



ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
УПРАВЛЕНИЕ ЦИФРОВЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Кафедра «Цифровые технологии и платформы  
в энергетике»

## **Сборник задач** по дисциплине

# **«Проектирование систем релейной защиты и автоматики»**

Авторы  
Шелест В.А.  
Юров А.А.

Ростов-на-Дону, 2023

## Аннотация

Сборник задач предназначен для практических занятий и контрольных работ студентов всех форм обучения направлений 13.04.02 Интеллектуальные электроэнергетические системы.

## Авторы

к.т.н., доцент кафедры «Цифровые технологии и платформы в энергетике»  
Шелест В.А.

к.т.н, зав. кафедры «Цифровые технологии и платформы в энергетике»  
Юров А.А.



## Оглавление

<b>Введение .....</b>	<b>4</b>
<b>1. Терминал Сириус-2ДЗЛ-01(Задача 1) .....</b>	<b>5</b>
1.1. Дифференциальная защита воздушной линии с ответвлением 5	
1.2. Контрольные вопросы.....	12
<b>2. Терминал сириус-Т (Задача 2) .....</b>	<b>13</b>
2.1. Дифференциальная защита двухобмоточного трансформатора.....	13
2.2. Контрольные вопросы.....	18
<b>3. Терминал сириус-Т3 (Задача 2) .....</b>	<b>19</b>
3.1. Дифференциальная защита трехобмоточного трансформатора.....	19
3.2. Контрольные вопросы.....	27
<b>4. Контрольная работа .....</b>	<b>28</b>
4.1. Требования к контрольным работам .....	28
4.2. Реферат .....	28
4.3. Исходные данные к задаче .....	30
<b>Перечень информационных ресурсов литературы .....</b>	<b>32</b>

## ВВЕДЕНИЕ

Дисциплина «Проектирование систем релейной защиты и автоматики» предназначена для развития у студентов навыков самостоятельного расчета уставок различных видов защит и автоматики, что обеспечивает правильное функционирование этих устройств в нормальных и кратковременных аварийных режимах в электрических системах. Наиболее важным является правильно проектирование для электростанций, подстанций и системообразующих сетей.

В развитие основ релейной защиты и автоматики внесли большой вклад ученые Атабеков Г.И., Ванин В.К., Дроздов А.Д., Сирота И.М., Фабрикант В.Л., Федосеев А.М.

При выполнении преобразований схем замещения следует приводить промежуточные схемы, дающие возможность видеть последовательность преобразования. Сопrotivления всех элементов на схемах должны иметь порядковые номера. Выполнять задачи следует в порядке их размещения.

Для ускорения решения задач можно применить компьютерную программу Microsoft Excel. Это позволит получить навыки применения этой программы, которые будут полезны при решении различных задач в процессе дальнейшего обучения и на производстве.

В отчете по практическим занятиям и контрольной работе приводится перечень использованной литературы.

## 1. ТЕРМИНАЛ СИРИУС-2ДЗЛ-01 (ЗАДАЧА 1)

Терминал предназначен для обеспечения основной защиты абсолютной селективности воздушных, кабельных и смешанных воздушно-кабельных линий класса напряжений 6-220 кВ в сетях с эффективно заземленной или изолированной (компенсированной) нейтралью.

Устройство предназначено для установки на двухконцевых линиях с одно- или двухсторонним питанием. Возможно наличие на защищаемой линии одного или нескольких ответвлений с понижающими трансформаторами без источников питания.

Полный комплекс защиты состоит из двух одинаковых устройств (полукомплектов), устанавливаемых по концам защищаемой линии. Полукомплекты связываются между собой с помощью оптического цифрового канала связи (КС).

Функции защиты, выполняемые устройством:

- Трехступенчатая продольная дифференциальная токовая защита линии в пофазном исполнении:
  - дифференциальная токовая отсечка, реагирующая на сумму мгновенных значений дифференциального тока (ДЗЛ-1);
  - чувствительная ступень с торможением от сквозного тока (ДЗЛ-2);
  - чувствительная ступень с торможением от сквозного тока с выдержкой времени на срабатывание для резервирования защит силового трансформатора на ответвлении от защищаемой линии (ДЗЛ-3).
- Ненаправленная трехступенчатая максимальная токовая защита от междуфазных КЗ с независимой выдержкой времени (МТЗ-1, МТЗ-2, МТЗ-3).
- Защита от обрыва фаз (ЗОФ) или перекоса нагрузки по току обратной последовательности с независимой выдержкой времени с действием на сигнал или на отключение.

### 1.1. Расчет дифференциальной защиты воздушной линии с ответвлением

#### Исходные данные

Защита устанавливается на двух концах ВЛ 110 кВ с

ответвлением. На ответвлении генерирующих источников нет. Схема линии указана на рисунке 1.1.

Параметры элементов (первичные значения):

**Система С1:**

$$R1 = 1,051 \text{ Ом} \quad X1 = 3,49 \text{ Ом}$$

$$R0 = 0,9 \text{ Ом} \quad X0 = 5,134 \text{ Ом}$$

**Система С2:**

$$R1 = 1,246 \text{ Ом} \quad X1 = 3,574 \text{ Ом}$$

$$R0 = 0,684 \text{ Ом} \quad X0 = 4,556 \text{ Ом}$$

**Линии:**

$$L1 = 14,7 \text{ км} \quad L2 = 12,5 \text{ км}$$

$$Rl \text{ уд} = 0,21 \text{ Ом/км} \quad Xl \text{ уд} = 0,414 \text{ Ом/км}$$

$$R0 \text{ уд} = 0,378 \text{ Ом/км} \quad X0 \text{ уд} = 1,163 \text{ Ом/км}$$

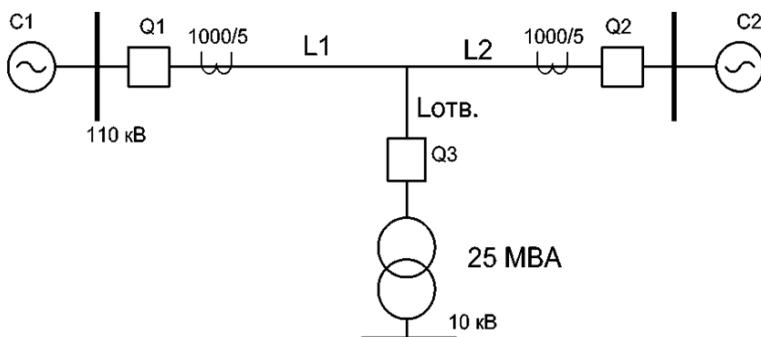


Рис. 1.1. Схема ВЛ 110 кВ с ответвлением

Максимальный нагрузочный ток линии 580 А, ответвления 132 А.

