предлагается уделить большое внимание именно алгоритмам цифровой обработки сигнала. В работе будет рассмотрено и смоделировано несколько математических моделей цифровых фильтров с последующим выбором наиболее приемлемой, а также сравнение с результатами, полученными на реальном устройстве.

## 1 ОБЗОР МИКРОПРОЦЕССОРНОГО ТЕРМИНАЛА «СИРИУС-Т»

Устройство микропроцессорной защиты «Сириус-Т» предназначено для выполнения функций основной защиты двухобмоточного (в том числе с расщепленной обмоткой) трансформатора с высшим напряжением 35-220 кВ. Возможно использование устройства в качестве дифференциальной защиты реактора или мощного синхронного двигателя.

Устройство может быть установлено на панелях и в шкафах в релейных залах и пультах управления электростанций и подстанций 35-220 кВ.

Основные характеристики микропроцессорного устройства приведены в табл.1.1 [1].

Таблица 1.1 - Основные характеристики терминала «Сириус-Т»

Наименование параметра	Значение
1. Входные аналоговые сигналы	
число входов по току	6
номинальный ток фаз, А	5
максимальный контролируемый диапазон токов, А	0,2-500
рабочий диапазон токов, А	1,0-200
основная относительная погрешность измерения токов в фазах, %	±3
частота переменного тока, Гц	50±0,5
потребляемая мощность входных цепей для фазных токов в номинальном режиме, В·А, не более:	0,01
2. Входные дискретные сигналы	
число входов	21
входной ток, мА, не более	20
напряжение надежного срабатывания (исполнение 220 В DC), В	170-264
напряжение надежного несрабатывания (исполнение 220 В DC), В	0-158
напряжение возврата (исполнение 220 В DC), В	140-150
длительность сигнала, мс, не менее	20
3. Выходные дискретные сигналы управления	
количество выходных реле	12
коммутируемое напряжение переменного или постоянного тока, В, не более	300
длительно допустимый ток, А	6
ток замыкания, А	
с длительностью протекания 1,0 с	12
с длительностью протекания 0,2 с	30
с длительностью протекания 0,03 с	40



## 1.1 Эксплуатационные возможности устройства

Устройство является комбинированным микропроцессорным терминалом релейной защиты и автоматики, который обеспечивает следующие эксплуатационные возможности:

а) выполнение функций защит, автоматики и управления, определенных в соответствии с требованиями правил устройства электроустановок (ПУЭ) и правил технической эксплуатации (ПТЭ);

б) задание внутренней конфигурации, что означает возможность ввода и вывода защит и автоматики, а также выбор защитных характеристик;

в) возможность изменения внутренней конфигурации устройства при помощи программируемых дискретных входов;

г) ввод и хранение уставок защит и автоматики, вне зависимости от наличия питающего напряжения, поскольку используется flash-память;

д) возможность удаленного переключения между двумя наборами уставок по дискретному входу;

е) запись во внутреннюю память устройства осциллограмм всех измеряемых токов, дифференциальных и тормозных токов по каждой фазе, а также состояние дискретных входов и выходов при помощи аварийного осциллографа;

ж) передачу параметров аварии, а также ввод и изменение уставок по линии связи;

з) непрерывный оперативный контроль работоспособности в течение всего времени работы, а также блокировку всех выводов в случае неисправности устройства для предотвращения ложных срабатываний;

и) интеграция с терминалами других защит с возможностью получения дискретных сигналов управления и блокировок, а также выдача команд управления, аварийной и предупредительной сигнализации.

Благодаря примененной в устройстве модульной микропроцессорной архитектуре и современным технологиям поверхностного монтажа терминал

обладает такими преимуществами как высокая надежность, быстродействие, большая вычислительная мощность, а также высокая точность измерения электрических величин и временных интервалов. Это позволяет снизить ступени селективности и повысить чувствительность терминала, что очень важно для дифференциальной защиты трансформатора

Достоинством устройства является отсутствие ложных срабатываний и повреждений при неисправностях в цепях оперативного тока, а также при исчезновении оперативного напряжения на входе питания терминала на промежутке времени любой длительности и при последующим восстановлении оперативного питания [1].

## 1.2 Основная функция устройства

Основной функцией устройства является двухступенчатая дифференциальная токовая защита трансформатора. Первая ступень (ДЗТ-1) включает в себя быстродействующую дифференциальную токовую отсечку. Вторая ступень (ДЗТ-2) - чувствительная дифференциальная токовая защита с торможением от сквозного тока и отстройкой от бросков тока намагничивания.

Дифференциальные и тормозные токи в устройстве (с учетом принятых положительных направлений токов в трансформаторе, рис.1.1) рассчитываются по следующим выражениям

$$I_{\text{ДИФ}} = |\dot{I}_1 + \dot{I}_2|; \quad (1.1)$$

$$I_{\text{ТОРМ}} = 0,5 \cdot |\dot{I}_1 - \dot{I}_2|, \quad (1.2)$$

где  $\dot{I}_1, \dot{I}_2$  - векторы токов плеч защиты.

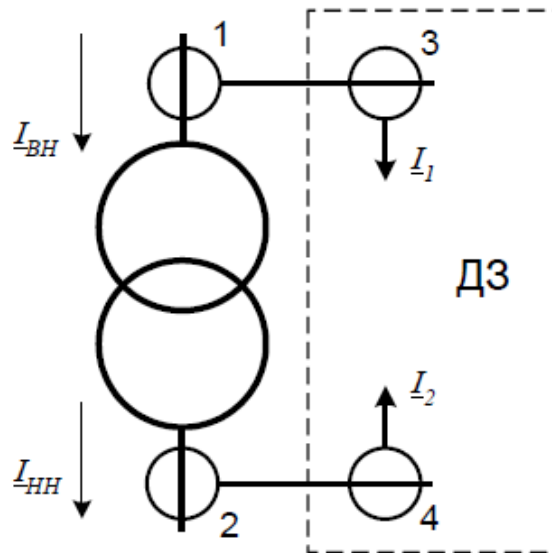


Рисунок 1.1 - Принятые положительные направления токов в трансформаторе:  
1 и 2 - измерительные ТТ сторон ВН и НН; 3 и 4 - цифровые ТТ внутри устройства

Принятый в выражении (1.2) способ формирования тормозного тока обеспечивает правильное функционирование защиты как при одностороннем, так и при двустороннем питании защищаемого трансформатора. Так, например, при коротком замыкании (КЗ) в зоне действия защиты при наличии подпитки точки КЗ с двух сторон в защите будет сформирован нулевой тормозной ток, при котором обеспечивается наибольшая чувствительность, что особенно важно для обнаружения витковых замыканий в трансформаторе.

Как известно, важной особенностью продольной дифференциальной защиты трансформатора является фазовый сдвиг векторов токов плеч вследствие различия групп соединения обмоток. В терминале «Сириус-Т» данная проблема решена путем компенсации фазового сдвига с помощью внутренних цифровых трансформаторов тока. Цифровое выравнивание фаз предписывает осуществлять электрическое соединение измерительных ТТ сторон высшего напряжения (ВН) и низшего напряжения (НН) всегда в "звезду", что уменьшает их нагрузку и обеспечивает корректную работу устройства.

При выборе уставок коррекции фазового сдвига необходимо учитывать принятые положительные направления токов, группу сборки обмоток силового трансформатора, тип подключения ТТ к схеме дифференциальной защиты.

На данный момент в российской электроэнергетике применяются три группы сборки обмоток двухобмоточных трансформаторов: звезда - звезда, звезда - треугольник, треугольник - треугольник. Наиболее часто встречаемыми являются нулевая и одиннадцатая группы соединения обмоток.

Поскольку измерительные трансформаторы тока необходимо обязательно соединять в "звезду", возможны только две группы соединения обмоток ТТ - нулевая и шестая, что отражено на рис.1.2. Из этого следует, что имеется только два варианта подключения трансформаторов тока к дифференциальной защите трансформатора, выполненной на базе терминала «Сириус-Т». Варианты представлены на рис.1.3.

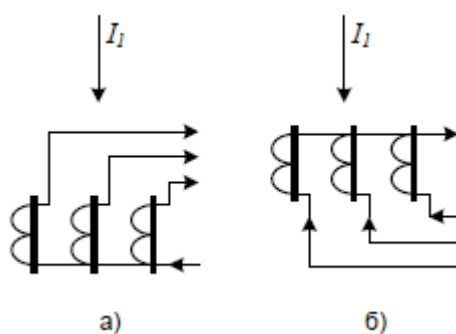


Рисунок 1.2 - Соединение ТТ в нулевую (а) и в шестую (б) группы

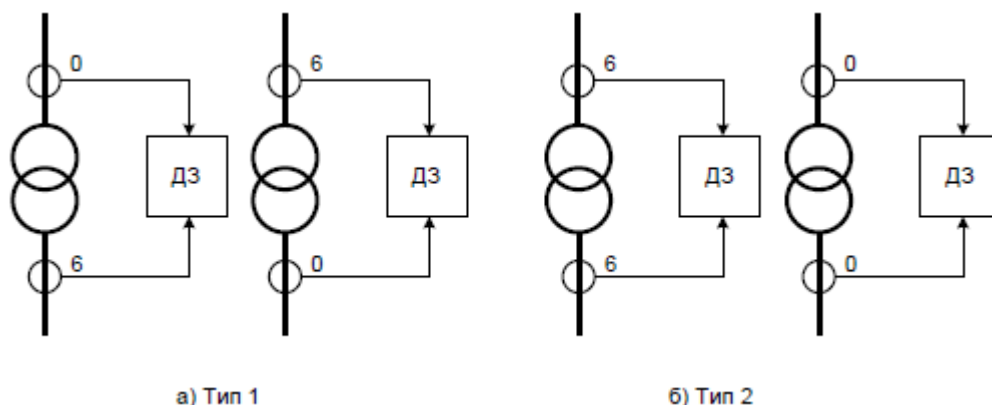


Рисунок 1.3 - Два типа подключения ТТ к схеме дифференциальной защиты

Таким образом, для правильной работы коррекции фазового сдвига необходимо по таблицам, приведенных в [1], выбрать группы внутренней цифровой сборки токовых цепей, учитывая реальную схему соединения обмоток силового трансформатора и группу соединения измерительных трансформаторов тока. Важно отметить, что в сети с заземленной нейтралью на стороне обмотки силового трансформатора, соединенной по схеме "звезда", цифровая сборка должна осуществляться обязательно в "треугольник", иначе возможно ложное срабатывание защиты при подпитке внешнего однофазного КЗ от нейтрали трансформатора. Однако в сетях с незаземленной нейтралью цифровую сборку на стороне обмотки, соединенной в "звезду", также следует производить в "звезду", так как это даёт небольшую прибавку к чувствительности защиты.

Помимо коррекции фазового сдвига, устройство обладает возможностью автоматической компенсации токов небаланса в дифференциальной цепи, вносимых работой устройства регулирования напряжения под нагрузкой (РПН). Это производится путем контроля соотношения токов плеч защиты в нагрузочном режиме (сравниваются только токи фазы А). Коррекция работает только при нагрузке не менее 30% от номинальной. Важно отметить, что коррекция работает медленно, поэтому она не функционирует при коротких замыканиях.

Для правильной работы коррекции погрешности, возникающей при изменении положения РПН трансформатора, необходимо задать базисные токи плеч защиты трансформатора, определить и задать размах РПН. За базисные токи плеч принимаются вторичные токи трансформаторов тока, рассчитанные по номинальной мощности трансформатора при среднем или "оптимальном" ответвлении РПН, определяемом по [2]. Размах РПН ограничивает "сверху" действие коррекции и принимается равным диапазону регулирования с помощью РПН.

Как уже отмечалось ранее, первой ступенью дифференциальной защиты является быстродействующая токовая отсечка, предназначенная для быстрого отключения повреждений, сопровождающихся большим дифференциальным током. Она работает без блокировок и не имеет торможения.

Ступень срабатывает, когда действующее значение первой гармоники дифференциального тока превышает заданную уставку ДЗТ-1, определяемую как отношение дифференциального тока к вторичному базисному току плеча ВН.

Помимо контроля действующего значения, устройство имеет возможность контролировать мгновенное значение дифференциального тока и при превышении уставки срабатывания ДЗТ-1 в 2,5 раза в течение 3 мс подавать сигнал на отключение выключателя. Преимуществом срабатывания дифференциальной отсечки по мгновенному значению дифференциального тока является более быстрое срабатывание, поскольку для корректной работы фильтра первой гармоники после возникновения КЗ необходимо не менее одного периода промышленной частоты (20 мс).

Также следует сказать о возможности введения задержки по времени срабатывания первой ступени защиты, если в этом имеется необходимость. Однако при нормальном использовании устройства рекомендуется устанавливать время задержки дифференциальной токовой отсечки, равным нулю [1].

Основные параметры первой ступени защиты ДЗТ-1 приведены в табл.1.2.

Таблица 1.2 - Основные параметры первой ступени ДЗТ-1

Наименование параметра	Значение
1. Диапазон изменения уставки по току, о.е.	4,0 - 30,0
2. Диапазон уставки по времени, с	0,00 - 3,00
3. Дискретность уставок: по току, о.е.	0,1
по времени, с	0,01
4. Время срабатывания при нулевой задержке, мс	20 - 35
5. Коэффициент возврата	0,95

Вторая степень дифференциальной защиты ДЗТ-2 является более чувствительной и выполняется с торможением. Помимо защиты трансформатора от повреждений, сопровождающихся большими токами, за счёт высокой чувствительности она способна выявлять межвитковые замыкания внутри трансформатора, при которых аварийные токи могут быть меньше номинальных.

Торможение означает изменение тока срабатывания защиты в зависимости от формируемого тормозного тока по выражению (1.2). Тормозная характеристика ступени, представленная на рис.1.4, представляет собой зависимость тока срабатывания защиты от величины тормозного тока и является границей разделения областей срабатывания и несрабатывания ступени ДЗТ-2. Если рассчитанное устройством по выражениям (1.1) и (1.2) соотношение токов  $I_{\text{диф}}/I_{\text{торм}}$  попадает в область срабатывания ступени, то есть лежит выше тормозной характеристики, происходит срабатывание защиты.

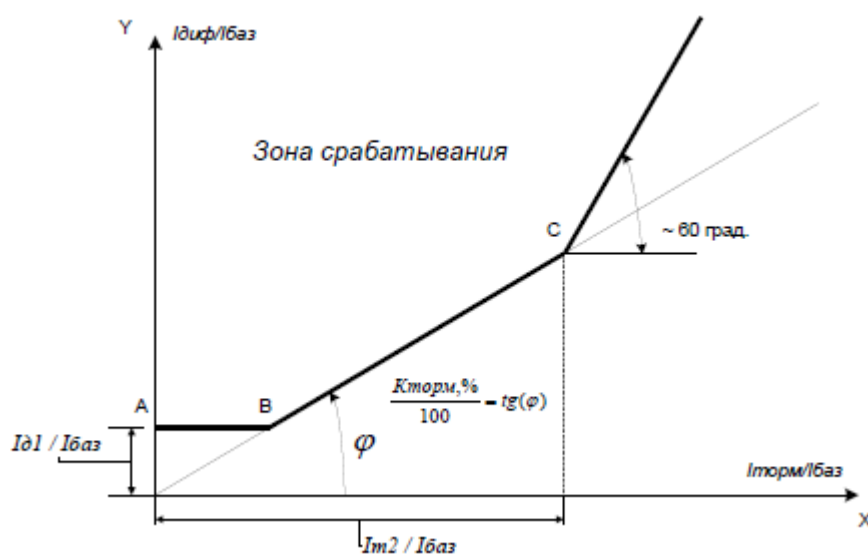


Рисунок 1.4 - Тормозная характеристика ступени ДЗТ-2

Таким образом, тормозная характеристика второй ступени устройства характеризуется тремя параметрами:

а) минимальный дифференциальный ток срабатывания, отнесенный к базисному току плеча ВН, предназначенный для отстройки ступени от токов небаланса и бросков тока намагничивания -  $I_{\partial 1}/I_{баз}$ ;

б) коэффициент торможения или тангенс угла наклона прямой второго участка тормозной характеристики -  $K_{торм}$ , %;

в) значение тормозного тока, отнесенного к базисному току плеча ВН, в точке второго излома тормозной характеристики -  $I_{m2}/I_{баз}$ .

Первый участок тормозной характеристики *AB* представляет прямую, параллельную оси абсцисс, что означает постоянный ток срабатывания. Второй участок тормозной характеристики определяется точками *B* и *C*. Точка *B* определяется устройством автоматически, как точка пересечения уставки минимального тока срабатывания ДЗТ-2  $I_{\partial 1}/I_{баз}$  и прямой, тангенс наклона которой равен  $K_{торм}/100$ , проходящей через начало координат и точку *C*. Точка *C* определяется уставкой второго излома характеристики  $I_{m2}/I_{баз}$ . Третий участок тормозной характеристики берёт начало в точке *C* и представляет собой прямую с углом наклона  $60^\circ$  по отношению к оси абсцисс.

Следует отметить, что при принятом в (1.2) способе формирования тормозного тока устройство будет осуществлять торможение даже при внутреннем КЗ при подпитке только с одной стороны. Однако, поскольку тормозной ток вдвое меньше дифференциального, чувствительность защиты все равно будет определяться участком *AB* тормозной характеристики.

Вторая ступень ДЗТ-2 оснащена блокировкой срабатывания при бросках тока намагничивания (БТН) трансформатора. В качестве признака БТН устройство используют гармонический состав дифференциального тока. Известно, что при БТН потребляемый трансформатором ток имеет высокое содержание второй гармоники. Эта особенность используется в терминале для обеспечения блокировки срабатывания ступени ДЗТ-2. Устройство контролирует отношение действующего значения второй гармоники к



действующему значению первой гармоники дифференциального тока и при превышении уставки срабатывания  $I_{\Delta 2}/I_{\Delta 1}$  блокирует срабатывание ступени.

Аналогично первой ступени, для ДЗТ-2 также имеется возможность введения задержки по времени срабатывания, если в этом есть необходимость. Однако в нормальном эксплуатационном режиме использования устройства рекомендуется устанавливать время задержки ступени ДЗТ-2, равным нулю [1].

Основные параметры второй ступени защиты ДЗТ-2 приведены в табл.1.3.

Таблица 1.3 - Основные параметры второй ступени ДЗТ-2

Наименование параметра	Значение
1. Диапазон изменения уставки по току, о.е.:	
$I_{\Delta 1}/I_{\Delta \text{баз}}$	0,3 - 1,0
$I_{m2}/I_{\Delta \text{баз}}$	1,0 - 3,0
$I_{\Delta 2}/I_{\Delta 1}$	0,06 - 1,00
2. Диапазона изменения коэффициента торможения $K_{\text{торм}}$ , %:	10 - 100
3. Диапазон уставки по времени, с	0,00 - 3,00
4. Дискретность уставок:	
$I_{\Delta 1}/I_{\Delta \text{баз}}$ , $I_{m2}/I_{\Delta \text{баз}}$	0,1
$I_{\Delta 2}/I_{\Delta 1}$	0,01
по времени, с	0,01
5. Время срабатывания при нулевой задержке, мс	45-65
6. Коэффициент возврата	0,85

Для выявления неисправностей во внешних цепях, в устройстве предусмотрена третья ступень ДЗТ-3, действующая на сигнализацию. Она контролирует действующее значение дифференциального тока всех трёх фаз и при превышении этого значения заданной уставки в течение заданного времени загорается светодиод, сигнализирующий о возникшей неисправности. Для корректной работы ступени уставку её срабатывание следует выбирать меньше, чем минимальный дифференциальный ток срабатывания ступени ДЗТ-2. Время срабатывание рекомендуется принимать равным нескольким секундам [1].

Основные параметры третьей ступени защиты ДЗТ-3 приведены в табл.1.4.

Таблица 1.4 - Основные параметры третьей ступени ДЗТ-3

Наименование параметра	Значение
1. Диапазон изменения уставки по току, о.е.	0,1 - 2,0
2. Диапазон уставки по времени, с	1 - 999
3. Дискретность уставок: по току, о.е. по времени, с	0,1 1

### 1.3 Дополнительные функции устройства

1.3.1 Терминал «Сириус-Т» может выполнять функции ненаправленной максимальной токовой защиты (МТЗ) сторон ВН и НН трансформатора. Для этого устройство осуществляет контроль фазных токов трансформатора на соответствующих сторонах.

Максимальная токовая защита стороны ВН имеет две ступени с независимыми времятоковыми характеристиками, что означает возможность выбора времени срабатывания каждой ступени.

Максимальная токовая защита стороны НН имеет одну ступень с независимой времятоковой характеристикой.

В соответствии с [3] трансформаторы тока, используемые для реализации максимальной токовой защиты, установленной на стороне высшего напряжения трансформатора с односторонним питанием, должны быть соединены по схеме "треугольник" для исключения неселективного срабатывания защиты при коротких замыканиях на землю в сетях 110-220 кВ. Однако, как уже было сказано ранее, подключаемые к терминалу измерительные трансформаторы должны быть соединены по схеме "звезда". Поэтому для обеспечения вышеуказанных требований в терминале имеется возможность цифровой сборки подводимых фазных токов из "звезды" в "треугольник" (используется 11-я группа сборки). Данную функцию следует использовать в сетях с эффективнозаземленной нейтралью. При этом расчет уставок следует производить, предполагая, что реальные трансформаторы тока на стороне ВН

соединены в "треугольник", поскольку преобразованные устройством величины токов на выходе "треугольника" превышают фазные значения в  $\sqrt{3}$  раз.