Трансформатор на ответвлении ТДН-25000/110/10;

Уном ВН = 115 кВ; Iном = 126 А;  $uk = 10,5$ .

Можно принять значения, как исходные.

Сопротивление трансформатора:

$$Xт = 10,5 * 115 * 115 / (100 * 25000) = 53 \text{ Ом.}$$

Токи трехфазных КЗ в узловых точках линии показаны на рисунке 1.2

Токи однофазных КЗ показаны на рисунке 1.3.

На основе расчетов по рисункам 1.2 и 1.3 получили:

— ток КЗ на шинах НН:  $I_{КЗ \text{ отв}} = 1160 \text{ А}$ ;

— максимальный ток сквозного КЗ:  $I_{КЗ \text{ вн. макс}} = 4550 \text{ А}$ ;

Напряжение  $u_k$  трансформатора при трехфазном включении:

$$12,7 + u_k = 12,7 + 10,5 = 23,2.$$

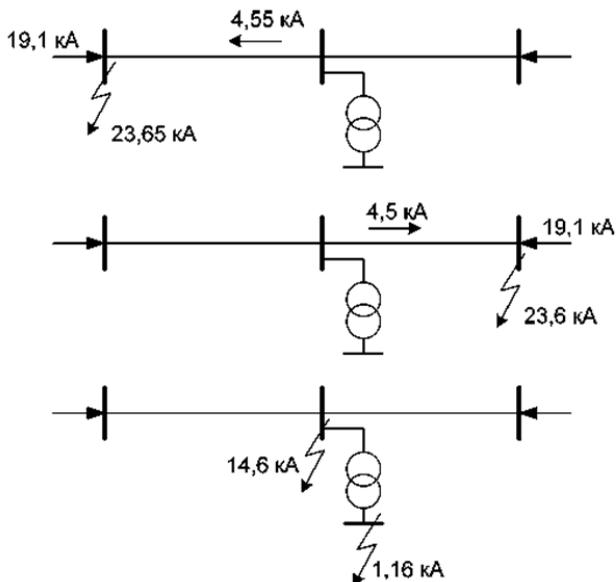


Рис.1.2. Токи трехфазных КЗ

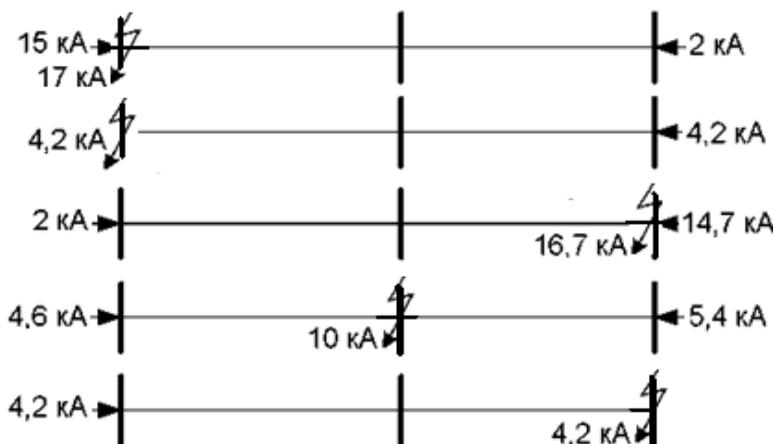


Рис. 1.3. Токи однофазных КЗ ( $3I_0$ )

Сопrotивление трансформатора при трехфазном включении:

$$X^{(3)}_{\tau} = 23,2 \cdot 115 \cdot 115 / (100 \cdot 25000) = 117 \text{ Ом.}$$

Бросок тока намагничивания трансформатора при трехфазном включении со стороны системы С1 находим по выражению:

$$I_{\text{БРОСКА}} = 0,84 \cdot 67000 / (9,6 + 117) = 410 \text{ А.}$$

Напряжение uk трансформатора при однофазном включении:

$$(12,7 + uk) / 1,35 = 23,2 / 1,35 = 17,3.$$

Сопrotивление трансформатора при однофазном включении:

$$X^{(1)}_{\tau} = 17,3 \cdot 115 \cdot 115 / (100 \cdot 25000) = 87 \text{ Ом.}$$

Бросок тока намагничивания трансформатора при однофазном включении со стороны системы С1 находим в предположении, что нейтраль трансформатора заземлена:

$$I_{\text{БРОСКА}} = 0,84 \cdot 67000 / (9,6 + 87) = 590 \text{ А.}$$

Расчет коэффициента цифрового выравнивания. С учетом максимального нагрузочного тока, равного 580 А, принимаем базисный ток равным 600 А.

Коэффициент выравнивания токов определяем:

$$K_{\text{ВЫР. ТТ}} = I_{\text{Б}} / I_{\text{НОМ}} = 600 / 1000 = 0,6.$$

Выбор параметров чувствительной ступени (ДЗЛ-2). Ступень действует без выдержки времени:

$$T_{\text{осн.}} = T_{\text{доп.}} = 0.$$

Выбор минимального тока срабатывания ступени приведен в таблице 1.1.

Если не использовать никаких блокировок, то необходимо принять значение уставки  $I_{\text{д1}}/I_{\text{Б}} = 2,9$ . Это значение выходит за диапазон возможных значений уставки (до 2,0), поэтому необходимо использовать внешний пуск ДЗЛ-2. Для этого задаем конфигурацию в соответствии с таблицей 1.

$$I_{\text{д1}}/I_{\text{Б}} \text{ принимаем равным } 0,4.$$

$$I_{\text{доп}}/I_{\text{Б}} \text{ принимаем равным } 2,9.$$

Полученные значения уставок сведены в таблицу 1.1.

Выбор точки перехода со второго участка характеристики на третий осуществляется по выражению:

Таблица 1.1

## Минимальный ток срабатывания ступени

Расчетное условие	Расчетное выражение	Первичные значения тока приведенные к $I_B$
(4) – отстройка от небалансов	$I_{Д1}/I_B \geq 0,4$	0,4
(5) – отстройка от КЗ на шинах НН	$I_{Д1}/I_B = K_{ОТС} \cdot I_{КЗ\ ОТВ.}/I_B$	$1,5 \cdot 1160/600 = 2,9$
(6) – отстройка от суммарного тока нагрузки ответвлений	$I_{Д1}/I_B = K_{ОТС} \cdot I_{СУММ.НАГР. ОТВ.}/I_B$	$1,5 \cdot 132/600 = 0,33$
(7) – отстройка от броска тока намагничивания трансформатора	$I_{Д1}/I_B = K_{ОТС} \cdot I_{БРОСКА} /I_B$	$1,5 \cdot 590/600 = 1,48\text{ А}$

$$I_{Т2}/I_B = 4 \cdot I_{НОМ} / I_B = 4 \cdot 1000/600 = 6,6.$$

Принимаем максимально возможное из диапазона значение:  
 $I_{Т2}/I_B = 4,0$ .

Коэффициент снижения тормозного тока определяется по выражению (10)

$$K_{СН.Т.} = 1 - 0,5 \cdot (K_{ПЕР} \cdot \varepsilon + \Delta f_{ВЫР}) = 1 - 0,5 \cdot (3,5 \cdot 0,1 + 0,04) = 0,805.$$

Коэффициент торможения на втором участке определяется по выражению :

$$\begin{aligned} K_{Т1} &= \frac{K_{ОТС} \cdot (K_{ПЕР} \cdot \varepsilon + \Delta f_{ВЫР}) \cdot 100}{K_{СН.Т.}} = \\ &= \frac{1,2 \cdot (3,5 \cdot 0,1 + 0,04) \cdot 100}{0,805} = 58\% \end{aligned}$$

Значение коэффициента торможения  $K_{Т2}$  на третьем

участке выбирается по выражению:

$$K_{T2} = 1,5 \cdot K_{T1} = 1,5 \cdot 58\% = 87\%.$$

Значение уставки  $K_{T2}$  *груб.* в соответствии с рекомендациями следует принять равным 200 %.

Точка перехода с первого участка на второй определяется по выражению:

$$I_{T1}/I_B = I_{Д1}/I_B / (K_{T1}/100) = 0,4 / 0,58 = 0,69.$$

Уставку блокировки по второй гармонике в соответствии с рекомендациями принимаем:

$$I_{T2}/I_{T1} = 0,15.$$

Сводные значения уставок приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2  
Рекомендуемые значения уставок

Наименование уставки	Значение
ДЗЛ-2 осн.	Вкл
<i>Тосн., с</i>	0,00
<i>I<sub>Д1</sub>/I<sub>Б</sub></i>	0,4
<i>I<sub>Т1</sub>/I<sub>Б</sub></i>	0,69
<i>I<sub>Т2</sub>/I<sub>Б</sub></i>	4,0
<i>K<sub>Т1</sub>, %</i>	58
<i>K<sub>Т2</sub>, %</i>	87
<i>K<sub>Т2</sub>груб., %</i>	200
Блокир. при БНТ	Вкл
Внешний пуск	Вкл
ДЗЛ-2 доп.	Вкл
<i>Тдоп., с</i>	0,00
<i>I<sub>доп</sub>/I<sub>Б</sub></i>	2,9

Проверка чувствительности второй ступени (ДЗЛ-2).

Чувствительность основной ступени ДЗЛ-2 с внешним пуском в режиме однофазного замыкания на шинах системы С2 при одно-стороннем питании:

$$K_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{кз мин.}}}{(I_{\text{Д1}}/I_{\text{Б}}) \cdot I_{\text{Б}}} = \frac{4200}{(0,4) \cdot 600} = 17,5.$$

Чувствительность дополнительного измерительного органа в

том же режиме:

$$K_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{кз мин}}}{(I_{\text{дон}}/I_{\text{б}}) \cdot I_{\text{б}}} = \frac{4200}{(2,9) \cdot 600} = 2,4.$$

Как показал расчет, чувствительность основной ступени ДЗЛ-2 выполняется с большим запасом. А дополнительная резервирующая ступень ДЗЛ-2доп также обеспечит чувствительность при КЗ без большого переходного сопротивления.

### Выбор параметров третьей ступени (ДЗЛ-3)

Предположим, что на трансформаторе ответвления на стороне 110 кВ имеется резервная защита – МТЗ с уставками 180 А и 2 с. Минимальный ток срабатывания ступени определяется по выражению:

$$I_{\text{д1}}/I_{\text{б}} = K_{\text{отс}} (I_{\text{сз тр.}} + I'_{\text{нагр.}})/I_{\text{б}} = 1,1 \cdot 180/600 = 0,33.$$

Коэффициент торможения приравниваем таковому у второй ступени:

$$K_{\text{т1}} = 58 \%$$

Точка перехода с первого участка на второй определяется по выражению:

$$I_{\text{т1}}/I_{\text{б}} = I_{\text{д1}}/I_{\text{б}} / (K_{\text{т1}}/100) = 0,33 / 0,58 = 0,57.$$

Проверка чувствительности ступени ДЗЛ-3 при КЗ на шинах НН трансформатора ответвления:

$$K_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{кз мин}}}{(I_{\text{д1}}/I_{\text{б}}) \cdot I_{\text{б}}} = \frac{0,87 \cdot 1160}{0,33 \cdot 600} = 5,1.$$

Чувствительность выполняется с запасом.

Уставка по времени выбирается по выражению:

$$T = t_{\text{сз тр.}} + \Delta t = 2,0 + 0,5 = 2,5 \text{ с.}$$

Блокировку ступени при БНТ можно отключить, т.к. ступень имеет большую выдержку по времени на срабатывание.

### Выбор параметров дифференциальной отсечки (ДЗЛ-1)

Ток срабатывания дифференциальной отсечки определяется по выражению:

$$I_{\text{диф}}/I_{\text{б}} = 0,84 * I_{\text{кз вн. макс.}}/I_{\text{б}} = 0,84 * 4550/600 = 6,4.$$

## 1.2. Контрольные вопросы

- ✓ Расчет коэффициента цифрового выравнивания
- ✓ Выбор параметров чувствительной ступени (ДЗЛ-2)
- ✓ Проверка чувствительности второй ступени (ДЗЛ-2).
- ✓ Выбор параметров третьей ступени (ДЗЛ-3).
- ✓ Выбор параметров дифференциальной отсечки (ДЗЛ-1).

## 2. ТЕРМИНАЛ СИРИУС-Т (ЗАДАЧА 2)

### 2.1. Дифференциальная защита двухобмоточного трансформатора

#### Исходные данные

Двухобмоточный трансформатор 115/6,6 кВ мощностью 16 МВА. РПН в нейтрали ВН с пределом регулирования  $\pm 16\%$  от номинального напряжения, реально используемый диапазон  $\pm 13\%$ . Сборка обмоток Yd-11. Коэффициент трансформации ТТ на стороне ВН - 150/5; на стороне НН - 2000/5. ТТ собраны по схеме «звезда» с обеих сторон трансформатора. Класс точности - 10Р.