Для исключения ложного срабатывания ступеней максимальных токовых защит сторон ВН и НН трансформатора при бросках тока намагничивания, предусмотрена блокировка на основе второй гармонической составляющей дифференциального тока, как и для ступени дифференциальной защиты ДЗТ-2. Блокировка осуществляется отдельно для каждой ступени.

Ступени МТЗ сторон ВН и НН могут быть ускорены. Ускорение защит необходимо для сохранения эксплуатационных ресурсов оборудования и минимизации времени протекания аварийных токов и, например, может применяться в циклах автоматического повторного включения (АПВ). В устройстве ускорение ступеней МТЗ вводится автоматически на 3 с при появлении сигнала на программируемом дискретном входе от реле положения включено (РПВ) выключателя. Имеется возможность изменения выдержки времени ускорения МТЗ, но при этом она будет одинакова для всех ступеней стороны ВН или НН.

Из курса релейной защиты известно, что уставки максимальной токовой защиты выбираются из условия отстройки от максимальных рабочих токов, протекающих по защищаемому элементу. Во многих случаях токи срабатывания, выбранные по этому условию, не обеспечивают необходимый коэффициент чувствительности, регламентированный ПУЭ. Тогда для повышения коэффициента чувствительности возможно снижение тока срабатывания защиты и обеспечение требований селективности путем реализации МТЗ с комбинированным пуском по напряжению или МТЗ с пуском минимального напряжения (вольтметровой блокировкой) [1]. При использовании данной функции защита сработает только при наличии дискретного разрешающего сигнала от реле минимального напряжения (тем самым будет реализована вольтметровая блокировка) или со схемы, которая контролирует как линейные напряжения, так и напряжение обратной

последовательности. В последнем случае будет реализована схема комбинированного пуска по напряжению (рис.1.5).

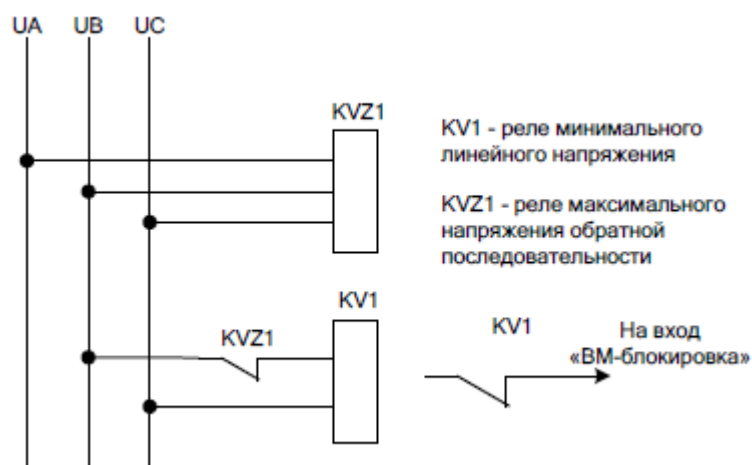


Рисунок 1.5 - Схема комбинированного пуска по напряжению

1.3.2 В терминале «Сириус-Т» предусматривается возможность совместной работы с другими видами защит трансформатора. Для этого предусматриваются дискретные входы, предназначенные для газовой защиты трансформатора, газовой защиты РПН и технологической защиты трансформатора. При получении сигнала от перечисленных выше защит действие исполнительного органа терминала на отключение выключателей происходит без выдержки времени. В терминале реализована возможность действия газовой защиты трансформатора на сигнал [1].

1.3.3 Для ликвидации повреждений в элементах сети, возникающих при отказе выключателя, в терминале реализована логика устройства резервирования при отказе выключателя (УРОВ) стороны ВН. Как и для большинства современных микропроцессорных защит функция УРОВ в терминале выполнена на основе индивидуального принципа, что означает наличие независимой логики УРОВ на каждом присоединении. Однако при необходимости имеется возможность использования терминала в централизованной схеме УРОВ, являющейся общей для всех выключателей одного напряжения на подстанции. УРОВ срабатывает с заданной выдержкой времени и действует на сигнал отключения смежных выключателей.

УРОВ осуществляет контроль факта отключения выключателя с помощью специального токового органа, контролирующего фазные токи на стороне ВН. Данный орган срабатывает при превышении заданной уставки УРОВ. Пуск логики возможен только при сработавшем органе тока.

В устройстве возможна реализация двух стандартных схем УРОВ: с автоматической проверкой исправности выключателя или с дублированным пуском от защит с использованием сигнала от РПВ [1].

В первом случае при пуске УРОВ сначала производится отключение выключателя заданного присоединения без выдержки времени и только в случае его отказа логика с заданной выдержкой времени выдает сигнал на отключение смежного выключателя. Схема позволяет в случае ошибочного запуска схемы УРОВ, связанного с действиями персонала, отключить только выключатель данного присоединения и избежать излишнего отключения других выключателей, поскольку в этом случае ток через "отказавший" выключатель прекратится, а значит токовый орган УРОВ вернется в исходное положение.

Во второй схеме логика УРОВ осуществляет контроль сигнала, поступающего с реле положения включено, которое осуществляет фиксацию действия защит. При исчезновении данного сигнала подразумевается факт срабатывания защиты, а значит в случае срабатывания токового органа произойдет пуск УРОВ.

1.3.4 Помимо вышеперечисленных функций терминал «Сириус-Т» может осуществлять защиту трансформатора от перегрузки с действием на сигнализацию путем контроля тока всех трёх фаз стороны ВН или НН [1].

Также устройство имеет возможность управлять обдувом трансформатора с системой охлаждения, включающую в себя принудительную циркуляцию воздуха. Эта функция терминала реализована для применения в случаях, когда шкаф автоматики управления обдувом неисправен или находится в ремонте.

## 2 МЕТОДИКА РАСЧЕТА УСТАВОК ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ ТРАНСФОРМАТОРА «СИРИУС-Т»

В данном разделе будет рассмотрена методика расчета уставок дифференциальной защиты двухобмоточного трансформатора «Сириус-Т», рекомендованная фирмой-изготовителем терминала АО «РАДИУС Автоматика».

### 2.1 Расчет общих уставок

В качестве общих уставок в устройстве принимаются базисные токи сторон ВН и НН, группы сборки цифровых ТТ и размах РПН.

Как уже отмечалось ранее, за базисные токи сторон ВН и НН принимаются вторичные токи соответствующих сторон. Для их расчета первоначально рассчитываются первичные токи сторон силового трансформатора по выражению:

$$I_{\text{ном.перв}} = \frac{S_{\text{ном}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном.ср}}},$$

где  $S_{\text{ном}}$  - номинальная мощность защищаемого силового трансформатора;  $U_{\text{ном.ср}}$  - номинальное напряжение стороны силового трансформатора в среднем положении РПН или напряжение в среднем положении оптимального диапазона регулирования РПН.

Под оптимальным диапазоном регулирования РПН понимается реально возможные отклонения регулятора от некоторого оптимального значения  $U_{\text{опт}}$ , которое характеризуется тем, что ему соответствуют равные по значению суммы составляющих тока небаланса при крайних, реально возможных отклонениях РПН в сторону увеличения и в сторону уменьшения напряжения регулируемой обмотки [2]. Однако в [2] составляющие тока небаланса находятся для защиты без торможения при наибольшем расчетном сквозном

токе (внешнем КЗ). В случае защиты «Сириус-Т» небалансы необходимо снижать в пределах первого и второго участков тормозной характеристики, которые характеризуются относительно небольшими сквозными токами. Именно поэтому при расчете первичных токов силового трансформатора понятие оптимального ответвления сводится к понятию середины реально используемого диапазона регулирования РПН. По аналогичным соображениям выбирается уставка размаха РПН.

Для трансформатора с расщепленной обмоткой НН первичный ток необходимо считать по полной мощности трансформатора, даже если обмотки выполнены на половину мощности трансформатора.

Вторичные токи трансформатора рассчитываются по формуле:

$$I_{\text{ном.вт}} = \frac{I_{\text{ном.перв}} \cdot k_{\text{сх}}}{K_I},$$

где  $k_{\text{сх}}$  - коэффициент схемы, учитывающий группы соединения вторичных обмоток трансформаторов тока;  $K_I$  - коэффициент трансформации ТТ соответствующей стороны.

Ранее было определено, что вторичные обмотки ТТ для подключения к терминалу рекомендуется соединять по схеме "звезда", коэффициент которой равен 1. Однако, если по каким-либо причинам необходимо соединение вторичных обмоток ТТ в "треугольник", коэффициент схемы в этом случае принимается равным  $\sqrt{3}$ .

Полученные значения вторичных номинальных токов трансформатора задаются в качестве базисных токов соответствующих сторон ВН и НН.

Важно проверить, чтобы рассчитанные базисные токи попадали в диапазон выравнивания, определяемый номинальным током устройства. Для терминала с номинальным током 5 А базисные токи должны входить в диапазон (1,01 - 10,00) А. Если базисный ток не попадает в указанный

диапазон, то использование защиты недопустимо ввиду того, что в данном случае не обеспечивается необходимая точность выравнивая входных токов.

## 2.2 Расчет уставок чувствительной ступени дифференциальной защиты трансформатора (ДЗТ-2)

В данном подразделе описан расчет уставок второй ступени дифференциальной защиты ДЗТ-2: минимальный дифференциальный ток срабатывания ступени ( $I_{д1}/I_{баз}$ ), коэффициент торможения ( $K_{\text{торм}}$ , %), значение тормозного тока в точке второго излома тормозной характеристики ( $I_{т2}/I_{баз}$ ), уставка блокировки от второй гармоники ( $I_{д2}/I_{д21}$ ).

2.2.1 Минимальный дифференциальный ток срабатывания ступени выбирается по условию отстройки от токов небаланса при протекании номинального тока трансформатора:

$$I_{д1}/I_{баз} \geq K_{\text{отс}} \cdot I_{\text{нб.расч}}^*$$

где  $K_{\text{отс}} = 1,2$  - коэффициент отстройки;  $I_{\text{нб.расч}}^*$  - расчетный ток небаланса в при протекании номинального тока трансформатора в о.е.

Согласно [2] расчетный ток небаланса, возникающий при протекании сквозных токов, состоит из трех составляющих:

$$I_{\text{нб.расч}}^* = |I'_{\text{нб}}| + |I''_{\text{нб}}| + |I'''_{\text{нб}}|, \quad (2.1)$$

где  $I'_{\text{нб}}$  - составляющая тока небаланса, обусловленная погрешностью трансформаторов тока;  $I''_{\text{нб}}$  - составляющая тока небаланса, обусловленная погрешностью, вносимой работой РПН (меняется соотношение токов плеч);  $I'''_{\text{нб}}$  - составляющая тока небаланса, обусловленная метрологическими погрешностями, вносимыми элементами устройства.



Первая составляющая тока небаланса рассчитывается по формуле:

$$I'_{\text{нб}}^* = k_{\text{пер}} k_{\text{одн}} \varepsilon, \quad (2.2)$$

где  $k_{\text{пер}}$  - коэффициент, учитывающий переходной режим (наличие апериодической составляющей тока);  $k_{\text{одн}}$  - коэффициент однотипности трансформаторов тока;  $\varepsilon$  - относительное значение полной погрешности трансформаторов тока в установившемся режиме.

Вторая составляющая тока небаланса определяется диапазоном регулирования РПН:

$$I''_{\text{нб}}^* = \Delta U_{\text{РПН}}, \quad (2.3)$$

где  $\Delta U_{\text{РПН}}$  - полный размах РПН, либо размах РПН, определенный относительно оптимального ответвления (если расчеты велись по реально используемому диапазону регулирования).

Третья составляющая тока небаланса определяется по выражению

$$I'''_{\text{нб}}^* = \Delta f_{\text{доб}}, \quad (2.4)$$

где  $\Delta f_{\text{доб}} = 0,04$  - расчетное значение метрологической погрешности, заданное фирмой-изготовителем.

Подставляя выражения (2.2), (2.3) и (2.4) в (2.1) получим итоговую формулу для расчета тока небаланса в относительных единицах:

$$I_{\text{нб.расч}}^* = k_{\text{пер}} k_{\text{одн}} \varepsilon + \Delta U_{\text{РПН}} + \Delta f_{\text{доб}}. \quad (2.5)$$

Несмотря на относительно небольшие уровни сквозных токов, если в общей нагрузке трансформатора двигательная доля составляет более 50%, разработчик рекомендует принимать  $k_{\text{пер}} = 2,5$ , при доле двигательной нагрузки менее 50 % переходной коэффициент принимается равным  $k_{\text{пер}} = 2,0$ .

Поскольку ТТ обтекаются сильно различающимися между собой токами коэффициент однотипности рекомендуется принимать равным  $k_{\text{одн}} = 1,0$ .

Относительное значение полной погрешности трансформатора тока рекомендуется принимать равным  $\varepsilon = 0,05$ , поскольку расчетным режимом является протекание номинальных токов.

В устройстве имеется возможность автоматической коррекции погрешности, вносимой работой РПН. В случае её действия  $\Delta U_{\text{РПН}}$  не превышает 0,04. Однако, как уже отмечалось ранее, коррекция действует медленно и не работает при малой нагрузке трансформатора. Поэтому при расчете второй составляющей тока небаланса принимается случай отсутствия работы подстройки. Действие коррекции создаст дополнительный запас по отстройке от токов небаланса.

Для обеспечения чувствительности к полным витковым замыканиям в переплетенных обмотках и к межкатушечным замыканиям в любых обмотках значение минимального дифференциального тока срабатывания должно лежать в диапазоне (0,3-0,5). Если полученное по выражению (2.5) значение меньше 0,3, то необходимо принять уставку  $I_{\text{д1}}/I_{\text{баз}} = 0,3$  для обеспечения отстройки от бросков тока намагничивания.

2.2.2 Коэффициент торможения выбирается из условия несрабатывания второй ступени дифференциальной защиты трансформатора при протекании сквозных токов, соответствующих второму участку тормозной характеристики (рис.1.4) и в соответствии с табл.1.3 лежащих в диапазоне от 1,0 до 3,0 относительно базисного тока. Такие токи, как правило, возникают при пуске мощных двигателей, а также в режимах их самозапуска, появляющихся при работе автоматики автоматического ввода резерва (АВР) и автоматического повторного включения (АПВ) питающих линий.

Протекающий через трансформатор сквозной ток может вызвать дифференциальный ток в защите, равный току небаланса:

$$I_{\text{диф}} = I_{\text{нб.расч}} = I_{\text{нб.расч}}^* \cdot I_{\text{скв}} = (k_{\text{пер}}k_{\text{одн}}\varepsilon + \Delta U_{\text{РПН}} + \Delta f_{\text{доб}}) \cdot I_{\text{скв}}, \quad (2.6)$$

где  $I_{\text{скв}}$  - величина сквозного тока, протекающего через трансформатор.

Поскольку протекающие токи превышают номинальные, на втором участке тормозной характеристики относительное значение полной погрешности трансформатора тока рекомендуется принимать равным  $\varepsilon = 0,1$ , что соответствует максимальной погрешности ТТ, выбранных по кривым предельной кратности. Остальные коэффициенты принимаются такими же, как в п.2.2.1.

Для оценки величины тормозного тока, формируемого защитой при протекании сквозного тока, вызывающего появление тока небаланса  $I_{\text{нб.расч}}$ , рекомендуется принять, что один ТТ работает точно, а второй имеет погрешность, равную  $I_{\text{диф}}$ . Данный вариант является наиболее удобным для расчета. С учетом выражения (1.2) тормозной ток равен:

$$I_{\text{торм}} = \frac{I_{\text{скв}} + (I_{\text{скв}} - I_{\text{диф}})}{2} = I_{\text{скв}} - \frac{I_{\text{диф}}}{2}. \quad (2.7)$$

Далее вводится понятие коэффициента снижения тормозного тока, показывающего снижение тормозного тока за счет возникающих небалансов:

$$K_{\text{сн.торм}} = \frac{I_{\text{торм}}}{I_{\text{скв}}}. \quad (2.8)$$

При подстановке выражений (2.6), (2.7) в (2.8) получается:

$$K_{\text{сн.торм}} = 1 - 0,5 \cdot (k_{\text{пер}}k_{\text{одн}}\varepsilon + \Delta U_{\text{РПН}} + \Delta f_{\text{доб}}) = 1 - 0,5 \cdot I_{\text{нб.расч}}^* \quad (2.9)$$

Для надежной отстройки второй ступени защиты от токов небаланса, коэффициент торможения должен быть выбран исходя из условия:

$$K_{\text{торм}} \geq K_{\text{отс}} \cdot \frac{I_{\text{диф}}}{I_{\text{торм}}} \cdot 100. \quad (2.10)$$

Подстановка (2.6), (2.8) и (2.9) в выражение (2.10) позволяет получить итоговое выражение для расчета коэффициента торможения:

$$K_{\text{торм}} \geq K_{\text{отс}} \cdot \frac{I_{\text{нб.расч}}^*}{K_{\text{сн.торм}}} \cdot 100.$$

2.2.3 Уставку тормозного тока в точке второго излома характеристики срабатывания второй ступени  $I_{\text{T2}}/I_{\text{баз}}$  рекомендуется принимать равной в диапазоне (1,5-2,0). В соответствии с указанным диапазоном во второй участок тормозной характеристики попадают режимы номинальных нагрузок, допустимых длительных и кратковременных перегрузок. В перечисленных режимах тормозной ток практически равен сквозному, при этом возникновение витковых замыканий незначительно повлияет на первичные, а значит и на тормозные токи. Это гарантирует высокую чувствительность к витковым КЗ в нагрузочных режимах, что и объясняет значение рекомендуемого диапазона уставки срабатывания тормозного тока в точке второго излома характеристики срабатывания.

Значение тормозного тока в точке первого излома характеристики срабатывания вычисляется устройством автоматически по выражению:

$$I_{\text{T1}}/I_{\text{баз}} = (I_{\text{д1}}/I_{\text{баз}}) \cdot 100/K_{\text{торм}}. \quad (2.11)$$

При расчете уставок следует убедиться, чтобы значение  $I_{\text{T1}}/I_{\text{баз}}$  не превышало  $I_{\text{T2}}/I_{\text{баз}}$ , что возможно при больших значениях минимального дифференциального тока срабатывания ступени  $I_{\text{д1}}/I_{\text{баз}}$ .

2.2.4 Уставку блокировки по второй гармонике  $I_{дг2}/I_{дг1}$  фирма-изготовитель рекомендует принимать равной в диапазоне (0,12-0,15). Данное решение основано на опыте эксплуатации других фирм, использующих подобные защиты.

### 2.3 Расчет уставок дифференциальной токовой отсечки (ДЗТ-1)

В данном подразделе описана методика расчета уставки срабатывания дифференциальной отсечки  $I_{диф}/I_{баз}$ . Она выбирается исходя из отстройки от бросков тока намагничивания трансформатора и от максимального тока небаланса, возникающего при переходном режиме расчетного внешнего КЗ.

Поскольку первая ступень дифференциальной защиты не предусматривает блокировку по второй гармонической составляющей, что позволяет сильно снизить минимальный ток срабатывания, для отстройки от БТН необходимо выполнение условия [2]:

$$I_{диф}/I_{баз} \geq 6,0. \quad (2.12)$$

Условие (2.12) автоматически обеспечивает несрабатывание отсечки по мгновенному значению при БТН, уставка которой равна  $2,5 \cdot I_{диф}/I_{баз}$ .

Аналогично выражению (2.6) для отстройки от токов небаланса при внешнем КЗ:

$$I_{диф}/I_{баз} \geq K_{отс} (k_{пер} k_{одн} \varepsilon + \Delta U_{РПН} + \Delta f_{доб}) \cdot I_{кз.мах}^*,$$

где  $I_{кз.мах}^*$  - расчетный максимально возможный ток, протекающий через трансформатор, при внешнем коротком замыкании, приведенный в о.е.

Для данной ступени коэффициент отстройки принимается равным  $K_{отс} = 1,5$ . Коэффициент, учитывающий переходной режим рекомендуется брать равным  $k_{пер} = 3,0$ . Все остальные величины следует брать такими же, как при расчете токов небаланса по выражению (2.6).

### **3 ОБЗОР АЛГОРИТМОВ РАБОТЫ ЦИФРОВЫХ ФИЛЬТРОВ МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ УСТРОЙСТВ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ**

Одним из главных элементов микропроцессорного терминала релейной защиты является цифровой фильтр, так как именно он осуществляет вычисление величин, на основании которых алгоритмы устройства формируют дифференциальные и тормозные токи, если речь идёт о продольной дифференциальной защите. Для терминала «Сириус-Т» главной задачей цифрового фильтра является определение модуля и начальной фазы вектора сигнала тока, подводимого от аналого-цифрового преобразователя (АЦП). На данный момент существует множество алгоритмов определения амплитуды и начальной фазы дискретного гармонического сигнала. В данном разделе будет рассмотрено математическое описание алгоритмов, наиболее часто встречающихся в измерительных органах микропроцессорных устройств дифференциальных защит. Эти алгоритмы могут быть использованы при дальнейшем построении модели устройства «Сириус-Т».