#### Выбор общих параметров дифференциальной защиты.

Таблица 2.1(часть 1)

Расчет уставок, определяющих вторичные токи в плечах защиты, соответствующие номинальной мощности защищаемого трансформатора.

Наименование величины	Обозначение и метод определения
Первичный ток на сторонах защищаемого трансформатора, соответствующий его номинальной мощности, А	$I_{НОМ ПЕРВ.} = \frac{S_{НОМ}}{\sqrt{3} \cdot U_{НОМ,СР}}$
Коэффициент трансформации трансформатора тока	$K_I$ ( $I_{ПЕРВ.ТТ} / I_{ВТОР.ТТ}$ )
Схема соединения трансформаторов тока (электрических)	Y, D
Вторичный ток в плечах защиты, соответствующий номинальной мощности защищаемого трансформатора, А	$I_{НОМ ВТОР.} = \frac{I_{НОМ ПЕРВ.}}{K_I} \cdot k_{СХ}$
Принятые значения уставок (округление до двух знаков после запятой)	«Iбаз ВН», «Iбаз НН» диапазон уставок: (0,15—30,00) А

Таблица 2.1(часть 2)

Расчет уставок, определяющих вторичные токи в плечах защиты, соответствующие номинальной мощности защищаемого трансформатора.

Наименование величины	Числовое значение для стороны	
	ВН	НН
Первичный ток на сторонах защищаемого трансформатора, соответствующий его номинальной мощности, А	$\frac{16000}{115\sqrt{3}} = 80,4$	$\frac{16000}{6,6\sqrt{3}} = 1400$
Коэффициент трансформации трансформатора тока	150/5	2000/5
Схема соединения трансформаторов тока (электрических)	Y	Y
Вторичный ток в плечах защиты, соответствующий номинальной мощности защищаемого трансформатора, А	$\frac{80,4 \cdot 1}{150/5} = 2,68$	$\frac{1400 \cdot 1}{2000/5} = 3,5$
Принятые значения уставок (округление до двух знаков после запятой)	2,68	3,50

Рассчитанные базисные токи сторон проверяем на попадание в допустимый диапазон выравнивания, определяемый номинальным током входа устройства. Для  $I_{ном} = 5А$  базисные токи должны входить в диапазон: (1,01 – 10,00) А. Значения 2,68 и 3,5 укладываются в указанный диапазон.

С учетом реально используемого диапазона регулирования РПН, принимаем уставку «Размах РПН, %» равной 13.

Уставки «Группа ТТ ВН» и «Группа ТТ НН» подбираются с учетом группы защищаемого трансформатора и групп сборки измерительных ТТ по таблицам.

Пусть в соответствии с принятым обозначением [2] используется первый тип подключения дифференциальной защиты, то есть разноименные группы сборки ТТ. Для трансформатора Yd-11 в сети с заземленной нейтралью на стороне ВН (110 кВ) по таблицам получаем следующие значения уставок: «Группа ТТ ВН — 11» и «Группа ТТ НН — 0».

Выбор уставок чувствительной дифференциальной защиты (ДЗТ-2)

Таблица 2.2(часть 1)

Расчет уставок чувствительной ступени дифференциальной защиты.

Наименование величины	Обозначение и метод определения
Расчетный ток небаланса при протекании тока равного базисному (в относительных единицах)	$I_{НБ\text{ РАСЧ.}} = K_{ПЕР} K_{ОДН} \cdot \varepsilon + \Delta U_{РПН} + \Delta I_{ДОБАВ}$
Выбор уставки срабатывания	должно выполняться условие: $I_{\Delta 1} / I_{\Delta 2} \geq K_{ОТС} I_{НБ\text{ РАСЧ.}}$
Принятое значение базовой уставки срабатывания	« $I_{\Delta 1} / I_{\Delta 2}$ » диапазон уставки: (0,3—1,0) $I_{\Delta 2}$
Коэффициент снижения тормозного тока	$K_{СНТ} = 1 - 0,5 \cdot I_{НБ\text{ РАСЧ.}}$
Расчетный коэффициент торможения в процентах	$K_{ТОРМ} = 100 I_{\text{ДИФ}} / I_{\text{ТОРМ}} =$ $= 100 \cdot K_{ОТС} \cdot I_{НБ\text{ РАСЧ.}} / K_{СНТ}$
Принятое значение уставки коэффициента торможения (округление до целого числа)	« $K_{ТОРМ}, \%$ » диапазон уставки: (10—100) %
Принятое значение уставки второй точки излома	« $I_{\Delta 2} / I_{НОМ}$ » рекомендуемый диапазон уставки: (1,0—2,0) $I_{НОМ}$
Принятое значение уставки блокировки по второй гармонике	$I_{\Delta 2} / I_{\Delta 1}$ диапазон уставки: (0,06—0,20)

Таблица 2.2(часть 2)

Расчет уставок чувствительной ступени дифференциальной защиты

Наименование величины	Числовое значение
Расчетный ток небаланса при протекании тока равного базисному (в относительных единицах)	$2,0 \cdot 1,0 - 0,1 + 0,13 + 0,04 = 0,37$
Выбор уставки срабатывания	$1,2 \cdot 0,37 = 0,44$
Принятое значение базовой уставки срабатывания	принимается 0,50
Коэффициент снижения тормозного тока	$1 - 0,5 \cdot 0,37 = 0,815$
Расчетный коэффициент торможения в процентах	$100 \cdot 1,3 \cdot 0,37 / 0,815 = 59$
Принятое значение уставки коэффициента торможения (округление до целого числа)	59
Принятое значение уставки второй точки излома	2,0
Принятое значение уставки блокировки по второй гармонике	0,15

Выбор уставок дифференциальной отсечки (ДЗТ-1)

Для рассматриваемого трансформатора максимальный ток внешнего расчетного КЗ равен 1022 А.