#### **3.1 Общие принципы**

Исходный сигнал тока, поступающий с ТТ, является аналоговым, что означает его непрерывность во времени. В АЦП происходит оцифровка данного сигнала, что означает замену исходного непрерывного сигнала дискретным рядом значений. Отдельное число, взятое в определенный дискретный момент времени, называется отсчётом сигнала. Промежуток времени между двумя отсчётами носит название периода дискретизации [4]. Период дискретизации позволяет вычислить важную для анализа цифровых сигналов величину - частоту дискретизации:

$$f_s = \frac{1}{T},$$

где  $T$  - период дискретизации сигнала.

Для фильтров, работающих с синусоидальными сигналами, целесообразно ввести такую величину, как число отсчетов за период промышленной частоты ( $N$ ). Тогда период дискретизации сигнала можно вычислить, используя выражение:

$$T = \frac{1}{f_0 N},$$

где  $f_0$  - частота основной гармоники сети, Гц.

В этом случае аналоговому сигналу вида  $u(t) = \sin(2\pi f_0 t)$  соответствует цифровой сигнал  $u(nT) = \sin\left(\frac{2\pi n}{N}\right)$ , при этом непрерывный ряд времени  $t$  заменяется дискретными значениями  $nT$ , где  $n$  - целое число, соответствующее номеру отсчёта [5].

Из курса теоретических основ электротехники известно, что векторное изображение синусоидального сигнала можно описать с помощью его проекций на оси комплексной плоскости. В таком случае оцифрованный синусоидальный сигнал тока можно представить в виде:

$$\dot{I}(nT) = I_x(nT) + jI_y(nT), \quad (3.1)$$

где  $I_x$  - проекция вектора тока на вещественную ось в момент времени  $nT$ ;  $I_y$  - проекция вектора тока на мнимую ось в момент времени  $nT$ .

Величины  $I_x, I_y$  в литературе часто называются ортогональными компонентами сигнала. Определение этих компонентов является основной задачей цифровых фильтров микропроцессорных терминалов, поскольку это позволяет выполнить расчет модуля и начальной фазы векторного изображения синусоидального сигнала в любой момент времени:

$$\begin{cases} I(nT) = \sqrt{I_x^2(nT) + I_y^2(nT)}; \\ \varphi_I(nT) = \arctg\left(\frac{I_y}{I_x}\right), \text{ если } I_x > 0; \\ \varphi_I(nT) = \pi + \arctg\left(\frac{I_y}{I_x}\right), \text{ если } I_x < 0. \end{cases} \quad (3.2)$$

Графическая интерпретация соответствия дискретного представления синусоидального сигнала и его векторного изображения приведена на рис.3.1 [6].

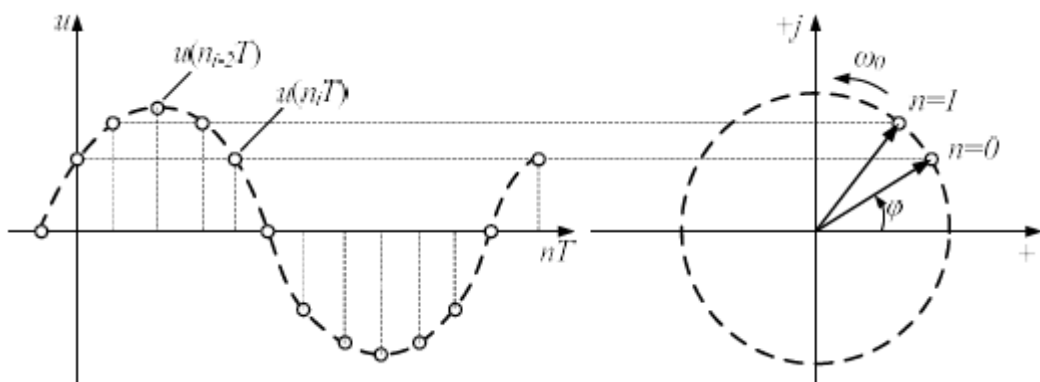


Рисунок 3.1 - Соответствие дискретного синусоидального сигнала и вращающегося вектора

Далее будет рассмотрено три способа определения ортогональных компонент полезного сигнала, наиболее часто применяющихся в микропроцессорных устройствах релейной защиты: метод наименьших квадратов (МНК), дискретное преобразование Фурье (ДПФ) и формирование ортогональных составляющих (ФОС).

### 3.2 Метод наименьших квадратов

Во многих алгоритмах входной дискретный сигнал тока, помимо стандартной формы  $i(nT) = I_m \sin\left(\frac{2\pi n}{N} + \varphi\right)$ , с помощью тригонометрических соотношений принято представлять в виде:



$$i(nT) = I_m \sin\left(\frac{2\pi n}{N} + \varphi\right) = I_m \sin\left(\frac{2\pi n}{N}\right) \cos \varphi + I_m \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right) \sin \varphi ;$$

$$i(nT) = I_x \sin\left(\frac{2\pi n}{N}\right) + I_y \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right). \quad (3.3)$$

В методе наименьших квадратов входной сигнал тока представляется состоящим из полезного синусоидального сигнала промышленной частоты, аperiodической составляющей в виде затухающей экспоненты, накладывающейся на полезный сигнал при коротких замыканиях, и синусоидального сигнала 3-ой гармоники, вызванного насыщением трансформаторов тока, наличием несинусоидальных потребителей и иными причинами [7]:

$$i(nT) = I_a e^{\frac{nT}{\tau}} + I_{m1} \sin\left(\frac{2\pi n}{N} + \varphi_1\right) + I_{m3} \sin\left(\frac{6\pi n}{N} + \varphi_3\right),$$

где  $I_a$  - амплитуда экспоненциальной составляющей сигнала;  $\tau$  - постоянная времени затухания экспоненциальной составляющей;  $I_{m1}$  - амплитуда первой гармоники сигнала;  $\varphi_1$  - начальная фаза первой гармоники сигнала;  $I_{m3}$  - амплитуда третьей гармоники сигнала;  $\varphi_3$  - начальная фаза третьей гармоники сигнала.

В данном подходе входной сигнал несколько идеализирован, поскольку в нем отсутствуют высшие гармонические составляющие, однако для понимания сути методики этого вполне достаточно.

Аperiodическую составляющую в виде затухающей экспоненты предлагается разложить в ряд Тейлора, используя первые три члена ряда:

$$e^{\frac{nT}{\tau}} = 1 - \frac{nT}{\tau} + \frac{(nT)^2}{\tau^2}.$$

Гармонические составляющие сигнала предлагается преобразовать в вид, представленный в выражении (3.3).

Тогда входной сигнал тока:

$$i(nT) = I_a \left( 1 - \frac{nT}{\tau} + \frac{(nT)^2}{\tau^2} \right) + I_{x1} \sin\left(\frac{2\pi n}{N}\right) + I_{y1} \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right) + \\ + I_{x3} \sin\left(\frac{6\pi n}{N}\right) + I_{y3} \cos\left(\frac{6\pi n}{N}\right).$$

Данное выражение можно записать для всех отсчётов  $n=1,2,\dots,N$  в матричном виде  $Y = AX$ :

$$\begin{pmatrix} i(T) \\ i(2T) \\ i(3T) \\ \dots \\ i(nT) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & T & T^2 & \sin(2\pi/N) & \cos(2\pi/N) & \sin(6\pi/N) & \cos(6\pi/N) \\ 1 & 2T & 4T^2 & \sin(4\pi/N) & \cos(4\pi/N) & \sin(12\pi/N) & \cos(12\pi/N) \\ 1 & 3T & 9T^2 & \sin(6\pi/N) & \cos(6\pi/N) & \sin(18\pi/N) & \cos(18\pi/N) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & nT & (nT)^2 & \sin(2\pi n/N) & \cos(2\pi n/N) & \sin(6\pi n/N) & \cos(6\pi n/N) \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \\ X_5 \\ X_6 \\ X_7 \end{pmatrix},$$

где  $Y$  - вектор-столбец значений сигнала;  $A$  - матрица коэффициентов;  $X$  - вектор-столбец неизвестных, в котором приняты следующие обозначения  $X_1 = I_a$ ;  $X_2 = -\frac{I_a}{\tau}$ ;  $X_3 = \frac{I_a}{2\tau^2}$ ;  $X_4 = I_{x1}$ ;  $X_5 = I_{y1}$ ;  $X_6 = I_{x3}$ ;  $X_7 = I_{y3}$ .

В общем виде решение квадратной матричной системы уравнений вида  $Y = AX$  записывается в виде:

$$X = A^{-1}Y, \quad (3.4)$$

где  $A^{-1}$  - матрица, обратная  $A$ .

Современные микропроцессорные устройства выполняют более 20 отсчётов за период промышленной частоты, т.е.  $N \geq 20$ . Это означает, что число уравнений превышает число неизвестных, а матрица  $A$  является

прямоугольной, а не квадратной, поэтому решение в виде (3.4) невозможно. Такие системы уравнений называются переопределенными и характеризуются тем, что не имеют точного решения. Поэтому необходимо отыскать такой вектор-столбец  $X$ , который будет наилучшим образом удовлетворять всем уравнениям, в этом и состоит общий принцип метода наименьших квадратов.

Для переопределенных систем уравнений решением с минимальной ошибкой является применение псевдообратной матрицы [8]:

$$X = A^+Y,$$

где  $A^+ = (A^T A)^{-1} A^T$  - матрица, псевдообратная  $A$ ;  $A^T$  - транспонированная матрица  $A$ .

В результате исходная матрица коэффициентов  $A$ , состоящая из  $N$  строк и 7 столбцов, преобразуется в псевдообратную матрицу, состоящую из 7 строк и  $N$  столбцов, что делает возможным получение приближенного решения в виде вектора-столбца.

Решение системы уравнений в каждый дискретный момент времени  $nT$  позволяет соответственно получать ортогональные компоненты полезного сигнала основной гармоники в виде 4-й и 5-й строчек вектора-столбца  $X$ . По известным проекциям вектора на оси комплексной плоскости по формулам (3.2) вычисляются модуль и начальная фаза векторного изображения сигнала.

Следует отметить, что включение в структуру входного сигнала именно 3-й гармоники необязательно. Например, устройство «Сириус-Т» помимо основной гармоники промышленной частоты выделяет действующее значение второй гармоники. Это реализуется путем изменения в исходной матрице  $A$  коэффициентов 3-й гармоники на коэффициенты 2-ой. В таком случае вычисление действующего значения второй гармоники производится с использованием 6-ой и 7-ой строчек решения  $X$ , представляющие ортогональные компоненты сигнала.

### 3.3 Формирование ортогональных составляющих

В основе данного алгоритма лежат принципы, заложенные в методе наименьших квадратов, описанного выше. В МНК число уравнений превышало число неизвестных, за счёт чего система была переполнена. В основе метода ФОС предлагается зафиксировать на конечном интервале отсчётов длительностью в один период промышленной частоты четное число выборок сигнала  $L$ . Это позволяет сформировать квадратную матрицу коэффициентов  $A$  размером  $L \times L$  и по выражению (3.4) найти вектор-столбец неизвестных. Количество неизвестных определяется числом  $L$ . В таком случае входной сигнал предлагается представлять в виде [5]:

$$i(nT) = I_a \left(1 - \frac{nT}{\tau}\right) + \sum_{k=1}^{M/2} \left[ I_{xk} \sin\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) + I_{yk} \cos\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) \right],$$

где  $k$  - номер гармоники;  $M = L - 2$  - количество столбцов, приходящихся на гармонические составляющие сигнала;  $I_{xk}, I_{yk}$  - ортогональные составляющие сигнала  $k$ -ой гармоники.

Таким образом, входной сигнал состоит из экспоненциальной аperiodической составляющей, представленной в виде первых двух членов ряда Тейлора, и  $M/2$  гармонических составляющих.

После формирования матрицы коэффициентов  $A$  и вектора-столбца значений сигнала  $Y$  длиной  $L$  по выражению (3.4) отыскивается решение в виде вектора-столбца  $X$ ,  $M$  строчек которого представляют ортогональные составляющие  $M/2$  гармоник сигнала. Далее по выражению (3.2) рассчитываются модуль и начальная фаза векторного изображения сигнала тока нужной гармоники.

Следует отметить, что от выбора числа  $L$  зависит число компонентов гармоник в матрице коэффициентов  $A$ , от которого зависит качество фильтрации. Учет большего большого числа высших гармоник отрицательно

сказывается на точности вычисления, а значит и на качестве фильтрации. Поэтому в итоговой модели сигнала целесообразно учитывать гармоники не выше 7-8-й, а остальные принимать равными нулю.

### 3.4 Дискретное преобразование Фурье

Дискретное преобразование Фурье является наиболее распространенным методом цифровой обработки сигнала за рубежом, при этом данный алгоритм находит множество применений во всех сферах, в которых необходимо осуществлять обработку цифровых сигналов. В данном подразделе будет рассмотрено частное применение ДПФ, получившее название корреляционного метода и наиболее часто применяемого в микропроцессорных устройствах релейной защиты [9].

Суть данного метода предлагается понять с использованием упрощенной модели сигнала, состоящей только из синусоиды промышленной частоты. На основе выражения (3.2) входной сигнал представляется в виде:

$$i(nT) = I_{x1} \sin\left(\frac{2\pi n}{N}\right) + I_{y1} \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right) = \sqrt{I_{x1}^2 + I_{y1}^2} \sin\left(\frac{2\pi n}{N} + \varphi\right).$$

Для получение векторного изображения  $k$ -ой гармоники сигнала предлагается провести следующие действия [9]:

$$\begin{aligned} \dot{I}_k(nT) &= \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} i(nT) \cdot \left[ \sin\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) + j \cos\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) \right] = \\ &= I_{xk}(nT) + j I_{yk}(nT). \end{aligned} \quad (3.5)$$

Идею данного преобразования можно понять, рассмотрев принцип квадратурной дискретизации сигнала, предложенный в [4]. Например, для выделения ортогональных составляющих первой гармоники предлагается входной сигнал умножить на сдвинутые относительно друг друга на  $90^\circ$  гармонические функции с нулевой начальной фазой и частотой колебаний,

равной частоте выделяемой гармонике (рис.3.2). Результат каждого из умножений содержит две составляющие, одна из которых имеет удвоенную относительно выделяемой гармонике частоту колебаний:

$$i(t) \cos(\omega_0 t) = I_m \sin(\omega_0 t + \varphi) \cos(\omega_0 t) = \\ = 0,5 \cdot [I_m \sin(\varphi) + I_m \sin(2\omega_0 t + \varphi)] = 0,5 \cdot I_y + 0,5 \cdot I_m \sin(2\omega_0 t + \varphi);$$

$$i(t) \sin(\omega_0 t) = I_m \sin(\omega_0 t + \varphi) \sin(\omega_0 t) = \\ = 0,5 \cdot [I_m \cos(\varphi) - I_m \cos(2\omega_0 t + \varphi)] = 0,5 \cdot I_x - 0,5 \cdot I_m \cos(2\omega_0 t + \varphi).$$

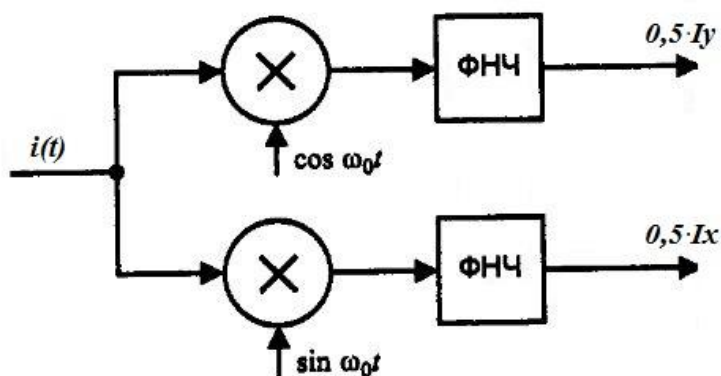


Рисунок 3.2 - Квадратурная дискретизация сигнала

Таким образом, для получения вещественной и мнимой частей векторного изображения сигнала нужно после перемножения пропустить результаты через фильтр нижних частот (ФНЧ) для устранения второй гармоники. Полученные в результате сигналы пропорциональны ортогональным составляющим векторного изображения сигнала.

В ДПФ применен аналогичный принцип. При замене непрерывного ряда  $t$  на дискретные значения  $nT$  все приведенные выше тригонометрические соотношения остаются справедливыми. Поскольку сигнал двойной частоты колеблется вокруг установившегося значения, роль ФНЧ в выражении (3.5) выполняет осреднение суммы полученных значений за период промышленной частоты. Поскольку на выходе данных преобразований получаются половины ортогональных составляющих сигнала, для получения полной амплитуды результат осреднения умножается на 2.

По формуле (3.5) итоговые выражения для расчета проекций векторного изображения синусоидального сигнала  $k$ -той гармоники будут выглядеть следующим образом:

$$\begin{cases} I_x(nT) = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} i(nT) \cdot \sin\left(\frac{2\pi kn}{N}\right); \\ I_y(nT) = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} i(nT) \cdot \cos\left(\frac{2\pi kn}{N}\right). \end{cases}$$

Далее по известным проекциям вектора на оси комплексной плоскости по формулам (3.2) вычисляются модуль и начальная фаза векторного изображения сигнала нужной гармоники.

## **4 РЕАЛИЗАЦИЯ МОДЕЛИ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ В СРЕДЕ MATLAB**

В данном разделе необходимо осуществить разработку модели дифференциальной защиты трансформатора на базе устройства микропроцессорного терминала «Сириус-Т» в среде MatLab. Для этого необходимо реализовать с помощью математических и логических операторов описанные выше алгоритмы в виде кода программы.

Модель устройства условно можно разделить на два блока. Первый блок - основной (логический). В нем будут реализованы алгоритмы работы самой защиты, то есть сравнение рассчитанного дифференциального тока с заданными уставками, осуществление торможения, блокировка срабатывания защиты при БТН.

Второй блок - измерительный. Его основная функция - расчет модуля и начальной фазы векторного изображения подаваемого на вход устройства сигнала тока. В данном разделе будет реализовано несколько моделей измерительного блока с последующим выбором наиболее оптимальной.

Выбор наиболее подходящей модели устройства будет осуществляться путем сравнения времени срабатывания модели защиты с временем срабатывания реального устройства при разных действующих значениях входных сигналов тока.

### **4.1 Определение времени срабатывания реального устройства**

Для оценки достоверности модели необходимо иметь критерий, основанный на характеристиках работы реального устройства. В данной работе в качестве такого критерия будет рассматриваться зависимость времени срабатывания дифференциальной защиты от действующего значения дифференциального тока.



Для снятия данной зависимости предлагается принимать минимально возможную модель входного сигнала тока, состоящего только из основной гармоники промышленной частоты:

$$i(t) = \sqrt{2} \cdot I \cdot \sin(\omega_0 t + \varphi),$$

где  $I$  - действующее значение тока, А.

Выдача сигнала тока будет осуществляться с использованием программно-технического измерительного комплекса «РЕТОМ-61» (далее - измерительный комплекс, источник сигнала). Устройство позволяет изменять действующее значение  $I$  и начальную фазу  $\varphi$  выдаваемого сигнала тока.

Для удобства и простоты во всех исследованиях начальная фаза задается равной  $\varphi = 0$ .

Факт срабатывания защиты будет фиксироваться при помощи дискретных входов, встроенных в измерительный комплекс. Время срабатывания защиты будет измеряться при помощи встроенного в «РЕТОМ-61» секундомера.

Для снятия зависимости времени срабатывания защиты от действующего значения тока достаточно выдавать сигнал только на фазы А сторон ВН и НН аналоговых входов терминала. Это упрощает схему сборки и облегчает её восприятие.

Схема подключения цепей измерительного устройства к терминалу защиты приведена на рис.4.1. Для удобства чтения схемы неиспользуемые клеммы устройств на рисунке не отображены.

Питание терминала защиты осуществляется от клемм источника постоянного напряжения 220 В измерительного комплекса.

На аналоговый вход фазы А стороны ВН устройства защиты подаётся фаза А с источника тока, на аналоговый вход фазы А стороны НН - фаза В с источника тока.