Таблица 2.3 (часть 1)  
 Расчет уставок дифференциальной отсечки

Наименование величины	Обозначение и метод определения
Максимальный ток внешнего КЗ на стороне НН, приведенный к стороне ВН, А	$I_{КЗ\text{ ВНЕШ. МАКС}}$
Расчетный ток максимального внешнего КЗ приведенный к номинальному току трансформатора (в относительных единицах)	$I_{КЗ\text{ ВНЕШ. МАКС}}^* = I_{КЗ\text{ ВНЕШ. МАКС}} / I_{НОМ. ВН}$
Расчетный ток небаланса при внешнем КЗ	$I_{НБ} = K_{ОТС} (K_{ПЕР} K_{ОДН} \cdot \epsilon + \Delta U_{РПН} + \Delta f_{ДОБАВ}) I_{КЗ\text{ ВН. МАКС.}}$
Выбор уставки срабатывания с учетом отстройки от БНТ и небаланса при внешнем КЗ	должно выполняться условие: $I_{ДИФ}/I_{БАЗ} \geq I_{НБ}$ и $I_{ДИФ}/I_{БАЗ} \geq 6$
Принятое значение уставки (округление до одного знака после запятой)	« $I_{ДИФ}/I_{БАЗ}$ » диапазон уставки: (4,0—30,0) $I_{БАЗ}$

 Таблица 2.3 (часть 2)  
 Расчет уставок дифференциальной отсечки

Наименование величины	Числовое значение
Максимальный ток внешнего КЗ на стороне НН, приведенный к стороне ВН, А	1022
Расчетный ток максимального внешнего КЗ приведенный к номинальному току трансформатора (в относительных единицах)	$1022 / 80,4 = 12,8$
Расчетный ток небаланса при внешнем КЗ	$1,5 \cdot (3 \cdot 0,1 + 0,13 + 0,04) \times 12,8 = 9,02$
Выбор уставки срабатывания с учетом отстройки от БНТ и небаланса при внешнем КЗ	принимается значение 9
Принятое значение уставки (округление до одного знака после запятой)	9

Проверка чувствительности дифференциальной защиты.

Коэффициент чувствительности ДЗТ-2 должен быть больше 2. Для дифференциальных защит понижающих трансформаторов в качестве расчетного принимается двухфазное КЗ на выводах низшего напряжения. Как показывает опыт, в подавляющем большинстве случаев чувствительность обеспечивается и поэтому производить проверку не целесообразно.

## 2.2. Контрольные вопросы

- ✓ Выбор общих параметров дифференциальной защиты
- ✓ Выбор уставок чувствительной дифференциальной защиты (ДЗТ-2)
- ✓ Выбор уставок дифференциальной отсечки (ДЗТ-1)
- ✓ Проверка чувствительности дифференциальной защиты

### 3. ТЕРМИНАЛ СИРИУС-ТЗ (ЗАДАЧА 3)

#### 3.1. Дифференциальная защита трехобмоточного трансформатора

##### Исходные данные.

Трехобмоточный трансформатор ТДТН 115 ( $\pm 9 \times 1,77 = 16\%$ ) / 38,5 / 11 (кВ) мощностью 40 МВ·А. РПН установлен в нейтрали обмотки ВН. Сборка обмоток  $Yud-0-11$ . Коэффициент трансформации ТТ на стороне ВН - 400/5; на стороне СН - 1500/5; на стороне НН - 3000/5. ТТ собраны по схеме «звезда» со всех сторон трансформатора. Класс точности - 10Р.

Трансформатор установлен на двухтрансформаторной подстанции. Питание имеется только со стороны ВН, на сторонах ВН и СН трансформаторы работают параллельно. На стороне НН имеется расщепленный реактор, входящий в зону дифференциальной защиты. Первичная схема подстанции, схема замещения и токораспределение в расчетных режимах показаны на рисунке 3.1.

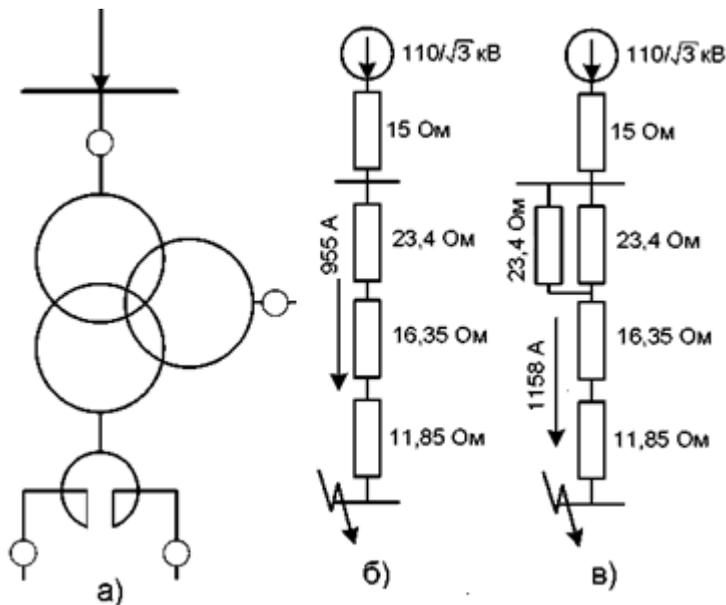


Рисунок 3-1 – Расчетные схемы для расчетов токов КЗ(часть 1).

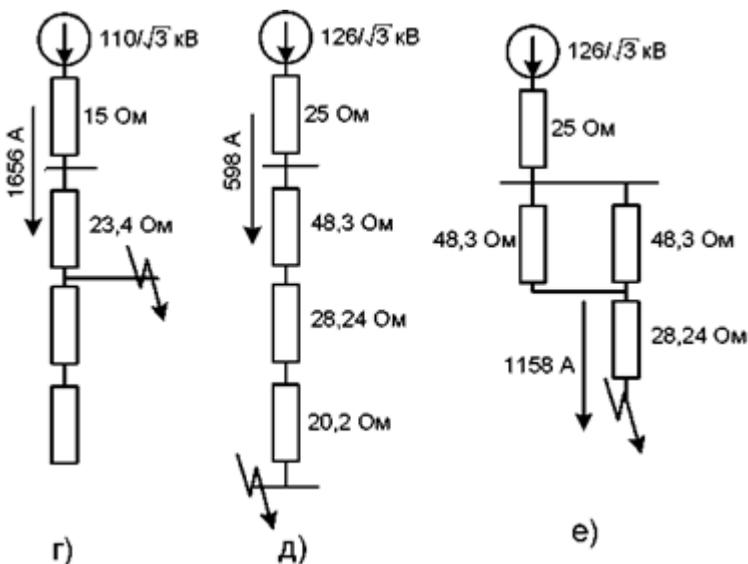


Рисунок 3-1 – Расчетные схемы для расчетов токов КЗ(часть 2).