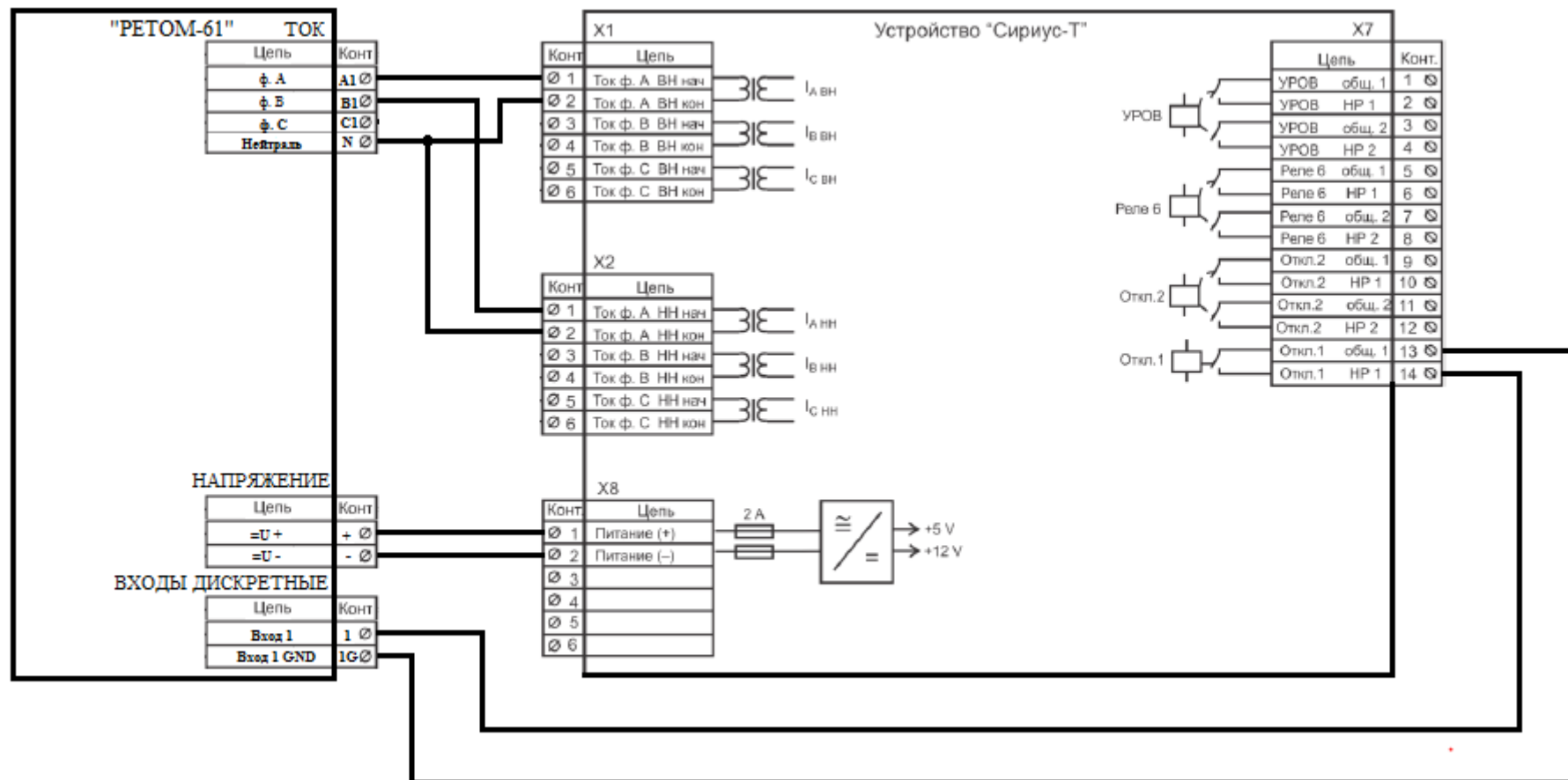


Рисунок 4.1 - Схема подключения цепей измерительного комплекса к терминалу защиты

Выходное реле устройства защиты подключено к дискретному входу измерительного комплекса, алгоритмы которого опрашивают состояние "сухого" контакта каждые 100 мкс. При замыкании выходного реле защиты измерительный комплекс фиксирует замыкание между контактами, то есть фиксирует факт срабатывания защиты.

Возможности «РЕТОМ-61» позволяют подавать сигнал тока в двух последовательно протекающих режимах с заданными длительностями. При определении времени срабатывания предлагается, что в первом режиме подаются токи, при которых рассчитанный устройством дифференциальный ток не будет превышать уставку срабатывания (доаварийный режим), во втором режиме - наоборот (аварийный режим).

Время протекания доаварийного устанавливается равным 1 с. Время протекания аварийного режима определяется временем срабатывания защиты. В случае несрабатывания время протекание второго режима устанавливается также равным 1 с.

При фиксировании измерительным комплексом факта срабатывания защиты выдача сигнала прекращается и встроенный в комплекс секундомер рассчитывает время срабатывания защиты. Отсчёт производится с момента начала аварийного режима.

При выполнении всех исследований в устройстве были введены уставки, заданные в нем по-умолчанию. Значения уставок приведены в табл.4.1. Все задержки по времени срабатывания ступеней были выставлены нулевыми.

Таблица 4.1 - Уставки срабатывания дифференциальной защиты терминала «Сириус-Т» при выполнении исследования

Уставка	Значение
Базовый ток стороны ВН, $I_{баз1}$ , А	5
Базовый ток стороны НН, $I_{баз2}$ , А	5
Уставка срабатывания дифференциальной отсечки (ДЗТ-1), $I_{диф}/I_{баз}$	9
Минимальный дифференциальный ток срабатывания второй ступени (ДЗТ-2), $I_{д1}/I_{баз}$	0,5
Коэффициент торможения на втором участке тормозной характеристики второй ступени (ДЗТ-2), $K_{торм}$ , %	55

Продолжение таблицы 4.1

Уставка	Значение
Тормозной ток во второй точке излома характеристики срабатывания второй ступени (ДЗТ-2), $I_{Т2}/I_{баз}$	1,5
Уставка блокировки по второй гармонике, $I_{дг2}/I_{дг1}$	0,15

В результате исследования была получена зависимость времени срабатывания защиты от действующего значения дифференциального тока в доаварийном и аварийном режимах (табл.4.2). Для каждого набора параметров сигнала было снято 10 выборок времени срабатывания. В таблице приведено максимальное, минимальное и среднее значение. Пауза между выборками составляла 1 с для надежного возврата выходного реле защиты в исходное состояние. Значения дифференциальных токов приведены в относительных единицах от минимального дифференциального тока срабатывания второй ступени  $I_{д1} = 2,5$  А.

Таблица 4.2 - Зависимость времени срабатывания дифференциальной защиты терминала «Сириус-Т» от токов доаварийного и аварийного режимов

$I_{диф.доав}/I_{д1}$	$I_{диф.ав}/I_{д1}$	$T_{сраб.мин}, мс$	$T_{сраб.макс}, мс$	$T_{сраб.средн}, мс$
0,98	1,02	42,3	46,3	45,2
	2	30,3	32,8	32,0
	3	29,4	38,6	31,6
	4	30,7	40,5	37,2
	6	37,6	43,6	40,5
0,5	1,02	45,4	50,2	47,0
	2	35,7	40,5	37,9
	3	39,2	41,9	40,5
	4	40,5	44,8	42,8
	6	40,8	45,9	43,7
0	1,02	46,0	51,7	49,8
	2	42,0	46,9	45,4
	3	42,3	46,7	45,4
	4	42,2	46,4	44,6
	6	43,3	47,0	45,2

Определенное в табл.4.2 время срабатывания защиты условно можно представить состоящим из двух составляющих:

$$T_{сраб} = t_{фильтр} + t_{реле},$$

где  $t_{\text{фильтр}}$  - время работы цифрового фильтра, мс;  $t_{\text{реле}}$  - время срабатывания и замыкания выходного реле устройства, мс.

Для создания модели защиты наибольший интерес представляет время работы цифрового фильтра. Оценка достоверности модели будет проводиться именно по этому параметру. Время срабатывания выходного реле при необходимости можно учесть в программе в виде элемента задержки выходного сигнала защиты.

Таким образом, для определения времени работы цифрового фильтра необходимо определить время работы промежуточного реле. Для этого в данной работе предлагается с помощью функционала измерительного комплекса осуществить замер времени срабатывания выходного реле устройства при поступлении сигнала на дискретный вход от другой защиты, действие которой приводит к срабатыванию выходного реле без выдержки времени. В качестве такой защиты в данной работе применяется газовая защита трансформатора (ГЗТ).

Имитация работы газовой защиты будет осуществляться путем подачи с измерительного комплекса на дискретный вход ГЗТ терминала сигнала постоянного напряжения величиной в 220 В. Схема подключения цепей представлена на рис.4.2.

Для определения времени срабатывания защиты также используется встроенный в «РЕТОМ-61» секундомер. В режиме 1 (доаварийном) контактный выход 1 измерительного комплекса разомкнут. Его замыкание происходит в режиме 2 (аварийном), при этом на дискретный вход ГЗТ терминала подаётся "+" сигнал и выходное реле срабатывает. Во всех режимах на общий выход ГЗТ подведен "-" от источника постоянного напряжения. Секундомер фиксирует время от начала аварийного режима до появления сигнала на дискретном входе измерительного комплекса.

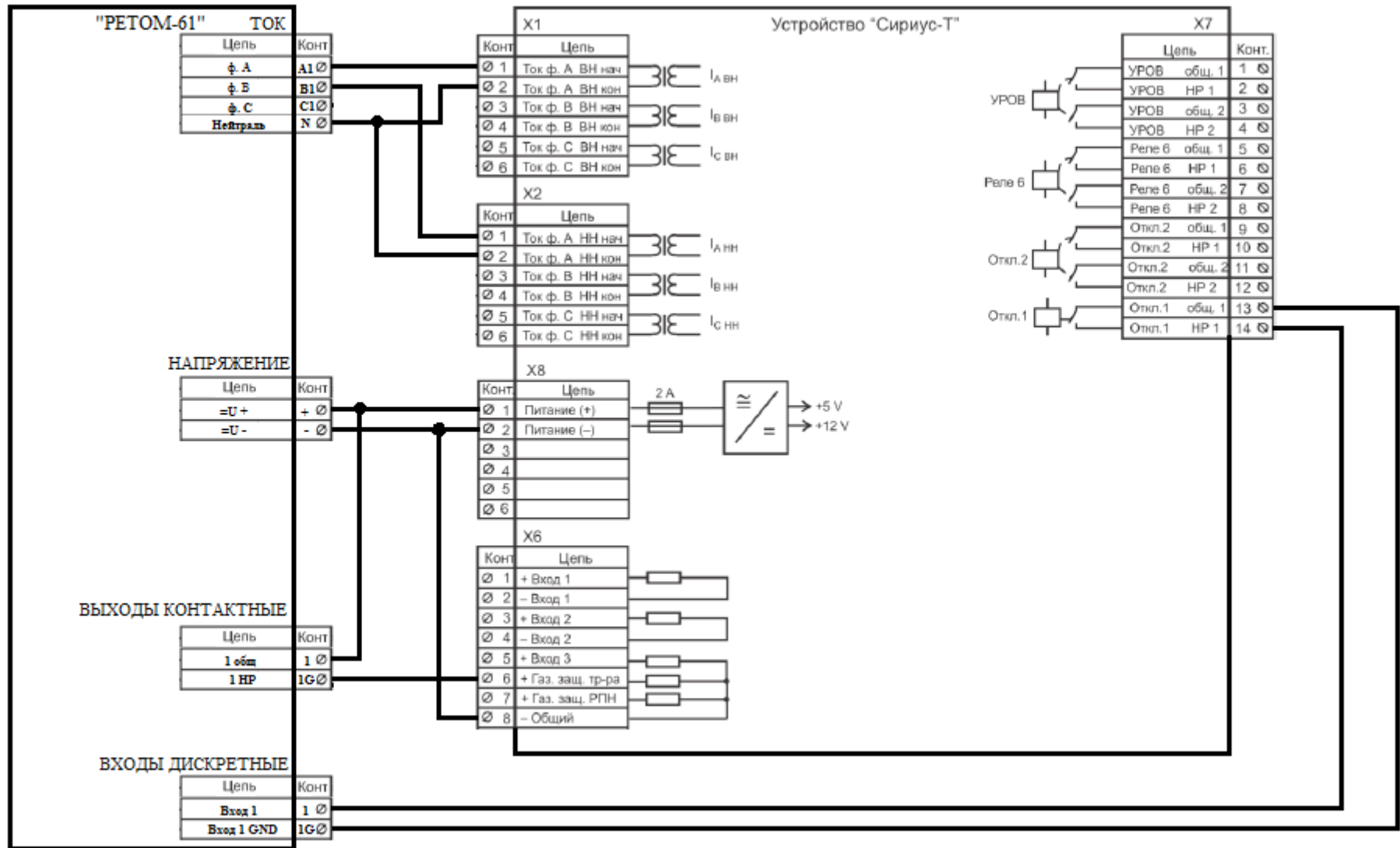


Рисунок 4.2 - Схема подключения цепей измерительного комплекса к терминалу защиты для имитации работы газовой защиты трансформатора

Поскольку общее время срабатывания устройства было определено на основе данных из 10 выборок, время срабатывания терминала от газовой защиты также определялось 10 раз. Результат представлен в табл.4.3. В таблице указано максимальное, минимальное и среднее значения.

Таблица 4.3 - Время срабатывания терминала при поступлении сигнала от газовой защиты трансформатора

$T_{ГЗТ.мин}, мс$	$T_{ГЗТ.макс}, мс$	$T_{ГЗТ.сред}, мс$
44,0	48,0	46,7

Определенное в табл.4.3 время срабатывания терминала от ГЗТ состоит из двух составляющих: время срабатывания выходного реле устройства и время срабатывания контактов измерительного комплекса.

Время срабатывания контактов измерительного комплекса было определено с помощью встроенного в него секундомера. При этом условием прекращения режима 2 было не наличие сигнала на дискретном входе измерительного комплекса, а замыкание выходного контакта 1. Аналогично предыдущим случаям было снято 10 измерений. Результат представлен в табл.4.4.

Таблица 4.4 - Собственное время срабатывания контактов «РЕТОМ-61»

$T_{конт.мин}, мс$	$T_{конт.макс}, мс$	$T_{конт.сред}, мс$
12,7	13,3	13,0

Тогда среднее время срабатывания выходного реле устройства дифференциальной защиты трансформатора:

$$t_{реле.сред} = T_{ГЗТ.сред} - T_{конт.сред} = 46,7 - 13,0 = 33,7 \text{ мс.}$$

Максимально и минимально возможные времена срабатывания выходного реле устройства дифференциальной защиты трансформатора:

$$t_{реле.макс} = T_{ГЗТ.макс} - T_{конт.мин} = 48,0 - 12,7 = 35,3 \text{ мс;}$$

$$t_{реле.мин} = T_{ГЗТ.мин} - T_{конт.макс} = 44,0 - 13,3 = 30,7 \text{ мс.}$$

Следует отметить, что рассчитанный возможный диапазон времени срабатывания выходного реле устройства основан исключительно на полученных в опыте данных. При определении диапазона не были учтены метрологические погрешности устройств. Поэтому реальный диапазон может быть шире. Получение более достоверного диапазона возможно при увеличении общего количества выборок. Однако для построения модели данной точности будет достаточно.

Среднее время срабатывания цифрового фильтра:

$$t_{\text{фильтр.ср}} = T_{\text{сраб.ср}} - t_{\text{реле.ср}}$$

При этом, согласно [1], значения модулей векторов вычисляются устройством и сравниваются с введенными уставками каждые 5 мс. Это означает, что время работы фильтра может быть равно одному из значений в следующем дискретном ряду: 6, 11, 16, 21, ... мс. Поэтому при расчете времени срабатывания фильтра будет учитываться возможный диапазон времени срабатывания выходного реле устройства, равный (30,7 ÷ 35,3) мс, а также диапазон изменения общего времени срабатывания устройства (значения  $T_{\text{сраб.мин}}$  и  $T_{\text{сраб.макс}}$  в табл.4.1). В связи с этим рассчитанное среднее время срабатывания фильтра будет корректироваться. Если по расчету среднее значение времени работы фильтра получается менее 6 мс, то принимается, что это время равно минимально возможному значению - 6 мс. Расчет времени срабатывания фильтра приведен в табл.4.5.



Таблица 4.5 - Определение времени срабатывания цифрового фильтра дифференциальной защиты терминала «Сириус-Т» в зависимости от токов доаварийного и аварийного режимов

$I_{\text{диф.доав}}/I_{\text{д1}}$	$I_{\text{диф.ав}}/I_{\text{д1}}$	$T_{\text{сраб.мин}},$ мс	$T_{\text{сраб.макс}},$ мс	$T_{\text{сраб.ср}},$ мс	$t_{\text{фильтр.ср}},$ мс	Корректировка	$t_{\text{фильтр.}},$ мс
0,98	1,02	42,3	46,3	45,2	11,5	-0,5 за счет возможного диапазона	11,0
	2	30,3	32,8	32,0	-1,7	минимально возможное значение	6,0
	3	29,4	38,6	31,6	-2,1	минимально возможное значение	6,0
	4	30,7	40,5	37,2	3,5	+2,5 за счет возможного диапазона	6,0
	6	37,6	43,6	40,5	6,8	-0,8 за счет возможного диапазона	6,0
0,5	1,02	45,4	50,2	47,0	13,3	-2,3 за счет возможного диапазона	11,0
	2	35,7	40,5	37,9	4,2	+1,8 за счет возможного диапазона	6,0
	3	39,2	41,9	40,5	6,8	-0,8 за счет возможного диапазона	6,0
	4	40,5	44,8	42,8	9,1	-3,1 за счет возможного диапазона	6,0
	6	40,8	45,9	43,7	10	-4,0 за счет возможного диапазона	6,0
0	1,02	46,0	51,7	49,8	16,1	-0,1 за счет возможного диапазона	16,0
	2	42,0	46,9	45,4	11,7	-0,7 за счет возможного диапазона	11,0
	3	42,3	46,7	45,4	11,7	-0,7 за счет возможного диапазона	11,0
	4	42,2	46,4	44,6	10,9	+0,1 за счет возможного диапазона	11,0
	6	43,3	47,0	45,2	11,5	-0,5 за счет возможного диапазона	11,0

Полученные в табл.4.5 значения времени работы фильтра в разных режимах будут использованы для определения наиболее подходящей модели.

Используемая при снятии зависимости модель сигнала моделируется в системе MatLab с использованием операторов циклов `for` и условий `if` [10]. Таким образом, варьируя значения токов в разных режимах можно получать единый сигнал тока с разными амплитудами. За время возникновения аварийного режима принято значение  $t = 0$ . В связи с этим условно принимается, что доаварийный режим протекает в период с  $t = -0,999$  с до  $t = 0$ . Отрицательное значение времени в данном случае означает лишь то, что режим является предшествующим. К тому же, начало аварийного режима с нулевой точки значительно упрощает задачу реализации алгоритма времени определения срабатывания защиты. Реализация модели измерительного комплекса для испытаний в системе MatLab выглядит следующим образом:

```
N=20; %число отсчётов за период промышленной частоты
td=1/(50*N); %период дискретизации, с;
f=50; %частота основного сигнала тока, Гц
A1_1=2.45; %значение тока стороны ВН доаварианого режима, А
A1_2=2.55; %значение тока стороны ВН аварийного режима, А
A2_1=0; %значение тока стороны НН доаварианого режима, А
A2_2=0; %значение тока стороны НН аварийного режима, А
T1=1; %время протекания доаварийного режима, с
T2=1; %время протекания аварийного режима, с
t=(0-T1)+td:td:T2; %ввод общего отрезка времени
phi1=0; %начальная фаза тока стороны ВН, рад
phi2=pi; %начальная фаза тока стороны НН, рад
for k=1:length(t) %создание единого массива сигнала тока в двух режимах
if t(k)<=0 %доаварийный режим
    I1(k)=sqrt(2)*A1_1*sin(2*pi*f*t(k)+phi1); %сигнал тока стороны ВН в
    доаварийном режиме
    I2(k)=sqrt(2)*A2_1*sin(2*pi*f*t(k)+phi2); %сигнал тока стороны НН в
    доаварийном режиме
else %аварийный режим
    I1(k)=sqrt(2)*A1_2*sin(2*pi*f*t(k)+phi1); %сигнал тока стороны ВН в
    аварийном режиме
    I2(k)=sqrt(2)*A2_2*sin(2*pi*f*t(k)+phi2); %сигнал тока стороны НН в
    аварийном режиме
end
end
```

## 4.2 Реализация основного блока защиты

В данном подразделе необходимо реализовать в среде MatLab следующие функции защиты:

- расчет дифференциального и тормозного тока по полученным значениям модулей и начальных фаз входных сигналов;
- сравнение дифференциального и тормозного тока с уставками срабатывания;
- осуществление подачи сигнала на отключение выключателя при превышении дифференциального тока уставок срабатывания ступеней ДЗТ-1 или ДЗТ-2;
- обеспечение блокировки срабатывания защиты в случае выявления броска тока намагничивания.

Поскольку исследование реального устройства проводилось с использованием только фаз А, для упрощения восприятия модель также будет реализована только для одной фазы. Для двух других фаз принцип работы программы будет аналогичным.

Коррекция погрешности, вносимой работой РПН, в данной модели осуществляться не будет, поскольку она работает медленно и не функционирует при возникновении коротких замыканий.

Для правильной функционирования защиты необходимо рассчитать и задать в устройство уставки срабатывания. Методика расчета уставок была рассмотрена ранее. Для выполнения описанных выше функций в устройство необходимо задать следующие уставки: базовые токи сторон ВН и НН трансформатора -  $I_{баз1}, I_{баз2}$ ; ток срабатывания дифференциальной токовой отсечки (ДЗТ-1) -  $I_{диф}/I_{баз}$ ; минимальный дифференциальный ток срабатывания чувствительной ступени защиты (ДЗТ-2) -  $I_{д1}/I_{баз}$ ; коэффициент торможения на втором участке тормозной характеристики ступени ДЗТ-2 -  $K_{торм}, \%$ ; значения тормозного тока в точке второго излома характеристики срабатывания ступени второй ступени -  $I_{т2}/I_{баз}$ ; уставку блокировки по второй гармонике -

$I_{дг2}/I_{дг1}$ . Расчет тормозного тока в точке первого излома характеристики срабатывания второй ступени производится в устройстве автоматически по выражению (2.11).

В среде MatLab блок задания уставок может быть реализован следующим образом:

```
I_baz1=5; %базовый ток стороны ВН, А
I_baz2=5; %базовый ток стороны НН, А
I_dzt1=9; %уставка срабатывания дифференциальной отсечки ДЗТ-1, о.е.
I_dzt2_1=0.5; %минимальный дифференциальный ток срабатывания ступени ДЗТ,
о.е.
K_torm=55; %уставка коэффициента торможения, %
I_torm2=1.5; %уставка тормозного тока второй точки излома, о.е.
I_block2=0.15; %уставка блокировки по второй гармонике, о.е.
Itorm1=I_dzt2_1/(K_torm/100); %расчет тормозного тока первой точки излома
```

Расчет дифференциального и тормозного тока по полученным значениям модуля и начальной фазы векторного изображения входного сигнала будет осуществляться по выражениям (1.1) и (1.2) с использованием показательной формы записи комплексных чисел:

$$I_{\text{ДИФ}} = |I_1 \cdot e^{j\varphi_1} - I_2 \cdot e^{j\varphi_2}| / I_{\text{баз1}};$$

$$I_{\text{ТОРМ}} = 0,5 \cdot |I_1 \cdot e^{j\varphi_1} + I_2 \cdot e^{j\varphi_2}| / I_{\text{баз1}},$$

где  $I_1, \varphi_1$  - соответственно модуль и начальная фаза вектора тока со стороны ВН;  $I_2, \varphi_2$  - соответственно модуль и начальная фаза вектора тока со стороны НН.

При составлении выражений учтено, что если токи будут направлены встречно, то начальные фазы углов будут различаться на  $180^\circ$  и в этом случае дифференциальный ток будет определяться суммой этих токов, а тормозной разностью.

Вторая гармоническая составляющая сигнала дифференциального тока вычисляется по аналогичному выражению.

Перед расчетом программой дифференциального и тормозного тока необходимо обеспечить проверку на срабатывание от мгновенного значения

дифференциального тока, которое должно превышать соответствующую уставку  $2,5 \cdot I_{\text{диф}}/I_{\text{баз}}$  более 3 мс.

Мгновенное значение дифференциального тока рассчитывается как:

$$i_{\text{диф}}(nT) = i_1(nT) - i_2(nT).$$

Выражение универсально как для режима протекания сквозного тока, так и для внутреннего КЗ в трансформаторе. Если токи будут направлены встречно, то мгновенное значение  $i_2(nT)$  будет с противоположным знаком относительно  $i_1(nT)$  и дифференциальный ток будет определяться как сумма токов.

После проверки на срабатывание от мгновенного значения и расчета дифференциального и тормозного токов на основе полученных векторных величин необходимо на основе рассчитанного тормозного тока обеспечить выбор участка тормозной характеристики чувствительной ступени дифференциальной защиты и расчет соответствующего тока срабатывания.

Далее необходимо осуществить сравнение дифференциального тока с уставкой дифференциальной отсечки  $I_{\text{диф}}/I_{\text{баз}}$  и в случае превышения выдать сигнал на срабатывание.

В случае несрабатывания первой ступени дифференциальной защиты выполняется сравнение рассчитанного дифференциального тока с выбранной или рассчитанной программой уставкой срабатывания второй ступени, с предварительной проверкой на наличие броска тока намагничивания.

Если обе ступени защиты не срабатывают, программа переходит к обработке следующего отсчета сигнала по аналогичному алгоритму.

При этом сравнение рассчитанного дифференциального тока с уставками срабатывания происходит не каждый отсчёт, а раз в 5 мс, что соответствует алгоритму работы реального устройства.

На рис.4.3 представлена блок-схема описанного выше алгоритма работы программы.

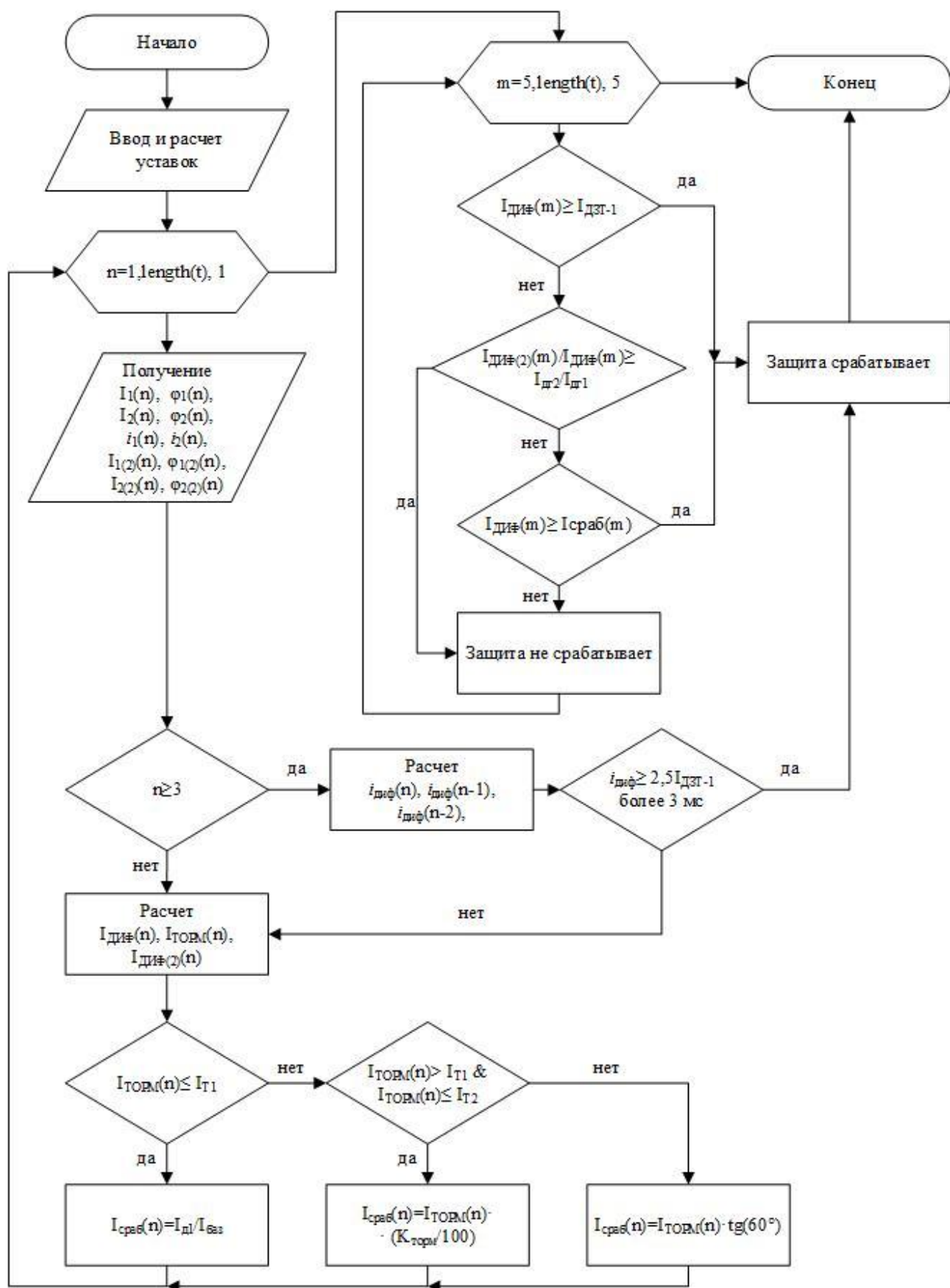


Рисунок 4.3 - Блок-схема логической части модели

В среде MatLab реализация логической части модели выглядит следующим образом:

```
[I1_modul,ph_I1,I1_modul_2g,ph_I1_2g]=filt(L,td,t,I1,1); %получение модуля
и начальной фазы первой и второй гармоники вектора тока стороны ВН
[I2_modul,ph_I2,I2_modul_2g, ph_I2_2g]=filt(L,td,t,I2,0); %получение
модуля и начальной фазы первой и второй гармоники вектора тока стороны НН
Israb=zeros(1,length(t)); %создание нулевого массива тока срабатывания
Idif=zeros(1,length(t)); %создание нулевого массива диф.тока
Itorm=zeros(1,length(t)); %создание нулевого массива тормозного тока
Privod=zeros(1,length(t)); %создание нулевого массива состояния контактов
выходного реле
for n=1:length(t)
I1_vector(n)=I1_modul(n)*exp(1i*ph_I1(n)); %вектор первой гармоники тока
стороны ВН
I2_vector(n)=I2_modul(n)*exp(1i*ph_I2(n)); %вектор первой гармоники тока
стороны НН
I1(2)_vector(n)=I1_modul_2g(n)*exp(1i*ph_I1_2g(n)); %вектор второй
гармоники тока стороны ВН
I2(2)_vector(n)=I2_modul_2g(n)*exp(1i*ph_I2_2g(n)); %вектор второй
гармоники тока стороны НН
Idif(n)=abs(I1_vector(n)-I2_vector(n))/I_baz1; %расчет дифференциального
тока основной гармоники
Itorm(n)=0.5*abs(I1_vector(n)+I2_vector(n))/I_baz1; %расчет тормозного
тока
Idif_2g(n)=abs(I1(2)_vector(n)-I2(2)_vector(n))/I_baz1; %расчет
дифференциального тока второй гармоники
if n>=3 %условие, определяющее прошло ли 3 мс, необходимое для корректной
работы программы
    idif(n)=abs(I1(n)-I2(n)); %расчет мгновенного значения
дифференциального тока данного отсчёта
    idif(n-1)=abs(I1(n-1)-I2(n-1)); %расчет мгновенного значения
дифференциального тока предыдущего отсчёта
    idif(n-2)=abs(I1(n-2)-I2(n-2)); %расчет мгновенного значения
дифференциального тока два отсчёта назад
    if idif(n)>2.5*I_dzt1 && idif(n-1)>2.5*I_dzt1 && idif(n-2)>2.5*I_dzt1
%превышение мгновенного значения дифференциального тока более 3 мс
        Privod(n+1)=1; %срабатывание защиты
    end
end
if Itorm(n)<=Itorm1 %проверка попадание тормозного тока на первый участок
характеристики срабатывания
    Israb(n)=I_dzt2_1; %ток срабатывания равен минимальному
дифференциальному току ДЗТ-2
elseif Itorm(n)>Itorm1 && Itorm(n)<=I_torm2 %проверка попадание тормозного
тока на второй участок характеристики срабатывания
    Israb(n)=Itorm(n)*(K_torm/100); % расчет тока срабатывания на втором
участке тормозной характеристики
else %попадание на третий участок характеристики срабатывания
    Israb(n)=Itorm(n)*tan(60*pi/180); % расчет тока срабатывания на
третьем участке тормозной характеристики
end
end
for m=5:5:length(t)-5 %защита сравнивает рассчитанный дифференциальный ток
каждые 5 мс
if Idif(m)>I_dzt1 %проверка на срабатывание дифференциальной отсечки
    Privod(m+1)=1; %срабатывание защиты
end
if Idif_2g(m)/Idif(m)>=I_block2 %проверка на наличие БНТ
    Privod(m+1)=0; %несрабатывание защиты ввиду наличия БНТ
elseif Idif(m)>=Israb(m) %проверка на срабатывание ступени ДЗТ-2
```

```

Privod(m+1)=1; %защита держит сигнал активным следующие 5 мс
Privod(m+2)=1;
Privod(m+3)=1;
Privod(m+4)=1;
Privod(m+5)=1;
else
Privod(m+1)=0; %несрабатывание защиты
end
end
end

```

Поскольку программа написана в однофазном исполнении, в ней не реализована функция выравнивания фаз токов стороны ВН и НН. При реализации программы в трехфазном исполнении выравнивание фаз можно осуществлять следующим способом:

- для обмоток силового трансформатора, соединенного по схеме "треугольник":

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_A; \dot{I}_2 = \dot{I}_B; \dot{I}_3 = \dot{I}_C;$$

- для обмоток силового трансформатора, соединенного по схеме "звезда", осуществляется сборка в цифровой треугольник:

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{I}_A - \dot{I}_C}{\sqrt{3}}; \dot{I}_2 = \frac{\dot{I}_B - \dot{I}_A}{\sqrt{3}}; \dot{I}_3 = \frac{\dot{I}_C - \dot{I}_B}{\sqrt{3}},$$

где  $\dot{I}_1, \dot{I}_2, \dot{I}_3$  - векторы токов плеч защиты;  $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$  - векторы входных сигналов соответствующих фаз.

### 4.3 Реализация измерительного блока защиты

В данном подразделе будут рассмотрены примеры реализации в среде MatLab следующих алгоритмов цифровой фильтрации: метод наименьших квадратов, формирование ортогональных составляющих, дискретное преобразование Фурье.

Измерительный блок защиты применяется в основной части программы в виде функции, задаваемой автором как `filt`. Это реализуется с помощью встроенного в пакет оператора `function` [10]. При этом для алгоритмов МНК



и ДПФ в качестве входных параметров для функции задаётся: количество отсчётов за период промышленной частоты ( $N$ ), временной ряд ( $t$ ), массив дискретных значений входного сигнала, подлежащего фильтрации ( $y$ ). Для алгоритма ФОС в качестве входных параметров задаётся: количество отсчётов, зафиксированных на интервале длительностью порядка одного периода промышленной частоты ( $L$ ), период дискретизации сигнала ( $T$ ), временной ряд ( $t$ ), массив дискретных значений входного сигнала, подлежащего фильтрации ( $y$ ). В алгоритмах МНК и ДПФ период дискретизации рассчитывается в функции автоматически на основе заданного числа  $N$ , однако алгоритм ФОС допускает ситуацию, при которой  $L \neq N$ , поэтому  $N$  рассчитывается в функции отдельно по заданному периоду дискретизации сигнала  $T$ .

4.3.1 Реализация алгоритма метода наименьших квадратов заключается в формировании матрицы коэффициентов  $A$  и решение уравнения  $Y = AX$  по выражению (3.4) в каждый отсчёт сигнала.

Ввиду того, что для осуществления блокировки защиты при бросках тока намагничивания необходимо также осуществлять выделение второй гармонической составляющей дифференциального тока в исходной модели сигнала третья гармоническая составляющая заменяется второй:

$$i(nT) = I_a \left( 1 - \frac{nT}{\tau} + \frac{(nT)^2}{\tau^2} \right) + I_{x1} \sin\left(\frac{2\pi n}{N}\right) + I_{y1} \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right) + \\ + I_{x2} \sin\left(\frac{4\pi n}{N}\right) + I_{y2} \cos\left(\frac{4\pi n}{N}\right).$$

Поскольку реальный входной сигнал помимо аperiodической составляющей, первой и второй гармоник содержит высшие гармонические составляющие необходимо реализовать его фильтрацию с помощью фильтра низших частот (ФНЧ). Методом подбора определено, что наиболее оптимальным вариантом является применение цифрового ФНЧ Баттерворта 2-го порядка. Частота среза выбрана из условия, что спектральные компоненты,

частота которых выше половины частоты дискретизации сигнала должны надежно подавляться фильтром [4]. Таким образом, для основной гармоники граничная частота  $f_g = 25N$  должна быть подавлена как минимум на порядок, т.е. коэффициент передачи на этой частоте должен быть  $K_f < 0,1$ . Данное условие позволяет выбрать частоту среза ФНЧ [5]:

$$f_c = 25N \sqrt{K_f} = 25 \cdot 20 \cdot \sqrt{0,1} = 158 \text{ Гц.}$$

В среде MatLab реализация цифрового фильтра осуществляется с помощью оператора  $y = \text{filter}(b, a, y_0)$ , где  $y$  - массив значений сигнала после фильтрации;  $b, a$  - коэффициенты передаточной функции фильтра;  $y_0$  - массив значений исходного сигнала.

Коэффициенты передаточной функции фильтра Баттерворта рассчитываются с помощью команды  $[b, a] = \text{butter}(n, Wn)$ , где  $n$  - порядок фильтра;  $Wn$  - частота среза фильтра, отнесенная к половине частоты дискретизации сигнала [10].

После фильтрации каждый период дискретизации осуществляется запись сигнала в буферный массив, состоящий из  $N$  элементов. Изначально буфер пустой, т.е. содержит нули. Это реализуется с помощью функции  $\text{buf} = \text{zeros}(1, N)$ . Далее каждый последующий отсчёт записывается в качестве  $N$ -ого элемента буфера, при этом  $i$  элемент перезаписывается на место  $i-1$ . Таким образом, буфер запоминает только последние  $N$  значений сигнала, обновляясь каждый период дискретизации. Данный подход позволяет имитировать работу цифрового фильтра в режиме реального времени. Следует отметить, что при первоначальном появлении на входе сигнала тока буфер полностью заполнится только через  $N$  отсчётов сигнала, что соответствует 20 мс при  $N=20$ .

Обновляющийся каждый период дискретизации буферный массив формирует вектор-столбец  $Y$ , состоящий из  $N$  элементов:

$$Y = \begin{pmatrix} i(hT) \\ i((h+1)T) \\ i((h+2)T) \\ \dots \\ i((h+N-1)T) \end{pmatrix},$$

где  $h = 1, 2, \dots, H$  - номер отсчёта сигнала;  $H$  - общее число отсчётов сигнала.

При формировании матрицы коэффициентов  $A$  использовано свойство периодических функций:

$$\sin(2\pi n/N) = \sin(2\pi(n+N)/N).$$

Это необходимо для правильной работы программы в режиме реального времени, чтобы вновь записываемому в качестве  $N$ -ого члена буфера отсчёту соответствовал нужный множитель. Например, при записи 1-го отсчёта, ему должен соответствовать множитель  $\sin(2\pi \cdot 0/N)$ , равный  $\sin(2\pi \cdot 20/N)$ , при записи 2-ого отсчёта сигнала в качестве  $N$ -ого члена буфера ему должен соответствовать множитель  $\sin(2\pi \cdot 1/N)$ , равный  $\sin(2\pi \cdot 21/N)$ . Наглядное представление описанного приведено на рис.4.4. Тогда в общем случае можно записать:

$$A[(n+1), 3] = \sin(2\pi(h+n)/N),$$

где  $n = 0, 1, \dots, N-1$  - номер отсчёта буфера;  $h = 1, 2, \dots, H$  - номер отсчёта сигнала.

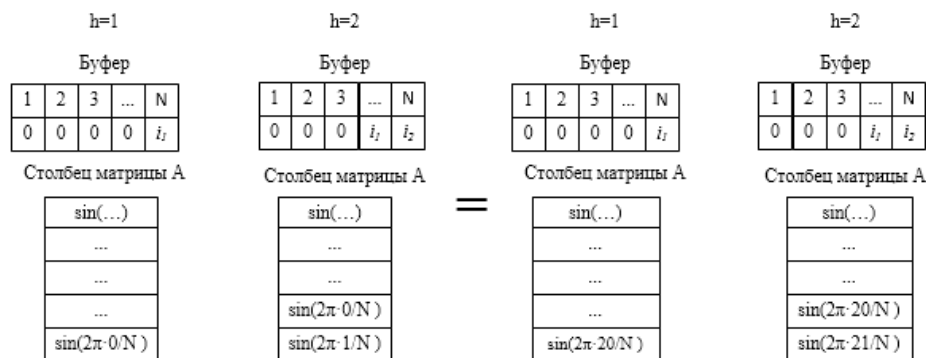


Рисунок 4.4 - Применение свойства периодических функций в программе

Для остальных столбцов коэффициенты матрицы вычисляются аналогично. Тогда, например, при  $h = 1$  матрица коэффициентов  $A$  будет выглядеть следующим образом:

$$A = \begin{pmatrix} 1 & T & T^2 & \sin(2\pi/N) & \cos(2\pi/N) & \sin(4\pi/N) & \cos(4\pi/N) \\ 1 & 2T & 4T^2 & \sin(4\pi/N) & \cos(4\pi/N) & \sin(8\pi/N) & \cos(8\pi/N) \\ 1 & 3T & 9T^2 & \sin(6\pi/N) & \cos(6\pi/N) & \sin(12\pi/N) & \cos(12\pi/N) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & 20T & (20T)^2 & \sin(40\pi/N) & \cos(40\pi/N) & \sin(40\pi/N) & \cos(40\pi/N) \end{pmatrix}.$$

Вычисление псевдообратной матрицы в среде MatLab осуществляется с помощью оператора  $p=pinv(a)$  [10].

Четвертая и пятая строчки полученной псевдообратной матрицы являются соответственно коэффициентами  $a_{xn}$  и  $a_{yn}$  цифрового фильтра для выделения вещественной и мнимой составляющих сигнала основной гармоники.

Ортогональные компоненты сигнала основной гармоники вычисляются по выражениям:

$$\begin{cases} I_x(nT) = \sum_{n=1}^N a_{xn} \cdot y_{буф}(nT); \\ I_y(nT) = \sum_{n=1}^N a_{yn} \cdot y_{буф}(nT), \end{cases}$$

где  $y_{буф}(nT)$  - значение  $n$ -ого отсчёта сигнала буфера.

В среде MatLab данная операция реализована с помощью поэлементного умножения двух матриц, одна из которых представляет 4-ую или 5-ую строчку псевдообратной матрицы  $A^+$ , а другая является буферным массивом. Получившиеся в результате умножения элементы массива суммируются с помощью функции  $s=sum(a)$ .

Далее по выражениям (3.2) рассчитываются модуль и начальная фаза векторного изображения основной гармонической составляющей сигнала тока.

Вторая гармоническая составляющая сигнала тока рассчитывается по аналогичному алгоритму.