Пояснения к рисункам:

а) - первичная схема;

б), в), д) и е) – расчеты на стороне низкого напряжения;

г) – расчеты на стороне низкого напряжения.

### Выбор общих параметров дифференциальной защиты.

За реально возможный диапазон регулирования напряжения принят диапазон от 96,5 кВ до 126 кВ. В таком случае середина диапазона равна:

$$96,5 + (126 - 96,5) / 2 = 111,25 \text{ кВ.}$$

Это значение и принимаем за  $U_{опт}$ . Дальнейший расчет сведен в таблицу 3.1.

Таблица 3.1(часть 1)

Расчет уставок, определяющих вторичные токи в плечах защиты, соответствующие номинальной мощности защищаемого трансформатора.

Наименование величины	Обозначение и метод определения
Первичный ток на сторонах защищаемого трансформатора, соответствующий его номинальной мощности, А	$I_{НОМ ПЕРВ} = \frac{S_{НОМ}}{\sqrt{3} \cdot U_{НОМ,СР}}$
Коэффициент трансформации трансформатора тока	$K_I$ $(I_{ПЕРВ,ТТ} / I_{ВТОР,ТТ})$
Схема соединения трансформаторов тока (электрических)	Y, D
Вторичный ток в плечах защиты, соответствующий номинальной мощности защищаемого трансформатора, А	$I_{НОМ ВТОР} = \frac{I_{НОМ ПЕРВ}}{K_I} \cdot k_{СХ}$
Принятые значения уставок (округление до двух знаков после запятой)	«Iбаз ВН», «Iбаз СН», «Iбаз НН» диапазон уставок: (0,15—15,00) А
Группа соединения измерительных ТТ (0 или 6 – в зависимости от места сборки нейтрали звезды ТТ)	—
Группа соединения цифровых ТТ (0 / 1 / 5 / 6 / 7 / 11)	—
Принятые значения уставок (выбираются в соответствии со значениями двух предыдущих строк таблицы)	«Группа ТТ ВН», «Группа ТТ СН», «Группа ТТ НН», диапазон значений: (0 / 1 / 5 / 6 / 7 / 11)
Размах РПН, %	Размах РПН

Таблица 3.1(часть 2)

Расчет уставок, определяющих вторичные токи в плечах защиты, соответствующие номинальной мощности защищаемого трансформатора.

Наименование величины	Числовое значение для стороны		
	ВН	СН	НН
Первичный ток на сторонах защищаемого трансформатора, соответствующий его номинальной мощности, А	$\frac{40000}{111,25\sqrt{3}} = 208$	$\frac{40000}{38,5\sqrt{3}} = 600$	$\frac{40000}{11\sqrt{3}} = 2102$
Коэффициент трансформации трансформатора тока	400/5	1500/5	3000/5
Схема соединения трансформаторов тока (электрических)	Y	Y	Y
Вторичный ток в плечах защиты, соответствующий номинальной мощности защищаемого трансформатора, А	$\frac{208 \cdot 1}{400/5} = 2,6$	$\frac{600 \cdot 1}{1500/5} = 2$	$\frac{2102 \cdot 1}{3000/5} = 3,5$
Принятые значения уставок (округление до двух знаков после запятой)	2,60	2,00	3,50
Группа соединения измерительных ТТ (0 или 6 – в зависимости от места сборки нейтрали звезды ТТ)	0	0	0
Группа соединения цифровых ТТ (0 / 1 / 5 / 6 / 7 / 11)	11	11	0
Принятые значения уставок (выбираются в соответствии со значениями двух предыдущих строк таблицы)	11	11	0
Размах РПН, %	$100 \cdot (126 - 96,5) / (2 \cdot 111,25) = 13$		

Расчитанные базисные токи сторон проверяем на попадание в допустимый диапазон выравнивания, определяемый номинальным током входа устройства. Для  $I_{ном} = 5A$  базисные токи должны входить в диапазон: (1,01 - 10,00) А. Значения 2,60; 2,00 и 3,50 укладываются в указанный диапазон.

С учетом реально используемого диапазона регулирования РПН, принимаем уставку «Размах РПН, %» равной 13.

Уставки «Группа ТТ ВН», «Группа ТТ СН» и «Группа ТТ НН» подбираются с учетом группы защищаемого трансформатора и групп сборки измерительных ТТ по таблицам.

В соответствии с параметрами силового трансформатора принимаем значения уставок: «Сторона РПН - ВН»; « $\Delta$  Нступени, % - 1,77».

### Выбор уставок дифференциальной защиты ДЗТ-2

При расчете уставок чувствительной тормозной характеристики принимаем, что благодаря действию алгоритма компенсации небаланса от работы РПН составляющая  $\Delta U_{РПН}$  не превышает значение 0,04.

Таблица 3.2(часть 1)

Расчет уставок чувствительной тормозной характеристики (с учетом действия компенсации небаланса от работы РПН).

Наименование величины	Обозначение и метод определения
Расчетный ток небаланса при протекании тока равного базисному (в относительных единицах)	$I_{НБ.РАСЧ.} = K_{ПЕР} K_{ОДН} \cdot \varepsilon + \Delta U_{РПН} + \Delta f_{ДОБАВ}$
Выбор уставки срабатывания	должно выполняться условие: $I_{Д1ЧУВС}/I_{БАЗ} \geq K_{ОТС} I_{НБ.РАСЧ.}$
Принятое значение базовой уставки срабатывания	« $I_{Д1ЧУВС}/I_{БАЗ}$ » диапазон уставки: (0,3—1,0) $I_{БАЗ}$
Коэффициент снижения тормозного тока	$K_{СН.Т.} = \sqrt{1 - I_{НБ.РАСЧ.}^*}$
Расчетный коэффициент торможения в процентах	$K_{ТОРМ} = 100 \cdot K_{ОТС} \cdot I_{НБ.РАСЧ.} / K_{СН.Т.}$
Принятое значение уставки коэффициента торможения (округление до целого числа)	« $K_{ТОРМ.ЧУВС. \%}$ » диапазон уставки: (10—100) %
Принятое значение уставки второй точки излома	« $I_{М2ЧУВС}/I_{НОМ}$ » рекомендуемый диапазон уставки: (1,0—2,0) $I_{НОМ}$
Принятое значение уставки блокировки по второй гармонике	$I_{Д2}/I_{Д1}$ диапазон уставки: (0.06—0.20)

Таблица 3.2(часть 2)

Расчет уставок чувствительной тормозной характеристики (с учетом действия компенсации небаланса от работы РПН).