Таким образом, алгоритм метода наименьших квадратов в среде MatLab выглядит следующим образом:

```
function
[modul_signal,phase_signal,modul_signal2,phase_signal2]=filtMKN(N,t,y1)
T=1/(50*N); %расчет периода дискретизации
[b1,a1]=butter(2,25*N*sqrt(0.1)/(1/(2*T))); %расчет коэффициентов
передаточной функции ФНЧ
y=filter(b1,a1,y1); %фильтрация сигнала ФНЧ
buf=zeros(1,N); %создание нулевого буферного массива
for h=1:length(y); %ряд h
    %Буфер
    for p=1:N-1; %ряд индексов буфера
        buf(p)=buf(p+1); %перезапись i+1 члена буфера на место i-го
    end
    buf(N)=y(h); %запись последнего отсчёта сигнала в качестве N-ого члена
буфера
    %Матрица A(-1)
    for n=0:N-1; %ряд индексов n
        a(n+1,1)=1; %первый член разложения экспоненты в ряд Тейлора
        a(n+1,2)=n*T; %второй член разложения экспоненты в ряд Тейлора
        a(n+1,3)=n^2*T^2; %третий член разложения экспоненты в ряд Тейлора
        a(n+1,4)=sin(2*pi*(h+n)/N); %синусный множитель первой гармоники
        a(n+1,5)=cos(2*pi*(h+n)/N); %косинусный множитель первой гармоники
        a(n+1,6)=sin(2*pi*(h+n)*2/N); %синусный множитель второй гармоники
        a(n+1,7)=cos(2*pi*(h+n)*2/N); %косинусный множитель второй гармоники
    end;
    x=pinv(a); %расчет псевдообратной матрицы
    x_cos=x(4,:); %формирование матрицы коэффициентов вещественной
составляющей 1-ой гармоники
    x_sin=x(5,:); %формирование матрицы коэффициентов мнимой составляющей 1-ой
гармоники
    x_cos2=x(6,:); %формирование матрицы коэффициентов вещественной
составляющей 2-ой гармоники
    x_sin2=x(7,:); %формирование матрицы коэффициентов мнимой составляющей 2-
ой гармоники
    %Расчет ортогональных составляющих первой гармоники
    y_cos=x_cos.*buf; %поэлементное перемножение матриц
    y_sin=x_sin.*buf;
    signal_x(h)=sum(y_cos)/sqrt(2); %вещественная составляющая сигнала
    signal_y(h)=sum(y_sin)/sqrt(2); %мнимая составляющая сигнала
    modul_signal(h)=sqrt((signal_x(h))^2+(signal_y(h))^2); %расчет модуля
сигнала
    if signal_x(h)>0 %условие, необходимое для правильного расчета начальной
фазы
        phase_signal(h)=atan((signal_y(h))/(signal_x(h))); %расчет начальной
фазы
    elseif signal_x(h)==0 %условие, необходимое для корректной работы
программы с нулевыми массивами
        phase_signal(h)=0;
    else
        phase_signal(h)=pi+atan((signal_y(h))/(signal_x(h)));
    end
    %Расчет ортогональных составляющих второй гармоники
    y_cos2=x_cos2.*buf;
    y_sin2=x_sin2.*buf;
```

```

signal_x2(h)=sum(y_cos2)/sqrt(2);
signal_y2(h)=sum(y_sin2)/sqrt(2);
modul_signal2(h)=sqrt((signal_x2(h))^2+(signal_y2(h))^2);
if signal_x2(h)>0
    phase_signal2(h)=atan((signal_y2(h))/(signal_x2(h)));
elseif signal_x2(h)==0
    phase_signal2(h)=0;
else
    phase_signal2(h)=pi+atan((signal_y2(h))/(signal_x2(h)));
end
end
end

```

4.3.2 Реализация алгоритма формирования ортогональных составляющих аналогично описанному выше методу МНК. Отличие состоит в том, что матрица коэффициентов  $A$  является квадратной размером  $L \times L$  и решение уравнения  $Y = AX$  осуществляется вычислением обратной матрицы по выражению (3.4) с помощью функции  $p=inv(a)$  [10]. При этом апериодическая составляющая представляется в виде первых двух членов разложения экспоненты в ряд Тейлора и её коэффициенты составляют не первые три столбца матрицы, как в случае МНК, а первый и последний, что сделано для удобства реализации программы. Для расчета коэффициентов гармонических составляющих также применено основное свойство периодических функций, описанное выше. Тогда, выражения для коэффициентов гармонических составляющих можно записать в общем виде:

$$A[(n + 1), k] = \sin(\pi k(h + n)/N);$$

$$A[(n + 1), (k + 1)] = \cos(\pi k(h + n)/N),$$

где  $n = 0, 1, \dots, N - 1$  - номер отсчёта буфера;  $k = 2, 4, 6, \dots, L - 2$  - удвоенное значение выделяемой гармоники, выполненное для удобства реализации программы;  $h = 1, 2, \dots, H$  - номер отсчёта сигнала.

Следует отметить, что при  $L = 20$  исходная модель сигнала включает в себя 9 гармонических составляющих, в связи с чем нет необходимости осуществлять дополнительную фильтрацию с помощью цифровых ФНЧ.

Вторая и третья строчки получившейся обратной матрицы являются

соответственно коэффициентами  $a_{xn}$  и  $a_{yn}$  цифрового фильтра для выделения вещественной и мнимой составляющих сигнала основной гармоники. Четвертая и пятая строчки являются коэффициентами для выделения ортогональных составляющих второй гармоники сигнала.

Таким образом, алгоритм формирования ортогональных составляющих в среде MatLab выглядит следующим образом:

```
function
[modul_signal,phase_signal,modul_signal2,phase_signal2]=filtFOS(L,T,t,y)
N=0.02/T; %расчет N
buf=zeros(1,L); %создание нулевого буферного массива
for h=1:length(y); %ряд h
    %Буфер
    for p=1:L-1; %ряд индексов буфера
        buf(p)=buf(p+1); %перезапись i+1 члена буфера на место i-го
    end
    buf(L)=y(h); %запись последнего отсчёта сигнала в качестве N-ого члена
    буфера

    %Матрица A(-1)
    for n=0:L-1; %ряд индексов n
        a(n+1,1)=1; %первый член разложения экспоненты в ряд Тейлора
        a(n+1,L)=n*T; %второй член разложения экспоненты в ряд Тейлора
        for k=2:2:L-2 %ряд k
            a(n+1,k)=sin(pi*(h+n)*k/N); %синусные множители гармоник
            a(n+1,k+1)=cos(pi*(h+n)*k/N); %косинусные множители гармоник
        end;
    end

x=inv(a); %расчет обратной матрицы
x_cos=x(2,:); %формирование матрицы коэффициентов вещественной
составляющей 1-ой гармоники
x_sin=x(3,:); %формирование матрицы коэффициентов мнимой составляющей 1-
ой гармоники
x_cos2=x(4,:); %формирование матрицы коэффициентов вещественной
составляющей 2-ой гармоники
x_sin2=x(5,:); %формирование матрицы коэффициентов мнимой составляющей 2-
ой гармоники
%Расчет ортогональных составляющих первой гармоники
y_cos=x_cos.*buf; %поэлементное перемножение матриц
y_sin=x_sin.*buf;
signal_x(h)=sum(y_cos)/sqrt(2); %вещественная составляющая сигнала
signal_y(h)=sum(y_sin)/sqrt(2); %мнимая составляющая сигнала
modul_signal(h)=sqrt((signal_x(h))^2+(signal_y(h))^2); %расчет модуля
сигнала
if signal_x(h)>0 %условие, необходимое для правильного расчета начальной
фазы
    phase_signal(h)=atan((signal_y(h))/(signal_x(h))); %расчет начальной
фазы
elseif signal_x(h)==0 %условие, необходимое для корректной работы
программы с нулевыми массивами
    phase_signal(h)=0;
else
    phase_signal(h)=pi+atan((signal_y(h))/(signal_x(h)));
end
% Расчет ортогональных составляющих второй гармоники
y_cos2=x_cos2.*buf;
```

```

y_sin2=x_sin2.*buf;
signal_x2(h)=sum(y_cos2)/sqrt(2);
signal_y2(h)=sum(y_sin2)/sqrt(2);
modul_signal2(h)=sqrt((signal_x2(h))^2+(signal_y2(h))^2);
if signal_x2(h)>0
    phase_signal2(h)=atan((signal_y2(h))/(signal_x2(h)));
elseif signal_x2(h)==0
    phase_signal2(h)=0;
else
    phase_signal2(h)=pi+atan((signal_y2(h))/(signal_x2(h)));
end
end
end

```

4.3.3 Дискретное преобразование Фурье позволяет выделять любую гармоническую составляющую сигнала, при этом данный алгоритм цифровой фильтрации практически нечувствителен к аperiodической составляющей. Для модели устройства дифференциальной защиты необходимо определение лишь 1-ой и 2-ой гармонических составляющих, поэтому для повышения точности расчета ортогональных составляющих входной сигнал проходит предварительную цифровую фильтрацию с помощью ФНЧ Баттерворта 2-го порядка, как в алгоритме МНК.

После фильтрации каждый период дискретизации осуществляется запись сигнала в буферный массив, как и в предыдущих алгоритмах.

При обработке сигнала корреляционным методом в режиме реального времени, для отсчёта  $h$ , ортогональные составляющие сигнала следует вычислять по выражениям [9]:

$$\begin{cases} I_x(h) = \frac{2}{N} \sum_{m=0}^{N-1} i(h-m) \cdot \sin\left(\frac{2\pi k(h-m)}{N}\right); \\ I_y(h) = \frac{2}{N} \sum_{m=0}^{N-1} i(h-m) \cdot \cos\left(\frac{2\pi k(h-m)}{N}\right). \end{cases}$$

где  $h$  - номер текущего отсчёта;  $m = 0, 1, \dots, N-1$  - счётчик предыдущих значений буфера;  $k$  - номер выделяемой гармоники.

Для правильной работы программы в среде MatLab 1-ому отсчёту, записываемому в качестве  $N$ -ого члена буфера, должен соответствовать



множитель  $\sin\left(\frac{2\pi k \cdot 0}{N}\right)$ , 2-ому отсчёту -  $\sin\left(\frac{2\pi k \cdot 1}{N}\right)$ , тогда в общем виде выражения для вещественной и мнимой составляющих можно записать:

$$\begin{cases} I_x(h) = \frac{2}{N} \sum_{m=0}^{N-1} i_{\text{буф}}(N-m) \cdot \sin\left(\frac{2\pi k(h-1-m)}{N}\right); \\ I_y(h) = \frac{2}{N} \sum_{m=0}^{N-1} i_{\text{буф}}(N-m) \cdot \cos\left(\frac{2\pi k(h-1-m)}{N}\right). \end{cases}$$

где  $i_{\text{буф}}$  - массив буферных значений в момент отсчёта  $h$ .

Данные математические операции аналогично предыдущим методам осуществляются с использованием создания массива результата поэлементного умножения и дальнейшего суммирования его элементов.

Далее по выражениям (3.2) рассчитываются модуль и начальная фаза векторного изображения основной гармонической составляющей сигнала тока.

Вторая гармоническая составляющая сигнала тока рассчитывается по аналогичному алгоритму.

Таким образом, алгоритм дискретного преобразования Фурье в среде MatLab выглядит следующим образом:

```
function
[modul_signal,phase_signal,modul_signal2,phase_signal2]=filtDPF(N,t,y1)
T=1/(50*N); %расчет периода дискретизации
[b1,a1]=butter(2,25*N*sqrt(0.1)/(1/(2*T))); %расчет коэффициентов
передаточной функции ФНЧ
y=filter(b1,a1,y1); %фильтрация сигнала ФНЧ
buf=zeros(1,N); %создание нулевого буферного массива
for j=1:1:length(y); %ряд h
    %Буфер
    for p=1:N-1; %создание нулевого буферного массива
        buf(p)=buf(p+1); %перезапись i+1 члена буфера на место i-го
    end
    buf(N)=y(j); %запись отсчёта сигнала в качестве N-ого члена буфера
    %Расчет ортогональных составляющих 1-ой гармоники
    for m=0:N-1 %ряд m
        y_cos(N-m)=buf(N-m)*cos((j-1-m)*2*pi/N); %расчет коэффициентов
массива мнимой составляющей
        y_sin(N-m)=buf(N-m)*sin((j-1-m)*2*pi/N); %расчет коэффициентов
массива вещественной составляющей
    end
    signal_y(j)=(2/N)*sum(y_cos)/sqrt(2); %мнимая составляющая сигнала
    signal_x(j)=(2/N)*sum(y_sin)/sqrt(2); %вещественная составляющая сигнала
```

```

modul_signal(j)=sqrt((signal_x(j))^2+(signal_y(j))^2); %расчет модуля
сигнала
if signal_x(j)>0 %условие, необходимое для правильного расчета начальной
фазы
    phase_signal(j)=atan((signal_y(j))/(signal_x(j))); %расчет начальной
фазы
elseif signal_x(j)==0 %условие, необходимое для корректной работы
программы с нулевыми массивами
    phase_signal(j)=0;
else
    phase_signal(j)=pi+atan((signal_y(j))/(signal_x(j)));
end
    %Расчет ортогональных составляющих 2-ой гармоники
    for m=0:N-1
        y_cos2(N-m)=buf(N-m)*cos((j+N-1-m)*2*2*pi/N);
        y_sin2(N-m)=buf(N-m)*sin((j+N-1-m)*2*2*pi/N);
    end
signal_y2(j)=(2/N)*sum(y_cos2)/sqrt(2);
signal_x2(j)=(2/N)*sum(y_sin2)/sqrt(2);
modul_signal2(j)=sqrt((signal_x2(j))^2+(signal_y2(j))^2);
if signal_x2(j)>0
    phase_signal2(j)=atan((signal_y2(j))/(signal_x2(j)));
elseif signal_x2(j)==0
    phase_signal2(j)=0;
else
    phase_signal2(j)=pi+atan((signal_y2(j))/(signal_x2(j)));
end
end
end
end

```

#### 4.4 Определение наиболее оптимальной модели

На основе описанных выше алгоритмов выделения ортогональных компонент, расчета модуля и начальной фазы векторного изображения сигнала разработано три варианта модели устройства дифференциальной защиты трансформатора «Сириус-Т». Название моделей соответствуют применяемому в них способу цифровой фильтрации - МНК, ФОС, ДПФ. Данные модели были испытаны при тех же параметрах входного сигнала, что и реальное устройство.

Важно отметить, что при испытании моделей блокировка защиты по второй гармонике была выведена из работы путем задания соответствующей уставки  $I_{дг2}/I_{дг1} = 1,0$ , хотя при испытании реального устройства данная блокировка была в работе с уставкой  $I_{дг2}/I_{дг1} = 0,15$ . Это сделано по причине того, что из-за возникающих колебаний амплитуды при определении модуля сигнала любым алгоритмом цифровой фильтрации, описанным в данной работе, минимальное время его работы равно 21 мс при любых комбинациях

действующих значений входных сигналов тока в доаварийном и аварийном режимах. После одного периода промышленной частоты цифровые фильтры точно определяют действующие значения первой и второй гармонических составляющих сигнала и блокировка снимается.

В реальном устройстве предусмотрен специальный анализ характера дифференциального тока, позволяющий снимать блокировку по второй гармонике, если её появление вызвано не броском тока намагничивания [1], и поскольку подаваемый на защиту ток был чисто синусоидальным время срабатывания цифрового фильтра получилось менее одного периода промышленной частоты. Реализация модели такого анализа является отдельной задачей и будет осуществлена в дальнейших исследованиях.

В данной же работе поскольку подаваемый сигнал является чисто синусоидальным работа анализа характера дифференциального тока заменяется выводом алгоритма обнаружения БТН из работы.

Время срабатывания защиты определялось при помощи анализа массива значений, отвечающего за состояние выходного реле устройства и обновляющегося каждый период дискретизации. По-умолчанию все члены данного массива равны нулю, что моделирует разомкнутые контакты выходного реле. При срабатывании защиты на отсчёте  $h$  соответствующий член массива принимает значение, равное единице, что означает замыкание контактов. По временному ряду  $t$  программа определяет момент времени, соответствующий отсчёту срабатывания защиты  $h$ . Вывод результата осуществляется с помощью функции `num2str(t(h))`, преобразовывающей числовой формат в текстовый, и последующим выводом на экран с помощью функции `disp(result)` [10]. В среде MatLab данный алгоритм выглядит следующим образом:

```
for h=1:length(t) %ряд отсчётов времени
    if Privod(h)>0 %проверка срабатывания защиты
        result=['Время срабатывания - ', num2str(t(h))]; %определение
    времени срабатывания защиты по временному ряду t
        disp(result) %вывод результата
        break; %завершение работы программы, защита сработала
    end end
```

Полученные зависимости времени срабатывания цифровых фильтров моделей от действующего значения дифференциального тока в доаварийном и аварийном режимах представлены в табл.4.4. Несовпадения времени срабатывания моделей с опытными данными выделены полужирным шрифтом.

Таблица 4.6 - Результаты испытания моделей защиты

$I_{\text{диф.доав}}/I_{\text{д1}}$	$I_{\text{диф.ав}}/I_{\text{д1}}$	$T_{\text{фильтр.реал}},$ мс	$T_{\text{МНК}},$ мс	$T_{\text{ФОС}},$ мс	$T_{\text{ДПФ}},$ мс
0,98	1,02	11,0	<b>21,0</b>	11,0	<b>16,0</b>
	2	6,0	6,0	6,0	6,0
	3	6,0	6,0	6,0	6,0
	4	6,0	6,0	6,0	6,0
	6	6,0	6,0	6,0	6,0
0,5	1,02	11,0	<b>21,0</b>	<b>21,0</b>	<b>21,0</b>
	2	6,0	<b>11,0</b>	<b>11,0</b>	<b>11,0</b>
	3	6,0	<b>11,0</b>	6,0	11,0
	4	6,0	6,0	6,0	6,0
	6	6,0	6,0	6,0	6,0
0	1,02	16,0	<b>21,0</b>	<b>21,0</b>	<b>21,0</b>
	2	11,0	11,0	11,0	<b>16,0</b>
	3	11,0	11,0	11,0	11,0
	4	11,0	<b>6,0</b>	<b>6,0</b>	<b>11,0</b>
	6	11,0	<b>6,0</b>	<b>6,0</b>	<b>6,0</b>

Анализируя результаты, полученные в табл.4.4, можно сделать вывод, что наиболее подходящей из трех исследуемых является модель, рассчитывающая модуль и начальную фазу вектора тока по методу формирования ортогональных составляющих. Этот вывод основан на том, что результаты, полученные с использованием этой модели, имеют больше всего совпадений с реальными данными по времени работы цифрового фильтра.

При этом можно предположить, что при  $I_{\text{диф.доав}}/I_{\text{д1}} = 0$  и  $I_{\text{диф.ав}}/I_{\text{д1}} = 1,02$  работа цифрового фильтра за счёт разброса значений времени срабатывания выходного реле устройства осуществляется за 21,0 мс. Это вполне возможно, поскольку для большинства фильтров защит при входных значениях тока, едва превышающих уставку срабатывания, цифровой фильтр определяет точные значения модулей только спустя период промышленной

частоты. Данное предположение сокращает число несовпадений результатов модели с реальными данными.

Таким образом, на основе проведенных исследований определено, что наиболее оптимальной моделью устройства дифференциальной защиты трансформатора «Сириус-Т» является программа, рассчитывающая модули и начальные фазы векторных изображений сигнала по методу формирования ортогональных составляющих.

Однако стоит понимать, что при проведении исследования работы устройства не было учтено множество факторов, с которыми необходимо считаться при разработке устройств релейной защиты. В действительности сигнал тока передаётся в устройства релейной защиты через измерительные трансформатора тока, которые вносят изменения в форму сигнала и его параметры. Поэтому в дальнейших исследованиях в рамках магистерской работы необходимо применять модели групп измерительных трансформаторов тока. Помимо измерительных трансформаторов, при исследовании работы устройства также необходимо использовать модель силового трансформатора, поскольку при трансформации первичный сигнал тока также претерпевает некоторые изменения.

При проведении данного исследования в работе использовалась идеальная модель сигнала, состоящая из одной синусоиды промышленной частоты. В реальности же сигнал тока помимо основной гармоники содержит высшие гармонические составляющие и возникающую при коротких замыканиях переходную апериодическую составляющую. Наличие этих составляющих сказывается на качестве фильтрации сигнала, а значит и на времени работы защиты, поэтому в дальнейших исследованиях необходимо использовать сложную модель входного сигнала для выявления характеристик работы устройства в аварийных режимах, токи которых наиболее приближены к реальным.

Из описанного выше следует вывод, что исследование, проведенное в рамках данной работы, является первичным и основополагающим.

В связи с этим разработанные модели требуют дальнейшего исследования с учетом факторов, описанных выше. Это может быть осуществлено с применением пакета Simulink, встроенного в среду MatLab. Simulink позволяет разработать модель фрагмента электрической сети и основных элементов измерительного органа микропроцессорного устройства (ФНЧ, АЦП, цифровой фильтр).

Интеграция программ MatLab в пакет Simulink является сложной и объёмной задачей и будет реализована в рамках магистерской работы.

## **5 СЕТЕВОЙ ГРАФИК РАЗРАБОТКИ МОДЕЛИ МИКРОПРОЦЕССОРНОГО УСТРОЙСТВА «СИРИУС-Т»**

### **5.1 Цели и задачи составления сетевого графика**

Выполнение любого, наперед заданного комплекса работ, требует его точного и обоснованного планирования. Применительно к задачам электроэнергетики, для этого используют метод сетевого планирования и управления. Его целесообразно применять в трудовых процессах, где имеет место определенная последовательность операций, где ограничены ресурсы времени и достижение конечных целей зависит от многих условий, промежуточных результатов и успешной координации действий отдельных участков комплекса работ.