Наименование величины	Числовое значение
Расчетный ток небаланса при протекании тока равного базисному (в относительных единицах)	$2,0 \cdot 1,0 \cdot 0,1 + 0,04 + 0,04 = 0,28$
Выбор уставки срабатывания	$1,2 \cdot 0,28 = 0,34$
Принятое значение базовой уставки срабатывания	принимаем 0,4
Коэффициент снижения тормозного тока	$\sqrt{1 - 0,28} = 0,85$
Расчетный коэффициент торможения в процентах	$100 \cdot 1,2 \cdot 0,28 / 0,85 = 39,5$
Принятое значение уставки коэффициента торможения (округление до целого числа)	40
Принятое значение уставки второй точки излома	2,0
Принятое значение уставки блокировки по второй гармонике	0,15

Таблица 3.3 (часть 1)

Расчет уставок грубой тормозной характеристики (без учета действия компенсации небаланса от работы РПН)

Наименование величины	Обозначение и метод определения
Расчетный ток небаланса при протекании тока равного базисному (в относительных единицах)	$I_{\text{НБ.РАСЧ.}} = K_{\text{ПЕР}} K_{\text{ОДН}} \cdot \epsilon + \Delta U_{\text{РПН}} + \Delta f_{\text{ДОБАВ}}$
Выбор уставки срабатывания	должно выполняться условие: $I_{\text{д1груб/1баз}} \geq K_{\text{ОТС}} I_{\text{НБ.РАСЧ.}}$
Принятое значение базовой уставки срабатывания	« $I_{\text{д1груб/1баз}}$ » диапазон уставки: (0,3—1,0) $I_{\text{БАЗ}}$
Коэффициент снижения тормозного тока	$K_{\text{СНТ}} = \sqrt{1 - I_{\text{НБ.РАСЧ.}}}^*$
Расчетный коэффициент торможения в процентах	$K_{\text{ТОРМ}} = 100 \cdot K_{\text{ОТС}} \cdot I_{\text{НБ.РАСЧ.}} / K_{\text{СНТ}}$
Принятое значение уставки коэффициента торможения (округление до целого числа)	« $K_{\text{ТОРМГРУБ, \%}}$ » диапазон уставки: (10—100) %
Принятое значение уставки второй точки излома	« $I_{\text{м2груб/1ном}}$ » рекомендуемый диапазон уставки: (1,0—2,0) $I_{\text{НОМ}}$

Таблица 3.3 (часть 2)

Расчет уставок грубой тормозной характеристики (без учета действия компенсации небаланса от работы РПН)

Наименование величины	Числовое значение
Расчетный ток небаланса при протекании тока равного базисному (в относительных единицах)	$2,0 \cdot 1,0 \cdot 0,1 + 0,13 + 0,04 = 0,37$
Выбор уставки срабатывания	$1,2 \cdot 0,37 = 0,44$
Принятое значение базовой уставки срабатывания	принимаем 0,5
Коэффициент снижения тормозного тока	$\sqrt{1 - 0,37} = 0,79$
Расчетный коэффициент торможения в процентах	$100 \cdot 1,2 \cdot 0,37 / 0,79 = 56$
Принятое значение уставки коэффициента торможения (округление до целого числа)	56
Принятое значение уставки второй точки излома	2,0

### Выбор уставок дифференциальной отсечки (ДЗТ-1)

Согласно примера для рассматриваемого трансформатора производим отстройку от срабатывания при КЗ на стороне НН (рисунок 3.1, в), а также при КЗ на стороне СН (рисунок 3.1, г). В соответствии с рекомендациями принимаем равными чувствительный и грубый пороги срабатывания ДЗТ-1.

Таблица 3.4 (часть 1).

#### Расчет уставок дифференциальной отсечки

Наименование величины	Обозначение и метод определения
Максимальный ток внешнего КЗ, приведенный к стороне ВН, А	$I_{КЗ\text{ ВНЕШ. МАКС}}$
Расчетный ток максимального внешнего КЗ приведенный к номинальному току трансформатора (в относительных единицах)	$I_{КЗ\text{ ВНЕШ. МАКС}}^* = I_{КЗ\text{ ВНЕШ. МАКС}} / I_{БАЗ.\text{ ВН}}$
Расчетный ток небаланса при внешнем КЗ	$I_{НБ} = K_{ОТС} (K_{ПЕР} K_{ОДН} \cdot \epsilon + \Delta U_{РПН} + \Delta f_{ДОБАВ}) I_{КЗ\text{ ВН. МАКС}} \cdot$
Выбор уставки срабатывания с учетом отстройки от БНТ и небаланса при внешнем КЗ	должно выполняться условие: $I_{ДИФ}/I_{БАЗ} \geq I_{НБ}$ и $I_{ДИФ}/I_{БАЗ} \geq 6$
Принятое значение уставки (округление до одного знака после запятой)	« $I_{ДИФ.ЧУВС}/I_{БАЗ}$ » = « $I_{ДИФ.ГРУБ}/I_{БАЗ}$ » диапазон уставки: (4,0—30,0) $I_{БАЗ}$

Таблица 3.4 (часть 1).

#### Расчет уставок дифференциальной отсечки

Наименование величины	Числовое значение для стороны	
	СН	НН
Максимальный ток внешнего КЗ, приведенный к стороне ВН, А	1158	1656
Расчетный ток максимального внешнего КЗ приведенный к номинальному току трансформатора (в относительных единицах)	$1158 / 208 = 5,6$	$1656 / 208 = 8,0$
Расчетный ток небаланса при внешнем КЗ	$1,5 \cdot (3 \cdot 0,1 + 0,13 + 0,04) \cdot 5,6 = 3,95$	$1,5 \cdot (3 \cdot 0,1 + 0,13 + 0,04) \cdot 8,0 = 5,64$
Выбор уставки срабатывания с учетом отстройки от БНТ и небаланса при внешнем КЗ	принимаем значение 6,0	
Принятое значение уставки (округление до одного знака после запятой)	6,0	

### Проверка чувствительности дифференциальной защиты

Коэффициент чувствительности ДЗТ-2 должен быть больше 2. Для дифференциальных защит понижающих трансформаторов в качестве расчетного принимается двухфазное КЗ на выводах низшего напряжения. Как показывает опыт, в подавляющем большинстве случаев чувствительность обеспечивается и поэтому производить проверку не целесообразно. Для демонстрации ниже приводится пример расчета чувствительности.

Рассчитаем коэффициент чувствительности для рассматриваемой сети (рисунок 3.1, а). Расчет производится для грубых уставок.

Первичный ток срабатывания защиты при отсутствии торможения:

$$I_{с.з.} = I_{ном} * (I_{д1груб} / I_{ном}) = 208 * 0,5 = 104 \text{ А.}$$

При проверке чувствительности защиты учитываем, что благодаря направленности торможения при внутренних КЗ тормозной ток отсутствует.

Чувствительность при двухфазном КЗ на стороне НН ниже реактора (рисунок 3.1, д):

$$K_{ч} = 598 * 0,87 / 104 = 5,0.$$

Чувствительность при двухфазном КЗ на стороне НН выше реактора (рисунок 2, е):

$$K_{ч} = 941 * 0,87 / 104 = 7,9.$$

Чувствительность при КЗ на стороне СН (рисунок 2, г):

$$K_{ч} = 1656 / 104 = 15,9.$$

Поскольку защита трансформатора достаточно чувствительна при КЗ ниже реактора, установка самостоятельной защиты реактора не требуется.

## 3.2. Контрольные вопросы

- ✓ Выбор общих параметров дифференциальной защиты
- ✓ Выбор уставок дифференциальной защиты ДЗТ-2.
- ✓ Выбор уставок дифференциальной защиты ДЗТ-1.
- ✓ Проверка чувствительности дифференциальной защиты.

## 4. КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА

### 4.1. Требования к контрольным работам

Выполнению контрольной работы предшествует изучение теоретической части курса по дисциплине.

Контрольная работа состоит из 2 частей: написание двух рефератов по микропроцессорным защитам и расчет дифференциальной защиты ВЛ с ответвлением.

Возможны дистанционные консультации по выполнению контрольной работы.

Рекомендуется контрольную работу печатать (формат А4).

Использовать титульный лист установленного образца.

Текст и формулы набираются в редакторе Word.

Рисунки и графики выполняются в графическом редакторе.

При защите необходимо показать знание материала, изложенного в контрольной работе.

Без защищенной контрольной работы студент к экзамену не допускается.

### 4.2. Реферат

Студенту необходимо написать реферат по двум вопросам. Номера тем реферата выбираются из таблицы 1 по последним двум цифрам номера зачетки.

Таблица 4.1 (часть 1).

Номера тем рефератов

Предпоследняя цифра номера зачетки	1	2	3	4	5
Тема реферата 1	1	2	3	4	5
Последняя цифра номера зачетки	1	2	3	4	5
Тема реферата 2	11	12	13	14	15

Таблица 4.1 (часть 2).

Номера тем рефератов

Предпоследняя цифра номера зачетки	6	7	8	9	0
Тема реферата 1	6	7	8	9	10
Последняя цифра номера зачетки	6	7	8	9	0
Тема реферата 2	16	17	18	19,	20

*Вопросы реферата по контрольной работе.*

1. Продольная дифференциальная защита генератора.
2. Защита от однофазных замыканий на землю в генераторе.
3. МТЗ генератора с пуском по напряжению
4. МТЗ генератора с коррекцией по напряжению.
5. Защита от асинхронного режима.
6. Защита от несимметричных перегрузок.
7. Дистанционная защита генератора.
8. Продольная дифференциальная защита трансформатора.
9. Максимально-токовая защита.
10. Дистанционная защита трансформатора.
11. Максимальная токовая защита стороны ВН трансформатора (МТЗ ВН)
12. Максимальная токовая защита стороны НН трансформатора (МТЗ НН).
13. Максимальная токовая защита линии.
14. Защита от однофазных замыканий на землю линии.
15. Резервирование при отказе выключателя (УРОВ).
16. Дуговая защита присоединения.
17. Защита сборных шин тупиковой подстанции.
18. Дифференциальная защита шин с торможением.
19. Логическая защита шин (ЛЗШ).
20. Защита секционного выключателя.

### 4.3. Исходные данные к задаче

Студенту необходимо выполнить расчет дифференциальной защиты воздушной линии с ответвлением. Необходимые исходные данные выбираются из таблицы 4.2 по последним двум цифрам номера зачетки

Таблица 4.2 (часть 1)

Исходные данные электрической сети

Предпоследняя цифра номера зачетки	1	2	3	4	5
C1: R1, Ом	0,85	0,9	0,95	1,0	1,05
C1: X1, Ом	3,1	3,2	3,3	3,4	3,5
C1: R0, Ом	0,65	0,7	0,75	0,8	0,85
C1: X0, Ом	4,3	4,5	4,7	4,9	5,1
C2: R1, Ом	1,05	1,1	1,15	1,2	1,25
C2: X1, Ом	2,6	2,7	2,8	2,9	3,0
C2: R0, Ом	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7
C2: X0, Ом	3,7	3,9	4,1	4,3	4,5
Последняя цифра номера зачетки	1	2	3	4	5
L1, км	11	12	13	14	15
L2, км	8	9	10	11	12
R1уд, Ом	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
R0уд, Ом	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
X1уд, Ом	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
X1уд, Ом	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2

Таблица 4.2 (часть 2)  
Исходные данные электрической сети

Предпоследняя цифра номера зачетки	6	7	8	9	0
C1: R1, Ом	1,1	1,15	1,2	1,25	1,3
C1: X1, Ом	3,6	3,7	3,8	3,9	4,0
C1: R0, Ом	0,9	0,95	1,0	1,05	1,1
C1: X0, Ом	5,3	5,5	5,7	5,9	6,1
C2: R1, Ом	1,3	1,35	1,4	1,45	1,5
C2: X1, Ом	3,1	3,2	3,3	3,4	3,5
C2: R0, Ом	0,75	0,8	0,85	0,9	0,95
C2: X0, Ом	4,7	4,9	5,1	5,3	5,5
Последняя цифра номера зачетки	6	7	8	9	0
L1, км	16	17	18	19,	20
L2, км	13	14	15	16	17
R1уд, Ом	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
R0уд, Ом	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
X1уд, Ом	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
X1уд, Ом	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2

## **ПЕРЕЧЕНЬ ИНФОРМАЦИОННЫХ РЕСУРСОВ ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Микропроцессорное устройство защиты «Сириус-2ДЗЛ-01». Руководство по эксплуатации.– М.: АО «РАДИУС Автоматика», 2012. – 95с.
2. Микропроцессорное устройство защиты «Сириус-Т». Руководство по эксплуатации.– М.: АО «РАДИУС Автоматика», 2023. – 110с.
3. Микропроцессорное устройство защиты «Сириус-ТЗ». Руководство по эксплуатации.– М.: АО «РАДИУС Автоматика», 2022. – 118с.