Касательно рассматриваемой темы, разработка сетевого графика позволяет организовать процесс разработки модели устройства «Сириус-Т», а именно:

- заранее планировать последовательность и взаимосвязанность работ, одновременно входящих в комплекс разработки модели;
- следить за выполнением каждой работы;
- выявлять и устранять задержки, появляющиеся при выполнении работ.

Разработка сетевого графика позволяет определить затраты времени на разработку модели как результат расчета суммарной продолжительности критического пути.

Для этого определяется длительность выполнения всех работ, входящих в комплекс разработки и реализации модели устройства, а также выполняется расчет времени их ранних и поздних начал и других сопутствующих параметров. При этом разработка модели терминала рассматривается как процесс, состоящий из определенного числа параллельных работ, каждое из которых имеет резервы времени.

Целью выполнения данного раздела является построение оптимального графика разработки полной модели устройства, который позволит отметить временные ориентиры и границы выполнения каждой отдельной работы, входящей в него.

При определении сроков разработки и реализации модели учитывается, что сокращение или увеличение продолжительности критических работ соответственно сокращает или увеличивает общую длительность работ по сетевому графику.

В целях выполнения данного раздела сформулированы следующие вспомогательные задачи:

- необходимо составить сетевой график выполнения всего объема работ, связанных с разработкой модели устройства;
- необходимо произвести расчет параметров сетевого графика с использованием разработанной для этого методики;
- выполнить привязку сетевого графика к календарю, тем самым отметив даты начала работ, входящих в комплекс построения модели терминала.

Помимо этого, одним из результатов расчета сетевого графика является фиксирование запасов (резервов) времени для работ, которые не лежат на критическом пути. Увеличение продолжительности некритических работ в пределах доступных резервов времени помогает освобождать при этом временные ресурсы для критических работ.

После определения критического пути и получения даты, к которой необходимо разработать готовую модель устройства, по результатам привязки к календарю устанавливается дата, когда необходимо приступить к работе, чтобы закончить построение модели в установленный срок.



## **5.2 Система сетевого планирования и управления. Сетевой график и его элементы**

Система сетевого планирования и управления (СПУ) является разновидностью автоматизированной системы управления, целью которой является достижение поставленной задачи при помощи управления деятельностью одной или многих групп людей, участвующих в создании единого комплекса.

Система СПУ позволяет заранее планировать порядок выполнения и взаимосвязанность работ, участвующих в комплексе, а также осуществлять контроль за выполнением каждой работы, выявлять и устранять возникающие в ходе работ задержки.

Система СПУ успешно применяется как при проектировании, так и при строительстве комплексов.

Для отображения процесса выполнения работ и управления ими в системе СПУ используется сетевая модель (сетевой график), которая позволяет:

а) четко, с любой степенью детализации установить взаимосвязь между отдельными работами комплекса;

б) наиболее эффективно использовать имеющиеся ресурсы;

в) проводить многовариантный анализ различных решений по изменению порядка выполнения работ;

г) повысить качество планов и технических решений по организации и производству в результате точного и обоснованного расчета длительности работ;

д) упростить процесс управления ходом работ за счет введения понятия критического пути, ограничения объема и систематизации информации, перерабатываемой при управлении.

**Сетевая модель** является графическим изображением процессов, выполнение которых необходимо для достижения поставленных целей, с указанием взаимосвязей между этими процессами.

**Сетевым графиком** называется график выполнения работ с установленными расчетами сроками их выполнения. Сетевой график является сетевой моделью с рассчитанными сроками выполнения работ.

Сетевой график состоит из следующих элементов [11]:

а) **работа** – процесс, требующий для его выполнения затрат времени и ресурсов;

б) **событие** – результат выполнения (факт окончания) одной или нескольких работ, необходимый и достаточный для начала последующих работ;

в) **ожидание** – технологический или организационный перерыв между работами, вызванный условиями строительства, процесс, требующий только затрат времени;

г) **зависимость** – фиктивная работа, которая вводится в график для отражения правильной взаимосвязи между работами; не требует затрат времени и ресурсов.

Работа и ожидание изображаются на сетевом графике одной сплошной стрелкой, зависимость (фиктивная работа) – пунктирной стрелкой.

Длина и направление стрелок не отображают продолжительность работ.

Продолжительность работы подписывается под стрелкой, наименование работы – над стрелкой. Событие изображается кружком и нумеруется.

Работа, а также ожидание и зависимость шифруются номерами двух ограничивающих событий: начального и конечного

**Предшествующие работы** – работы, выполнение которых является непременным условием начала данной работы. Никакая работа не может быть начата, пока не выполнены все предшествующие ей работы.

**Последующие работы** – работы, для которых одним из непременных условий их начала является выполнение данной работы.

**Конечное событие** данной работы для зависимости является одновременно начальным событием последующих работ.

**Исходное событие сетевого графика** – начальное событие работ, входящих в график.

**Завершающие работы сетевого графика** – работы, выполнением которых достигается поставленная конечная цель.

**Завершающее событие сетевого графика** – конечное событие завершающих работ.

**Продолжительность работы** – время выполнения данной работы в рабочих днях или месяцах, принятых в качестве измерителя для всех работ данного сетевого графика.

Построение сетевых графиков осуществляется по следующим правилам [11]:

а) направление стрелок в сетевом графике принимается слева направо;  
б) график должен иметь простую форму без излишних пересечений, большинство работ следует изображать горизонтальными линиями;

в) при выполнении параллельных работ, т. е., если одно событие служит началом двух или более работ, заканчивающихся другими событиями, вводятся зависимость и дополнительное событие;

г) группа работ на сетевом графике может отображаться как одна работа, если в этой группе имеются одно начальное и одно конечное события (применяется при укрупнении сетевых графиков);

д) в сетевом графике не допускается наличие замкнутых контуров (циклов), т. е. работы не должны возвращаться к тому событию, из которого они вышли. Если таковые обнаружены при первоначальном построении сетевого графика, то это обозначает наличие ошибки в исходных данных.

Любая непрерывная последовательность работ и зависимостей в сетевом графике называется **путем**. В сетевом графике между начальным и конечным событиями имеется несколько путей. Продолжительность пути рассчитывается как сумма продолжительностей составляющих его работ.

**Полный путь** – путь от исходного до завершающего события сетевого графика.

**Критический путь** – путь наибольшей продолжительности между начальным и конечным событиями; его продолжительность определяет срок выполнения поставленной задачи.

Работы, составляющие критический путь, называются критическими. При сокращении или увеличении продолжительности этих работ соответственно сокращается или увеличивается общая продолжительность работ по сетевому графику.

Выполнение работ, включенных в критический путь, означает выполнение всех работ по сетевому графику. Поскольку остальные пути меньше по продолжительности, они имеют некоторые запасы времени, которые могут быть использованы для освобождения ресурсов для критических работ.

Сетевой график разработки модели микропроцессорного устройства «Сириус-Т» приведен на рис.5.1 (цифры в кружках обозначают события; цифры под линиями – рабочие дни разработки модели; утолщенные линии – критический путь).



Рисунок 5.1 - Сетевой график разработки модели устройства «Сириус-Т»

Расчет сетевого графика заключается в определении раннего и позднего начала работ, раннего и позднего окончания работ, критического пути и включенных в него работ, запасов времени и календарных дат [11].

**Раннее начало работы** — самое раннее время начала работы, определяющееся продолжительностью самого длинного пути от начального события до начала данной работы.

**Раннее окончание работы** — время окончания работы, определяющееся суммой раннего начала и продолжительности данной работы.

Раннее начало и окончание работ необходимо определять для всех работ по графику последовательно, начиная с начального события.

**Позднее начало работы** — самый поздний срок начала работы без изменений величины критического пути, или самое позднее время начала работ, которое не приведет к увеличению общего срока достижения цели.

**Позднее окончание работы** — время окончания работы, определяющееся суммой позднего начала и продолжительности данной работы.

Все работы, входящие в конечные (завершающие) события, имеют позднее окончание, равное величине критического пути.

**Общий запас времени** — количество времени, на которое допустимо перенести начало работы или увеличить ее продолжительность без изменения общего срока выполнения поставленной задачи, определяется разностью позднего и раннего начала или позднего и раннего окончания работы.

**Частный запас времени** — количество времени, на которое допустимо перенести начало работы или увеличить ее продолжительность без изменения раннего начала последующих работ.

Если критический путь превысил заданный срок, то переходят к следующему этапу — оптимизации сетевого графика по времени.

По сетевому графику, представленном на рис.5.1, составляется табл.5.1, в которой отражаются длины путей и продолжительности выполнения работ.

Таблица 5.1 - Длины путей и продолжительность выполнения работ по сетевому графику

Путь	Продолжительность, рабочие дни
1-2-4-5-6-8-9-10	$1+3+2+7+3+3+1=20$ дней
1-3-4-5-6-8-9-10	$2+4+2+7+3+3+1=22$ дня
1-3-7-8-9-10	$2+1+2+3+1=9$ дней

### 5.3 Расчет сетевого графика четырехсекторным способом

Расчет сетевого графика по времени выполняется на основе оценки времени каждой работы графика, получаемых либо на основании имеющихся нормативов (детерминированные сети), либо вероятностными методами (стохастические сети). В результате расчета определяется продолжительность критического пути, наиболее ранние возможные и наиболее поздние допустимые сроки начала и окончания работ, а также резервы времени работ - полный и свободный.

Наиболее удобным методом расчета сетевого графика в практике является **четырёхсекторный** способ [11].

Рассматриваемое в данный момент событие сетевого графика обозначается через  $i$ , все предшествующие ему события — через  $h$ , а последующие — через  $j$  (рис.5.2). Следующие после  $j$  события обозначаются через  $k$ .

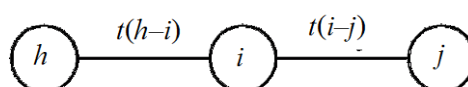


Рисунок 5.2 - Обозначения элементов сетевого графика

Исходя из этих условных обозначений, можно записать алгоритм расчета сетевой модели. Для расчета каждое событие графика делится на четыре сектора. В верхнем секторе записывается номер данного события. В левом секторе — наиболее ранний возможный срок совершения данного события, а в правом — наиболее поздний допустимый срок его совершения. В

нижнем секторе записывается номер того из предшествующих событий, которое указывает на направление пути наибольшей продолжительности, ведущего к данному событию (рис.5.3). Указание в нижнем секторе позволяет самым простым образом определять критический путь сетевого графика - после расчета ранних сроков совершения событий.

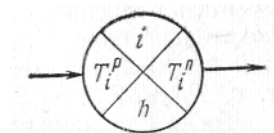


Рисунок 5.3 - Четырехсекторная система обозначения элементов сетевого графика

Срок совершения исходного события принимается за нуль. Далее, следуя логике сети и заданным оценкам времени работ, необходимо выполнить расчет сети слева направо, от исходного события сети к завершающему. При этом определяется наиболее ранний возможный срок совершения каждого события:

$$T_i^p = \max[T_h^p + t_{h-i}],$$

где  $t_{h-i}$  – продолжительность соответствующей работы.

Расчет раннего срока завершающего события позволяет определить продолжительность критического пути. Направление критического пути определяется справа налево, от завершающего события к исходному, при помощи указаний в нижнем секторе каждого события.

Расчет поздних сроков совершения событий выполняется последовательно справа налево, от конца к началу. Принимается, что ранние и поздние сроки завершающего события совпадают.

Тогда для каждого события:

$$T_i^n = \min[T_j^n - t_{i-j}].$$

Расчет сетевого графика четырехсекторным методом приведен на рис.5.4.



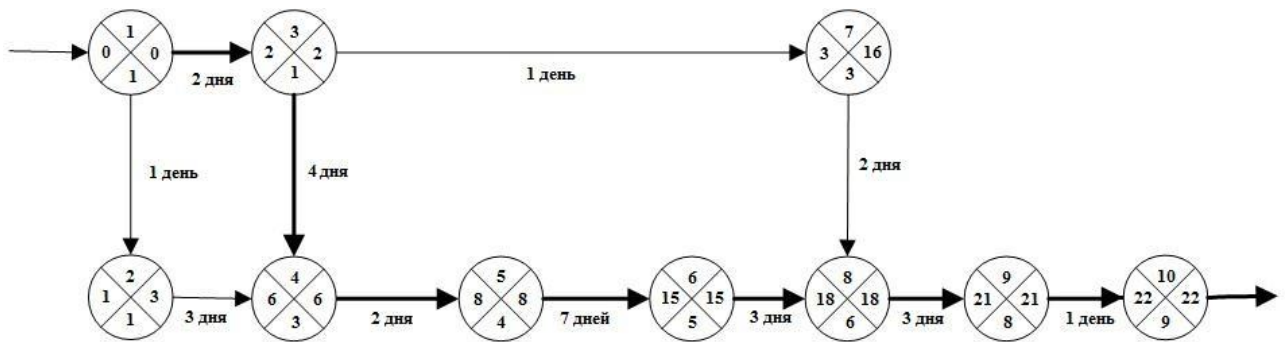


Рисунок 5.4 - Расчет сетевого графика четырехсекторным способом

По проведенному расчету выявлен критический путь: 1-3-4-5-6-8-9-10.

Для всех критических событий ранние и поздние сроки совершения совпадают, т.е. эти события не имеют резервов времени. Для всех других событий:

$$R_i = T_i^п - T_i^р.$$

Расчет времени совершения событий позволяет простейшим способом определить ранние возможные и поздние допустимые сроки начала и окончания работ и резервы времени. Ранний возможный срок начала каждой работы равен раннему сроку совершения ее начального события:

$$T_{i-j}^{р.н.} = T_i^р. \quad (5.1)$$

Поздний допустимый срок окончания каждой работы равен позднему сроку свершения ее конечного события:

$$T_{i-j}^{п.о.} = T_j^п. \quad (5.2)$$

Сроки раннего окончания и позднего начала каждой работы находятся следующим образом:

$$T_{i-j}^{р.о.} = T_{i-j}^{р.н.} + t_{i-j} = T_i^р + t_{i-j}; \quad (5.3)$$

$$T_{i-j}^{п.н.} = T_{i-j}^{п.о.} - t_{i-j} = T_j^п - t_{i-j}. \quad (5.4)$$

Далее для каждой работы определяется полный (общий) и свободный (частичный) резервы времени. Полный резерв времени работы определяет запас, который можно использовать на данной работе без ущерба для конечного срока всего объема выполнения работ. Однако при этом в зависимости от степени использования этого резерва сроки выполнения последующих работ становятся все более сжатыми. Полное использование этого запаса приводит к тому, что последующие работы лишаются резерва времени, т.е. становятся критическими. Свободный резерв времени работы, наоборот, представляет запас времени, использование которого никак не влияет на время выполнения последующих работ, т.е. позволяет выполнять последующие работы в их ранние возможные сроки. Расчет этих резервов времени производится следующим образом:

$$R_{i-j} = T_j^{\text{п}} - T_i^{\text{п}} - t_{i-j} = T_{i-j}^{\text{п.о.}} - T_{i-j}^{\text{п.о.}}; \quad (5.5)$$

$$r_{i-j} = T_j^{\text{п}} - T_i^{\text{п}} - t_{i-j} = T_{j-k}^{\text{п.н.}} - T_{i-j}^{\text{п.о.}}. \quad (5.6)$$

Расчет по формулам (5.1) - (5.6) для рассматриваемого сетевого графика разработки модели сведен в табл.5.2.

Таблица 5.2 - Расчет сетевого графика (в рабочих днях)

Шифры работ	Ранние		Поздние		Резервы		Даты ранних начал
	начала РН	окончания РО	начала ПН	окончания ПО	общие $R$	частные $r$	
1-2	0	1	2	3	2	0	01.04.2020
1-3	0	2	0	2	0	0	01.04.2020
2-4	1	4	3	6	2	2	02.04.2020
3-4	2	6	2	6	0	0	03.04.2020
3-7	2	3	15	16	13	0	03.04.2020
4-5	6	8	6	8	0	0	09.04.2020
5-6	8	15	8	15	0	0	13.04.2020
6-8	15	18	15	18	0	0	22.04.2020
7-8	3	5	16	18	13	13	06.04.2020
8-9	18	21	18	21	0	0	27.04.2020
9-10	21	22	21	22	0	0	30.04.2020

Составим линейную диаграмму выполнения разработки модели устройства «Сириус-Т» (рис.5.5). Линейная диаграмма позволяет в каждый момент времени определить количество осуществляемых одновременно работ или необходимость начала их выполнения. Линейная диаграмма составляется для дней ранних начал работ.

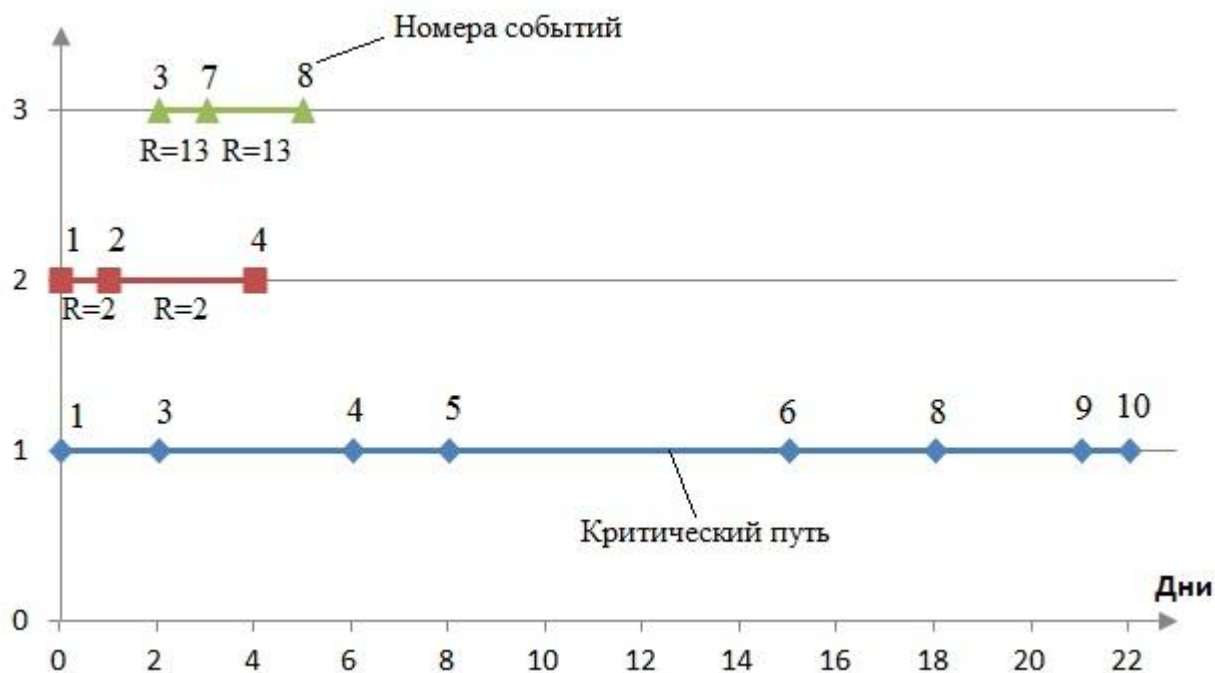


Рисунок 5.5 - Линейная диаграмма разработки модели

#### 5.4 Привязка сетевого графика к календарю

Для удобства контроля и управления по сетевому графику в его расчетной таблице указываются календарные даты выполнения работ по их ранним началам (табл.5.2).

Привязка сетевого графика к календарю производится с помощью таблицы подсчета рабочих календарных дат, охватывающей весь период разработки модели устройства - апрель 2020 года (табл.5.3).

В календарной части табл.5.3 записываются месяцы и числа с исключением выходных и праздничных дней (месяцы указываются в верхней строке, а числа – в вертикальных колонках).

Строки переводного графика представляют собой непрерывные ряды чисел от 1 до 23, заполняемые от диагонали квадрата влево. Табель рабочих дней представляется непрерывным рядом чисел. Строки таблицы соответствуют месяцам, а количества чисел в строке равно количеству рабочих дней в данном месяце.

Для удобства пользования таблицей горизонтальные строки календарной части и вертикальные колонки переводного графика обозначены буквами от А до Ч.

Пользование таблицей осуществляется следующим образом. Пусть известна дата получения задания на разработку модели - 1 апреля 2020 года. В таблице рабочих дней находят известные величины ранних начал, по строке, где занесено это число, определяется месяц и год. Нужная строка календарной части определяется по переводному графику, для этого от найденного в рабочем таблице числа следует подняться до числа 1 в переводном графике, тем самым находится строка, по которой в колонке найденного месяца в календарной части таблицы находится календарная дата раннего начала работы. По результатам вышеописанных действий заполняется соответствующая графа табл.5.2.

Таблица 5.3 - Подсчет календарных дат на апрель 2020 года

Рабочие дни по календарю		Переводной график																						
		А	Б	В	Г	Д	Е	Ж	З	И	К	Л	М	Н	О	П	Р	С	Т	У	Ф	Х	Ц	Ч
А	1	1																						
Б	2	2	1																					
В	3	3	2	1																				
Г	6	4	3	2	1																			
Д	7	5	4	3	2	1																		
Е	8	6	5	4	3	2	1																	
Ж	9	7	6	5	4	3	2	1																
З	10	8	7	6	5	4	3	2	1															
И	13	9	8	7	6	5	4	3	2	1														
К	14	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1													
Л	15	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1												
М	16	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1											
Н	17	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1										
О	20	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1									
П	21	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1								
Р	22	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1							
С	23	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1						
Т	24	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1					
У	27	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1				
Ф	28	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1			
Х	29	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1		
Ц	30	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	
Ч	-	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
Табель рабочих дней		А	Б	В	Г	Д	Е	Ж	З	И	К	Л	М	Н	О	П	Р	С	Т	У	Ф	Х	Ц	Ч
	Апрель	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	

Таким образом, в данном разделе была разработана сетевая модель реализации математического прототипа микропроцессорного устройства «Сириус-Т», построен и рассчитан сетевой график. По результатам расчета сетевого графика был определен критический путь. Это позволило определить сроки разработки и реализации модели терминала.

Срок выполнения каждой из работ определялся экспериментально.

Расчет сетевого графика осуществлен с использованием четырехсекторного метода. При этом был построен линейный график выполнения работ и произведен расчет ранних начал и окончаний работ, поздних начал и окончаний, а также общих и частных резервов времени. Расчет резервов времени позволил определить работы, за счет увеличения продолжительности которых можно освободить ресурсы для критических работ.

Привязка сетевого графика к календарю позволила определить даты начала выполнения всех работ таким образом, чтобы модель была разработана в установленный срок.

## **6 ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ МИКРОПРОЦЕССОРНОГО ТЕРМИНАЛА «СИРИУС-Т»**

При работе с устройством необходимо соблюдать общие требования техники безопасности, распространяющиеся на устройства релейной защиты и автоматики энергосистем.

К эксплуатации допускаются лица, изучившие руководство по эксплуатации данного терминала и прошедшие проверку знаний правил техники безопасности и эксплуатации электроустановок электрических станций и подстанций.

Устройство должно устанавливаться на заземленные металлические конструкции, при этом необходимо обеспечить надежный электрический контакт между панелью и винтами крепления устройства, а также соединить заземляющий болт устройства с контуром заземления медным проводом сечением не менее  $2 \text{ мм}^2$ .

Подключение проводов к зажимам устройства должны производиться при обесточенном состоянии терминала и принятых мерах по предотвращению поражения обслуживающего персонала электрическим током.

Перед установкой устройства рекомендуется произвести проверку его технических характеристик в лабораторных условиях [1].

## 7 РАСЧЕТ ЗАЩИТНОГО ЗАЗЕМЛЕНИЯ ПОДСТАНЦИИ

В данном разделе необходимо рассчитать заземление подстанции 110/10 кВ в двухслойном грунте методом наведенных потенциалов по допустимому сопротивлению заземляющего устройства. Понижающая подстанция имеет два трансформатора 110/10 кВ с эффективно заземленной нейтралью со стороны 110 кВ. Размеры подстанции:  $A = 70$  м,  $B = 80$  м. В качестве естественных заземлителей предлагается использование системы трос-опоры двух подходящих линий напряжением 110 кВ с длиной пролета 250 м. Сечение троса  $S_{тр} = 45$  мм<sup>2</sup>, сопротивление заземления опоры  $R_{оп} = 16$  Ом. В качестве горизонтальных заземлителей применить полосовую сталь сечением 40 x 4 мм, в качестве вертикальных прутковую сталь диаметром 12 мм и длиной 5 м. Расчетное удельное сопротивление верхнего слоя грунта  $\rho_1 = 250$  Ом·м, расчетное удельное сопротивление нижнего слоя грунта  $\rho_2 = 80$  Ом·м. Мощность верхнего грунта  $h_1 = 2,7$  м. Глубина траншеи 0,8 м.

### 7.1 Общие сведения

Защитное заземление - это преднамеренное электрическое соединение открытых проводящих частей электрооборудования, которые могут оказаться под напряжением, с землей или её эквивалентом.

Назначение защитного заземления - устранение опасности поражения током в случае прикосновения к корпусу электроустановки и другим нетоковедущим металлическим частям, оказавшимся под напряжением вследствие замыкания на корпус и по другим причинам.

Принцип действия защитного заземления - снижение до допустимых значений напряжений прикосновения и шага, обусловленных замыканием на корпус и другими причинами. Это достигается путем уменьшения потенциала заземленного оборудования (уменьшением сопротивления заземлителя), а также путем выравнивания потенциалов основания, на котором стоит человек, и заземленного оборудования (подъемом потенциала основания, на котором



стоит человек, до значения, близкого к значению потенциала заземленного оборудования) [12].

## 7.2 Решение

Расчет заземления проводится по методике, предложенной в [12].

Сопротивление растеканию тока  $R_3$  согласно требованиям ПУЭ должно быть не более 0,5 Ом для электроустановок выше 1000 В с режимом эффективно заземленной нейтрали [13].

Сопротивление растеканию системы грозозащитной трос-опоры  $R_e$  определяется по выражению:

$$R_e = \sqrt{r_{\text{оп}} \cdot r_T / n_T}, \quad (7.1)$$

где  $r_{\text{оп}}$  - расчетное, т.е. наибольшее (с учетом сезонных колебаний), сопротивление заземления одной опоры, Ом;  $r_T$  - активное сопротивление троса на длине одного пролета, Ом;  $n_T$  - число тросов на опоре.

Активное сопротивление стального троса определяется по формуле:

$$r_T = \frac{0,15 \cdot l}{S_{\text{тр}}}, \quad (7.2)$$

где  $l$  - длина пролета, м;  $S_{\text{тр}}$  - сечение стального троса, мм<sup>2</sup>.

По (7.1) и (7.2) рассчитывается сопротивление естественного заземлителя для двух линий:

$$R_e = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{r_{\text{оп}} \cdot \frac{0,15 \cdot l}{S_{\text{тр}} \cdot n_T}} = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{16 \cdot \frac{0,15 \cdot 250}{45 \cdot 1}} = 1,826 \text{ Ом.}$$

При использовании естественных заземлителей сопротивление искусственного заземления  $R_{\text{И}}$  больше требуемого  $R_3$  и равно:

$$R_{И} = \frac{R_e \cdot R_3}{R_e - R_3},$$

где  $R_e$  - сопротивление растеканию естественного заземлителя.

С учетом того, что  $R_3 = 0,5$  Ом и  $R_e = 1,826$  Ом требуемое сопротивление искусственного заземлителя  $R_{И}$ :

$$R_{И} = \frac{1,826 \cdot 0,5}{1,826 - 0,5} = 0,69 \text{ Ом.}$$

В электроустановках напряжением свыше 1000 В с эффективно заземленной нейтралью при выполнении заземляющего устройства с соблюдением требований, предъявляемых к его сопротивлению, размещение электродов должно обеспечить возможно полное выравнивание потенциала на занятой электрооборудованием площадке.

С этой целью заземлитель должен быть выполнен в виде горизонтальной сетки из продольных и поперечных проводников, уложенных в земле на глубине (0,5...0,7) м, и вертикальных электродов. При этом контурный электрод, образующий периметр сетки, должен охватывать как распределительные устройства, так и производственные здания и сооружения защищаемого объекта.

Продольные проводники сетки прокладывают вдоль осей электрооборудования и конструкций, со стороны обслуживания, на расстоянии (0,8...1) м от фундамента основания электрооборудования.

Поперечные заземлители следует прокладывать в удобных местах между оборудованием на глубине (0,5...0,7) м от поверхности земли. Расстояние между ними рекомендуется принимать увеличивающимся от периферии к центру заземляющей сетки. При этом первое и последующие расстояния, начиная от периферии, не должны превышать соответственно 4,0; 5,0; 6,0; 7,5; 9,0; 11,0; 13,5; 16,0; 20,0 м [13].

Учитывая описанные выше требования, составляется предварительная схема заземлителя с нанесением на неё на плана подстанции (рис.7.1). Принимается контурный (распределенный) тип заземлителя, т.е. в виде сетки из горизонтальных полосовых и вертикальных стержневых (длиной  $l_B = 5$  м) электродов. Вертикальные электроды размещаются по периметру заземлителя.

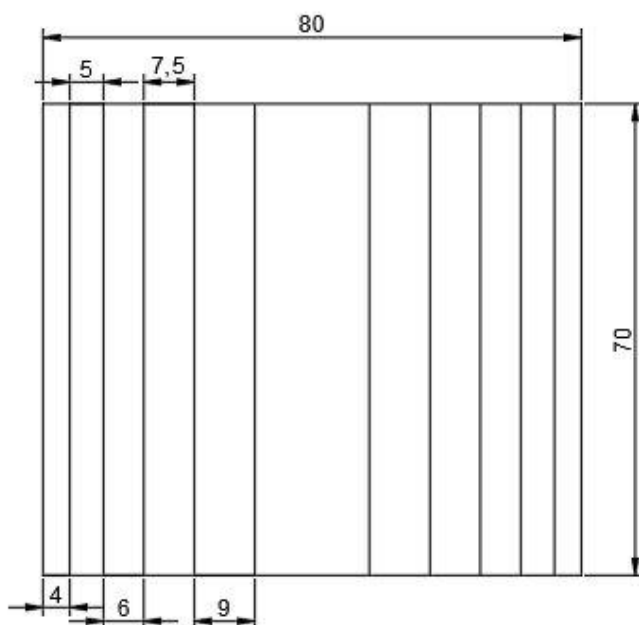


Рисунок 7.1 - Предварительная схема заземлителя

По рис.7.1 определяется суммарная длина горизонтальных и вертикальных электродов:

$$L_{\Gamma} = 70 \cdot 12 + 80 \cdot 2 = 1000 \text{ м};$$

$$n = 30 \text{ шт};$$

$$L_B = n \cdot l_B = 30 \cdot 5 = 150 \text{ м}.$$

где  $L_{\Gamma}$  - суммарная длина горизонтальных электродов, м;  $n$  - количество вертикальных электродов;  $l_B$  - длина одного вертикального электрода, м;  $L_B$  - суммарная длина вертикальных электродов, м.

Далее составляется условная расчетная модель заземлителя (рис.7.2) в виде квадратной сетки из взаимно пересекающихся полос с вертикальными

электродами площадью  $S = 70 \cdot 80 = 5600 \text{ м}^2$ . Длина одной стороны сетки будет равна  $\sqrt{S} = 74,83 \text{ м}$ .

После этого вычисляется количество ячеек по одной стороне модели и уточняется суммарная длина горизонтальных электродов:

$$m = \frac{L_{\Gamma}}{2 \cdot \sqrt{S}} - 1 = \frac{1000}{2 \cdot \sqrt{5600}} - 1 = 5,68 \cong 6;$$

$$L_{\Gamma} = 2 \cdot (m + 1) \cdot \sqrt{S} = 2 \cdot (6 + 1) \cdot \sqrt{5600} = 1047,7 \text{ м}.$$

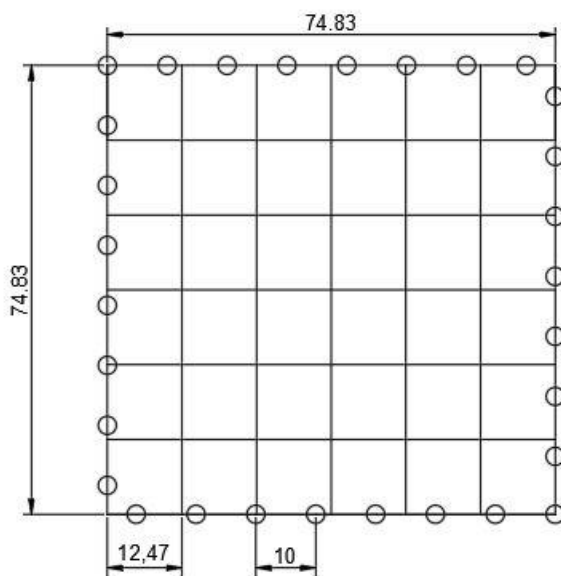


Рисунок 7.2 - Расчетная модель заземлителя

Длина стороны ячейки в модели:

$$b = \frac{\sqrt{S}}{m} = \frac{\sqrt{5600}}{6} = 12,47 \text{ м}.$$

Расстояние между вертикальными электродами по их известному количеству  $n$ :

$$a = \frac{4\sqrt{S}}{n} = \frac{4 \cdot \sqrt{5600}}{30} = 9,98 \cong 10 \text{ м}.$$

Суммарная длина вертикальных электродов равна  $L_{\text{В}} = 150 \text{ м}$ .

Далее рассчитывается относительная глубина погружения в землю вертикальных электродов:

$$t_{\text{отн}} = \frac{(l_B + t_B)}{\sqrt{S}},$$

где  $t_B$  - глубина погружения в землю верхнего конца вертикального электрода, равная глубине траншеи;  $l_B$  - длина вертикального электрода.

$$t_{\text{отн}} = \frac{(5 + 0,8)}{\sqrt{5600}} = 0,0775.$$

Относительная длина верхней части вертикального заземлителя, т.е. части, находящейся в верхнем слое земли:

$$l_{\text{отн}} = \frac{(h_1 - t_B)}{l_B},$$

где  $h_1$  - мощность верхнего грунта, м.

$$l_{\text{отн}} = \frac{(2,7 - 0,8)}{5} = 0,38.$$

После этого рассчитывается эквивалентное удельное сопротивление двухслойной земли для сложного группового заземлителя в виде горизонтальной квадратной сетки с квадратными ячейками одинакового размера и равномерно размещенными вертикальными электродами по контуру заземлителя  $\rho_3$ :

$$\rho_3 = \rho_2 \left( \frac{\rho_1}{\rho_2} \right)^k,$$

где  $\rho_1$  и  $\rho_2$  - удельное сопротивление верхнего и нижнего слоев земли соответственно;  $k$  - показатель степени.

При отношении  $\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{250}{80} = 3,125$  показатель степени вычисляется по формуле [12]:

$$k = 0,43 \cdot (l_{\text{отн}} + 0,272 \cdot \ln \frac{a\sqrt{2}}{l_B}) = 0,43 \cdot (0,38 + 0,272 \cdot \ln \frac{10 \cdot \sqrt{2}}{5}) = 0,285.$$

Тогда:

$$\rho_{\text{э}} = 80 \cdot \left(\frac{250}{80}\right)^{0,285} = 110,7 \text{ Ом} \cdot \text{м}.$$

Далее вычисляется искомое расчетное сопротивление  $R_{\text{И}}$ . Сопротивление растеканию сложного заземлителя в виде горизонтальной квадратной сетки с квадратными ячейками одинакового размера и равномерным размещением вертикальных электродов по контуру заземлителя можно определить по выражению:

$$R_{\text{И}} = A \cdot \frac{\rho_{\text{э}}}{\sqrt{S}} + \frac{\rho_{\text{э}}}{L_{\Gamma} + L_{\text{В}}},$$

где  $A$  - коэффициент, значение которого при  $0 \leq t_{\text{отн}} \leq 0,1$  равно [12]:

$$A = 0,444 - 0,84 \cdot t_{\text{отн}} = 0,444 - 0,84 \cdot 0,0775 = 0,3789.$$

Получается:

$$R_{\text{И}} = 0,3789 \cdot \frac{110,7}{\sqrt{5600}} + \frac{110,7}{1047,7 + 150} = 0,65 \text{ Ом}.$$

Это значение  $R_{\text{И}}$  практически совпадает с требуемым сопротивлением искусственного заземлителя (0,69 Ом). Эта разница допустима, поскольку в данном случае она повышает условия безопасности.

В конце необходимо рассчитать общее сопротивление заземлителя подстанции (с учетом сопротивления естественного заземлителя):

$$R_3 = \frac{R_{\text{И}} \cdot R_{\text{е}}}{R_{\text{И}} + R_{\text{е}}} = \frac{0,65 \cdot 1,826}{0,65 + 1,826} = 0,48 \text{ Ом.}$$

Значение сопротивления растеканию удовлетворяет требованиям ПУЭ.

### 7.3 Вывод по расчету

Таким образом, искусственный заземлитель подстанции должен быть выполнен из горизонтальных пересекающихся полосовых электродов сечением 40 x 4 мм общей длиной не менее 1047,7 м и вертикальных в количестве не менее 30 шт. диаметром 12 мм, длиной по 5 м, размещенных по периметру заземлителя по возможности равномерно, т.е. на одинаковом расстоянии один от другого, с глубиной погружения электродов в землю 0,8 м. При этих условиях сопротивление  $R_{\text{И}}$  искусственного заземлителя в самое неблагоприятное время года не будет превышать 0,65 Ом, а сопротивление заземлителя подстанции в целом  $R_3 = 0,48$  Ом, т.е. общее сопротивление искусственного и естественного заземлителей будет не более 0,5 Ом.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Целью данной работы являлось ознакомление с принципами функционирования цифровых устройств релейной защиты на базе терминала дифференциальной защиты трансформатора «Сириус-Т» производства АО «РАДИУС Автоматика», разработка и исследование математической модели этого устройства.

В первой и второй главах данной работы были изучены основные функции и возможности устройства, рассмотрены принципы функционирования ступеней дифференциальной защиты и описана методика расчета уставок, рекомендованная фирмой-изготовителем.

В третьей главе был проведен обзор математических алгоритмов наиболее часто применяемых способов цифровой фильтрации сигнала в современных микропроцессорных терминалах релейной защиты - метод наименьших квадратов, формирование ортогональных составляющих, дискретное преобразование Фурье.

В четвертой главе на основе сведений об изученных алгоритмах цифровой фильтрации, общих алгоритмах устройства, принципах формирования тормозного и дифференциального токов было разработано несколько математических моделей устройства, различающихся принципами цифровой фильтрации. Далее, с помощью результатов, полученных на реальном устройстве, была выбрана наиболее приемлемая модель.

Таким образом, на основе проведенных исследований определено, что наиболее оптимальной моделью устройства дифференциальной защиты трансформатора «Сириус-Т» является программа, рассчитывающая модули и начальные фазы векторных изображений сигнала по методу формирования ортогональных составляющих.

Однако, поскольку при разработке и сравнении модели с реальным устройством не было учтено множество факторов, исследование, проведенное в рамках данной работы, было определено как первичное и основополагающее. В



связи с этим разработанные модели требуют дальнейшей доработки, что будет осуществлено в рамках магистерской работы.

В пятой главе была разработана сетевая модель реализации математического прототипа микропроцессорного устройства «Сириус-Т», построен и рассчитан сетевой график. По результатам расчета сетевого графика был определен критический путь. Это позволило определить сроки разработки и реализации модели терминала.

В шестой главе были описаны основные требования по технике безопасности, предъявляемые к персоналу при эксплуатации микропроцессорного терминала «Сириус-Т».

В седьмой главе был выполнен расчет защитного заземления подстанции 110/10 кВ в двухслойном грунте методом наведенных потенциалов по допустимому сопротивлению заземляющего устройства.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Микропроцессорное устройство защиты «Сириус-Т» [Электронный ресурс] // Руководство по эксплуатации. БПВА.656122.038 РЭ. – АО «Радиус Автоматика». – Режим доступа: [https://www.rza.ru/upload/iblock/f6e/rukovodstvo-po-ekspluatatsii-sirius\\_t-\\_redaktsiya-1.24-ot-11.05.18\\_.pdf](https://www.rza.ru/upload/iblock/f6e/rukovodstvo-po-ekspluatatsii-sirius_t-_redaktsiya-1.24-ot-11.05.18_.pdf) – Загл. с экрана.
2. Руководящие указания по релейной защите. Вып.13Б. Релейная защита понижающих трансформаторов и автотрансформаторов 110-500 кВ: Расчеты. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 96 с.
3. Руководящие указания по релейной защите. Вып.13А. Релейная защита понижающих трансформаторов и автотрансформаторов 110-500 кВ: Схемы. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 112 с.
4. Сергиенко, А.Б. Цифровая обработка сигналов / А.Б.Сергиенко. –СПб.: Питер, 2002. – 608 с.
5. Реализация цифровых фильтров в микропроцессорных устройствах релейной защиты / Ю. В. Румянцев [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2016. Т. 59, № 5. С. 397–417
6. Фролова, Е.А. Совершенствование методик выбора уставок и проверки устойчивости функционирования дистанционных органов: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02. – НГТУ, Новосибирск, 2019. – 174 с.
7. Sachdev, M. S. A New Algorithm for Digital Impedance Relays / M. S. Sachdev, M. A. Varibeau // *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1979. – No 6. P. 2232–2240.
8. Лоусон, Ч. Численное решение задач метода наименьших квадратов / Ч. Лоусон, Р. Хенсон: пер. с англ. – М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. – 232 с.
9. Rebizant, W. Digital Signal Processing in Power System Protection and Control / W. Rebizant, J. Szafran, A. Wiszniewski // Springer. London, 2011. – 316 p.

10. Консультационный центр MATLAB компании Softline [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://matlab.exponenta.ru/gui/index.php>. – Загл. с экрана.

11. Чернов, С.С. Сетевое планирование в энергетике. Экономика и менеджмент в техносфере: методические указания для выполнения курсовой работы для технических специальностей факультета энергетике/ С.С. Чернов, Е.В. Малькова. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2007. – 26 с.

12. Парахин, А.М. Проектирование и расчет защитного заземления: методическое пособие/ А.М. Парахин, О.В.Тихонова . – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2013. – 45 с.

13. Правила устройства электроустановок ПУЭ. – 7-е изд. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2003.